

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA
EDICIÓN 2019



TEMA: INVESTIGACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE GAS RADÓN (^{222}RN) Y OTRAS EMISIONES DIFUSAS EN EL ÁREA DE AHUACHAPÁN, EL SALVADOR

PRESENTAN:

José Flavio De La O Payés
Stephanie Tatiana Mejía Morales
Hugo Ernesto Quinteros Segovia

ASESORES:

Licda. María Inés Magaña
PhD. Álvaro Amaya

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE DE 2019

ÍNDICE

1.	Resumen.....	6
2.	Introducción.....	7
3.	Planteamiento del problema.....	8
4.	Justificación del estudio.....	9
5.	Objetivos.....	10
5.1	Objetivo General:.....	10
5.2	Objetivos Específicos:.....	10
6.	Marco Teórico.....	11
6.1	Descripción Geológica del Campo Geotérmico de Ahuachapán.....	11
6.2	Mediciones En Campos Exploratorios.....	12
6.3	Matriz De Gases Geotérmicos.....	13
6.4	Método ASTM D5072-09 (2016) para determinación de Radón (²²² Rn) en agua.....	14
6.4.1	Proceso del Centelleo Líquido.....	15
6.5	Análisis Estadístico.....	15
6.5.1	Análisis Estadístico por Componentes Principales.....	15
6.5.2	Regresión Lineal Múltiple.....	16
7.	Metodología.....	17
7.1	Sitios de Muestreo.....	17
7.2	Análisis de Radón en Agua.....	17
7.2.1	Muestreo de Vapor Condensado de Fumarola.....	18
7.2.2	Muestra de Agua Superficial.....	18
7.3	Análisis Estadístico.....	19
7.3.1	Análisis por Componentes Principales.....	19
7.3.2	Regresión lineal múltiple.....	20
8.	Análisis de datos.....	21
8.1	Datos Químicos.....	21
8.1.1	Concentraciones De Gas Radón (²²² Rn) y Parámetros Físicoquímicos.....	21
9.	Presentación De Resultados.....	22
9.1	Caracterización De Las Aguas.....	22
9.2	Radón en Agua.....	25
9.3	Radón y Sismicidad.....	25
9.4	Análisis Estadístico.....	28
9.4.1	Análisis Por Componentes Principales.....	28

9.4.2	Regresión Lineal Múltiple Para Componente Uno.....	33
9.4.3	Regresión Lineal Múltiple Para Componente Dos.....	35
9.4.4	Clasificación de las Aguas con Análisis de Componentes Principales	37
9.5	Gases Difusos	40
9.5.1	Radón (²²² Rn) y Temperatura de Suelo (°C)	40
9.5.2	Torón (²²⁰ Rn).....	41
9.5.3	Mercurio (Hg).....	41
9.5.4	Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S).....	42
9.5.5	Dióxido de Carbono (CO ₂)	43
9.5.6	Concentración Hidrógeno (H ₂)	43
9.5.7	Helio (He)	44
10.	Conclusiones y Recomendaciones.....	45
10.1	Conclusiones	45
10.2	Recomendaciones	46
11.	Agradecimientos.....	47
12.	Referencias bibliográficas	48

Índice de Figuras

Figura 7.1 Mapa de Sitios de Muestreo en Zona Hidrotermal El Playón.....	17
Figura 9.1. Diagramas de Stiff para Fuente El Cashal y Apunia	22
Figura 9.2. Diagramas de Stiff para Fuente El Cashal Caliente y Agua Shuca	22
Figura 9.3. Diagramas de Stiff para Río Los Ausoles “A” y “B”	23
Figura 9.4. Diagrama de Stiff para un pozo geotérmico.....	23
Figura 9.5. Diagrama de Stiff para Fuente El Salitre.....	24
Figura 9.6. Diagrama de Piper	24
Figura 9.7. Concentraciones de Radón Disuelto en Agua.	25
Figura 9.8. Concentraciones de gas Radón	26
Figura 9.9. Cloruros y Sólidos Totales Disueltos, Fum. El Sauce	26
Figura 9.10. Cloruros y Sólidos Totales Disueltos, Fum. El Playón	27
Figura 9.11. Cloruros, Agua Shuca	27
Figura 9.12. Gráfico de sedimentación.....	30
Figura 9.13. Diagrama de Dispersión.....	31
Figura 9.14. Gráfico de Pesos del Componente.....	32
Figura 9.15. Gráfico Bigráfica.....	33
Figura 9.16. Gráfico de clasificación de muestras por ACP.....	37
Figura 9.17. Gráfico de Componentes Principales.	39
Figura 9.18. Mapas de las concentraciones de Radón y Temperatura de Suelo	40
Figura 9.19. Concentraciones de Torón (Bq/L).....	41
Figura 9.20. Concentraciones de Hg.....	42
Figura 9.21. Concentraciones de H ₂ S.....	42
Figura 9.22. Concentraciones de CO ₂	43
Figura 9.23. Concentraciones de H ₂	44
Figura 9.24. Concentraciones de He.....	44

Índice de Tablas

Tabla 6.1. Tabla de gases difusos utilizados en Geotermia.....	13
Tabla 8.1. Resultados obtenidos en el noveno muestreo.	21
Tabla 8.2. Quimismo utilizado para la caracterización de las aguas	21
Tabla 9.1. Prueba de KMO y Bartlett.....	28
Tabla 9.2. Varianza total explicada.....	29
Tabla 9.3. Componentes principales.	31
Tabla 9.4. Resultado de Predictores: Constante, Cloruros y Conductividad.....	34
Tabla 9.5. Variable dependiente CP1, predictores: Cte., Cloruros y Conductividad.....	34
Tabla 9.6. Coeficientes de variable dependiente CP1.....	35
Tabla 9.7. Resultado de predictores: Constante, Radón, pH, Temperatura.....	35
Tabla 9.8. Variable dependiente CP2 y Predictores: Constante, Radón, pH y Temperatura.....	36
Tabla 9.9. Coeficientes de la Variable dependiente CP2.....	36
Tabla 9.10: Coeficientes.....	37
Tabla 9.11: Coeficientes (Morales & Sigüenza, 2018).....	38

Índice de Ecuaciones

Ecuación 9.1	35
Ecuación 9.2	36

1. Resumen

Esta investigación consiste en el estudio del comportamiento de las concentraciones de gas Radón (^{222}Rn) y otras emisiones difusas en el área de Ahuachapán, atribuibles a fuentes de origen geotérmico, las muestras recolectadas provienen de aguas de origen geotérmico y no geotérmico para el análisis del gas Radón, así como la emisión difusa de dicho gas en suelo.

El objetivo primordial es evaluar el comportamiento del gas Radón en suelo y en agua y a su vez, la posible correlación de la concentración de gas Radón, en agua, con los parámetros fisicoquímicos analizados. Se presenta un análisis cualitativo de los gases difusos utilizados convencionalmente para la exploración geotérmica: Torón (^{220}Rn), Dióxido de Carbono (CO_2), Sulfuro de Hidrógeno (H_2S), Helio (He) e Hidrógeno (H_2). Para el caso de determinación de Radón (^{222}Rn) en agua se realizaron nueve campañas de muestreo para obtener la mayor cantidad de información posible, se muestrearon en total nueve puntos: Fumarola El Sauce, Fumarola El Playón, Fuente El Cashal, Fuente El Cashal Caliente, Apunia, Agua Shuca y Río Los Ausoles, en el cual se tomaron tres puntos (A, B y C), utilizando para ello viales de centelleo previamente preparados en el laboratorio.

Para la recolección de muestra se utilizaron técnicas sugeridas por la norma ASTM-D5072-09 (2016), según procedimientos establecidos, luego de obtener muestras de agua superficial y de vapor condensado de fumarola, se procedió al análisis con el equipo de Centelleo Líquido del Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares de la Universidad de El Salvador (CIAN-FIA-UES). Además, se estimaron los parámetros fisicoquímicos: pH, Temperatura, Cloruros, Sólidos Disueltos Totales, Oxígeno Disueltos, Conductividad y Conductancia Específica, además de esto se encontraron agrupaciones de; los cuales fueron analizados para cada punto de muestreo, tanto en agua como vapor condensado. Con los datos obtenidos se realizaron mapas de las concentraciones de Radón en agua y en suelo, así como de las otras emisiones difusas haciendo uso del programa *Surfer*. Los mapas de gases se elaboraron junto con las fallas geológicas para apreciar su comportamiento. Se realizó el análisis estadístico utilizando la metodología de Análisis de Componente Principales donde se estimaron las correlaciones entre la concentración de gas Radón y los parámetros fisicoquímicos.

Dentro de los resultados se obtuvieron concentraciones en el rango entre 2.80 a 27.75 Bq/L. Siendo la concentración más alta de 27.75 Bq/L encontrada en La fumarola **El Playón** con una $T=98$ °C en, a partir de estos resultados se aprecia la dinámica de este gas, ya que la concentración varía respecto al tiempo de medición y el sitio que se ha fijado para la toma de muestra. La variación en la concentración del Radón se debe a la litología de la zona, los flujos de agua, permeabilidad del suelo, fallas activas, y las condiciones termodinámicas: presión y temperatura.

2. Introducción

El Radón (^{222}Rn) es un elemento radioactivo producto de la desintegración del Radio (^{226}Ra) y brinda información valiosa sobre presencia de fallas geológicas activas en campos geotérmicos y a la vez, de la permeabilidad del suelo, permitiendo así la identificación de fuentes de calor y presencia de fluido geotérmico en la zona. Las emanaciones de gas Radón (^{222}Rn) se ven influenciadas por condiciones como el tipo de suelo, presión, temperatura del sitio, flujos de agua subterránea e incluso por incidencia de agua meteórica en época de invierno.

En exploración geotérmica, se ha utilizado para evaluar la presencia de fluido geotérmico en la zona ya que el Radón corresponde a gases provenientes de la fuente de calor y de la interacción con las rocas.

El interés de realizar esta investigación es evaluar la presencia de gas Radón (^{222}Rn) y otras emisiones difusas como: Torón (^{220}Rn), Dióxido de Carbono (CO_2), Sulfuro de Hidrógeno (H_2S), Helio (He) e Hidrógeno (H_2), los cuales son utilizados en exploración geotérmica por poseer, en su química y comportamiento, información importante para identificar la presencia de actividad hidrotermal en la zona. Estos elementos son medidos con técnicas de desgasificación difusa en los campos geotérmicos.

Por otra parte, el gas Radón (^{222}Rn) además de ser medido en suelo también puede cuantificarse en aguas termales, como se reportó en el estudio (Morales & Sigüenza, 2018) nueva investigación en aguas superficiales y en condensado de fumarola, con el propósito de utilizar los resultados y evaluarla como una nueva herramienta para la exploración geotérmica.

En esta investigación, además de estudiar el comportamiento de gases difusos en Ahuachapán, se evalúan las concentraciones de gas Radón y de parámetros fisicoquímicos obtenidos en muestras de aguas superficiales y vapor condensado proveniente de fumarola. Asimismo, se presenta un análisis estadístico por Componentes Principales para determinar patrones y tendencias implícitas, aportar confiabilidad a los datos y determinar la correlación entre sí.

Esta investigación aporta información importante sobre las concentraciones de los distintos gases difusos en suelo y, en el caso del Radón, en suelo y en agua; lo que enriquece los estudios anteriores en la zona y permite observar el comportamiento de este gas tan determinante en la exploración geotérmica.

3. Planteamiento del problema

El gas Radón (^{222}Rn) posee una corta vida en el ambiente, este puede viajar a través de fallas, por difusión en medio poroso o en fluidos de origen geotérmico, así como por el contacto de corrientes internas con aguas superficiales, su carácter radiactivo lo hace un gas muy móvil y poco fácil de medir, pero su origen puede estar asociado a la cámara magmática.

Para esta investigación ha sido utilizada la norma ASTM D5072-19 (2016), la cual detalla una serie de procedimientos que garantizan capturar este gas para luego ser analizado en un equipo de centelleo de líquido.

Como primer punto se define la estrategia de medición (campaña), luego se procede a preparar todos los insumos y posteriormente se hace la toma de muestra.

Con la muestra se procede al análisis en laboratorio y posteriormente de los resultados, se realizará un análisis estadístico y así poder concluir con recomendaciones acerca de los hallazgos de la campaña.

Luego de obtener resultados y compararlos se propone una metodología como una nueva técnica para clasificación de aguas de origen geotérmico considerando la Norma ASTM D5072-19 en la cuantificación analítica.

Esta investigación podría servir de antecedente para futuros estudios de investigación de radón en aguas superficiales y subterráneas que podrían validar su aplicación en la exploración geotérmica y como una nueva técnica de clasificación de gas con origen geotérmico.

4. Justificación del estudio

La investigación busca corroborar la posibilidad de medir y cuantificar la anomalía geoquímica del gas Radón (^{222}Rn) en un campo geotérmico, en aguas superficiales y en pozos geotérmicos, como insumo adicional se incluye un hallazgo en área de sismología el cual viene a relacionar el incremento de concentración de gas Radón en fallas con los movimientos telúricos, este aspecto adicional suma una serie de beneficios asociados a la medición de este curioso Gas de origen radiactivo.

Para fines de exploración resulta una herramienta novedosa debido a su relación directa con el reservorio y su fuente de calor, así como la permeabilidad que le permite manifestarse en aguas someras y manifestaciones geotérmicas tipo fumarolas o aguas de origen geotérmico, incluso mezclas.

El Gas radón (^{222}Rn) en agua no está presente en la matriz de gases medibles de carácter geotérmico en El Salvador, su estudio se limita a la tesis realizada en 2018 (Morales & Sigüenza, 2018) la cual determina y concluye que sí existe una relación directa del gas Radón (^{222}Rn) en aguas y manifestaciones geotérmicas, así como pozos geotérmicos.

Para su medición se utilizó una técnica Normada, la cual, complementada con el equipo de centelleo líquido de la facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, proporcionó resultados que ayudan a la comprobación de la teoría aquí planteada “Las manifestaciones de gas Radón (^{222}Rn) están relacionadas a emanaciones directas del reservorio de un campo geotérmico”.

Estas concentraciones de Radón medidas podrán determinar, así como los demás gases geotérmicos (Torón, CO_2 , Mg, Argón, SO_4) la presencia de un posible recurso geotérmico para realizar exploración.

La técnica utilizada no presenta riesgo para la salud humana, si se toman en cuenta las medidas de seguridad al tomarse muestras de fumarolas.

En este estudio fueron utilizadas fuentes que se encuentran dentro de un área con manifestaciones geotérmicas bien definidas, la importancia de medir Radón (^{222}Rn) como gas geotérmico se debe a que es un gas que proviene de la fuente de calor directo debido a la temperatura y composición química que lo generen.

5. Objetivos

5.1 Objetivo General:

“Investigar las concentraciones de gas Radón (^{222}Rn) y otras emisiones difusas en el área de Ahuachapán, El Salvador”.

5.2 Objetivos Específicos:

- Cuantificar la concentración de gas Radón (^{222}Rn) en muestras de agua superficial y vapor condensado proveniente de fumarola aplicando la metodología ASTM-D5072-09(2016) y la técnica de centelleo líquido.
- Elaborar mapas de contornos de Radón(^{222}Rn) y otros gases difusos con el fin de observar las anomalías en la zona.
- Analizar estadísticamente los datos obtenidos y así agrupar las fuentes que presenten relación entre sí.
- Graficar las concentraciones de Radón respecto a los otros gases y/o parámetros fisicoquímicos con el propósito de observar las variaciones de ambos parámetros respecto al tiempo.

6. Marco Teórico

6.1 Descripción Geológica del Campo Geotérmico de Ahuachapán

La cadena volcánica de El Salvador se sitúa en dirección noroeste hacia sureste del territorio, paralela a la costa. Está relacionada con la subducción de la Placa de los Cocos por debajo de la Placa del Caribe, definida por la fosa Mesoamericana. Un graben formado durante la era del Plio-Pleistoceno cruza por todo El Salvador y la cadena volcánica activa está alineada con el borde sur de ese graben. Se pueden encontrar varias fuentes termales, fumarolas y otras manifestaciones de origen hidrotermal a todo lo largo del cinturón volcánico; especialmente al oeste, donde se pueden localizar los Campos Geotérmicos de Ahuachapán y Chipilapa (Grimaldi, 2011).

El emplazamiento de éstos Campos Geotérmicos se asocia a la caldera de Concepción de Ataco, y también ha sido relacionado a edificios volcánicos como el de la Laguna Verde y el de la Laguna de las Ninfas (Grimaldi, 2011).

En la región de Ahuachapán se han identificado tres sistemas de fallas: sistema Noreste-Suroeste (NE-SO), sistema Noroeste-Sureste (NO-SE), y el sistema Nornoroeste-Sursureste (NNO-SSE). La formación del graben central se le atribuye al rápido movimiento de la Placa del Caribe en relación a la Placa de los Cocos, así como a la actividad volcánica reciente. Estos sistemas de fallas han sido identificados como el corredor principal para el transporte de fluidos en el Campo Geotérmico de Ahuachapán (Grimaldi, 2011).

La desgasificación de gases volcánicos puede ocurrir de tres formas distintas: difusión si el fluido difuso constante es proporcional al gradiente de concentración, advección que involucra el movimiento de materia resultado de la acción de una fuerza implicando un gradiente de presión y convección si se produce únicamente por medio de materiales fluidos que al calentarse aumentan su volumen, disminuye su densidad y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la parte superior y que está a menor temperatura (Grimaldi, 2011).

La medición del flujo difuso de gases a través del suelo en campos geotérmicos para fines de exploración geotérmica se ha utilizado en los últimos años a nivel mundial (Kenia, Australia, México, España, El Salvador, entre otros (Malimo, 2011)). El Radón (^{222}Rn) es uno de estos gases que se ha utilizado en exploración y es uno de los elementos radiactivos naturales que se producen en el medio ambiente a partir de la desintegración radiactiva del Radio (^{226}Rn). La concentración de gas Radón (^{222}Rn) en los respiraderos de vapor o fumarolas en los campos geotérmicos comúnmente varía en diferentes porcentajes, aunque la condensación cerca de la superficie puede dar lugar a concentraciones aún más altas (Segovia et al., 2005).

También en la roca madre se sabe de la presencia de este gas debido a la presencia de elementos radiactivos (Uranio y Torio) que durante su desintegración producen este gas, por lo tanto, las concentraciones de Uranio y Torio y los materiales del suelo determinan la cantidad de Radón producido en el mismo.

El Radón producido en el suelo migra a través del mecanismo de difusión y convección en los espacios de poros en el suelo, fracturas en las rocas y junto con zonas débiles como

cizallamiento, fallas, empuje, etc. En algunas áreas geológicas, el Radón migra largas distancias desde su lugar de origen y puede ser detectado por los registradores de partículas alfa en la superficie de la tierra. El Radón (^{222}Rn) y el Torón (^{220}Rn) generalmente se producen en cantidades aproximadamente iguales, pero este último a menudo se ignora porque su contribución a la dosis general de radiación es relativamente pequeña. La estimación del Radón en el gas del suelo se ha sugerido como una herramienta para muchas investigaciones, como la exploración de Uranio, la predicción de terremotos, el transporte de aguas subterráneas y la evaluación de los recursos geotérmicos (Malimo, 2011).

Las concentraciones anómalas del gas Radón pueden indicar en los acuíferos subterráneos y superficiales una estructura geológica y entorno geoquímico de la presencia de reservorio de las regiones bajo estudio o exploración. La intensidad del flujo de gas, su composición y la relación de isótopos de algunos de sus componentes cambian radicalmente en períodos de actividad sísmica. El levantamiento de gases en combinación con otros métodos geoquímicos, geofísicos y geológicos se puede aplicar para satisfacer una serie de necesidades de prospección geotérmica.

El agua en los depósitos de Rocas Calientes como fuente de calor está en contacto con granitos que contienen elementos radiactivos (Radionucleidos). La comunidad científica en general es consciente de este hecho, a través de los estudios de la industria geotérmica se ha logrado determinar que sus concentraciones no son de carácter dañino a la salud debido al tiempo de vida de este gas y su nivel de estabilidad.

Según estudios realizados en (Malimo, 2011) se obtuvieron resultados positivos de Radón en subsuelo así mismo los estudios de (Segovia, et al., 2005) que de igual manera obtienen concentraciones de esta anomalía geoquímica en fuentes de aguas someras. Para la obtención de Radón (^{222}Rn) en estudios exploratorios se pueden definir dos técnicas, Radón (^{222}Rn) obtenido del subsuelo y Radón presente en afluentes o manifestaciones geotermales.

6.2 Mediciones En Campos Exploratorios

Existen estudios y mediciones previas en México (Segovia, et al., 2005) que presentan resultados favorables a la correlación de Radón (^{222}Rn) con otros gases de origen geotérmico y su presencia en reservorios de temperatura moderadamente alta ($165^{\circ}\text{C} - 220^{\circ}\text{C}$).

Se ha estudiado muestras de agua de manantiales y pozos para investigar las principales características geoquímicas de aguas profundas que evalúan los recursos geotérmicos de temperatura. Las aguas con concentraciones de Radón (^{222}Rn) probablemente están relacionadas con los fluidos geotérmicos de Los Azufres. Los resultados del Radón indicaron un transporte de flujo de fluido altamente eficiente en las zonas donde se estimaron las temperaturas más altas del yacimiento. Indirectamente el Radón nos puede indicar que tan bueno es el transporte de fluidos geotérmicos desde su fuente de calor dada su corta vida en el ambiente porque se comporta similar a un trazador, pero de fuente geotérmica (Segovia, et al., 2005).

En El Salvador se tienen estudios que indican presencia de Radón (^{222}Rn) con abundancia en las zonas geotérmicas explotadas y desarrolladas, como Ahuachapán, se han realizados

mediciones en aguas superficiales, fumarolas y pozos perforados, los hallazgos refuerzan la teoría que el Radón es un indicador de presencia reservorio y sus concentración está en función del comportamiento del reservorio y las aguas subterráneas las cuales impulsan su movimiento a través de las zonas de ascenso como fallas visibles y microfracturas en el subsuelo y (Morales & Sigüenza, 2018).

6.3 Matriz De Gases Geotérmicos

El estudio de la desgasificación difusa en sistemas volcánicos es empleado para identificar los gases emanados por una fuente magmática profunda, que eventualmente son parte activa de los sistemas hidrotermales en la superficie y son liberados a la atmósfera. La desgasificación es un proceso continuo, debido a que los gases son emitidos de forma constante por todos los diferentes tipos de magma. La mayoría de los volcanes activos liberan gases con una expresión en la superficie de este fenómeno de desgasificación en forma de plumas, actividad discreta de fumarolas y la desgasificación difusa en el suelo (Grimaldi, 2011). La tabla 6.1 muestra una breve descripción de los gases difusos utilizados en estudio geotérmicos.

Tabla 6.1.Tabla de gases difusos utilizados en Geotermia.

Elemento	Símbolo	Aporte al Estudio Geotérmico y la geoquímica
Gases difusos medidos en Situ		
Radón	^{222}Rn	Lo liberan rocas sometidas a procesos relacionados con ascenso de magma (calentamiento, deformación y fracturas). Altas concentraciones en superficie permiten identificar regiones de alta permeabilidad.
Torón	^{220}Rn	Identifica áreas de alta permeabilidad y se pueden hacer estimaciones sobre la velocidad de los flujos debido a que tiene una vida media de 55.6 segundos. Ambos gases (Radón y Torón) sugieren movimiento convectivo y advectivo.
Mercurio	Hg	Asociado con estructuras volcánicas activas, por lo que proviene directamente de la desgasificación de magma. Se vaporiza en profundidad y su emisión se da desde sistemas geotérmicos activos de alta temperatura hacia la superficie, por medio de difusión a través de regiones permeables.
Dióxido de Carbono	CO_2	Utilizado en forma efectiva como trazador de desgasificación del magma debido a su baja solubilidad en fundidos de silicatos (rocas). Es una herramienta para cuantificar los cambios en la actividad geotermal en superficie.

Sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	Este gas se origina en la alteración de rocas del reservorio, o puede ser de origen magmático, en muchos sistemas es producto del pirólisis a partir de las rocas. Está en un alto contenido en vapor separado a alta temperatura.
Gases difusos medidos fuera de campo		
Helio	He	Se desplaza hacia la superficie a través de zonas donde existe permeabilidad vertical, por lo que, si se puede desplazar fácilmente por tales zonas, sugiere que proviene de fuentes profundas.
Hidrógeno	H ₂	Permite inferir direcciones de flujo ascendente, alto contenido en ambientes de alta temperatura, incrementa al incrementar ésta.
Nitrógeno	N ₂	Altas concentraciones en sistemas geotérmicos de baja temperatura, origen magmático importa únicamente en áreas de subducción, puede provenir de los gases de la atmósfera que se disuelve en aguas meteóricas.
Metano	CH ₄	Permite inferir direcciones de flujo ascendente, Puede derivarse de rocas sedimentarias cercanas a la superficie conteniendo materia orgánica.
Oxígeno	O ₂	Aporta con la búsqueda de permeabilidad de la zona
Argón	Ar	Gas noble que al ser inerte presenta evidencia de permeabilidad en la zona de estudio.
Kriptón	Kr	Al igual que el argón manifiesta la presencia de permeabilidad al no involucrarse en ningún intercambio químico.
Agua	H ₂ O	Evidencia la presencia de un posible reservorio al presentarse como vapor en muestras de gases que se extraen del terreno.

6.4 Método ASTM D5072-09 (2016) para determinación de Radón (²²²Rn) en agua

La metodología empleada para analizar Radón (²²²Rn) en agua de consumo humano es la que dicta la norma D5072-09 (2016) “*Standard Test Method for Radon in Drinking Water*” de *American Society for Testing and Materials* (ASTM) y para este estudio se utiliza la misma norma aplicada a agua superficial y vapor condensado proveniente de fumarola, debido a que la norma permite su uso para otras matrices de agua pero sugiere que se realice una validación y control de calidad de la misma, por lo tanto se realizó este procedimiento para dar confiabilidad a los datos.

6.4.1 Proceso del Centelleo Líquido

El decaimiento genera energía, y ésta es absorbida por las moléculas del solvente en el que se encuentra, lo que permite transferir la energía hacia dos solutos centelladores que deben ir disueltos en el solvente, la primera transferencia se logra a partir de la captación de la energía de radiación ionizante por el solvente trasladándola al soluto que se le denomina primario, luego éste permite la conversión de la energía ionizante a fotones de luz visible, para luego realizar la segunda transferencia hacia el otro soluto denominado secundario, éste emite los fotones con una mayor longitud de onda con el fin de adecuarla para su posterior conversión en señal eléctrica.

Estos fotones son detectados por dos tubos fotomultiplicadores (PMT), conformados por un ánodo y un cátodo cada uno de ellos, donde los dinodos que los componen permiten transformar de cada fotón una cascada de electrones, amplificando un impulso eléctrico que es lo que genera una señal captada y transformada por un convertidor analógico-digital (ADC) para ser contabilizada.

El solvente utilizado debe poseer las propiedades necesarias que permitan que el coeficiente de difusión del Radón (^{222}Rn) sea mayor que el que posee en la matriz donde se encuentra, con el fin de capturar el Radón (^{222}Rn) hasta su medición en el equipo. Los solutos más utilizados para la preparación de la solución centelladora son: 1,4-bis-2-(5-fenilo-xazolil)-benceno (POPOP) y 2,5-dieniloxazol (PPO).

6.5 Análisis Estadístico

6.5.1 Análisis Estadístico por Componentes Principales

El Análisis de Componentes Principales (ACP o PCA, por sus siglas en inglés) es uno de los métodos multivariantes más utilizados, y su atractivo radica en transformar los datos de un grupo de variables en otro de más fácil interpretación, el cual preserva, tanto como sea posible, la configuración original del grupo de valores y concentra un gran porcentaje de la variación o estructura de los datos iniciales en las primeras nuevas variables, llamadas componentes principales, obtenidas en la transformación. En este proceso de reducción de los datos se pierde inevitablemente alguna información original, pérdida que se compensa por la posibilidad de obtener una mejor interpretación de los datos reales (Cubero & Flores, 1995).

El ACP permite: Reducir la dimensionalidad (variables): perdiendo la menor cantidad de información (varianza) posible, cuando se cuenta con un gran número de variables cuantitativas posiblemente correlacionadas (indicativo de existencia de información redundante), ACP permite reducirlas a un número menor de variables transformadas (componentes principales) que expliquen gran parte de la variabilidad en los datos.

Combinación lineal: cada dimensión o componente principal generada por ACP será una combinación lineal de las variables originales, y serán además independientes o no correlacionadas entre sí.

Generalmente, se pueden obtener tantas componentes principales distintas como variables disponibles. La elección se realiza de manera que la primera componente principal sea la que mayor varianza recoja; la segunda debe recoger la máxima variabilidad no recogida por la primera, y así sucesivamente, eligiendo un número que recoja un porcentaje suficiente de varianza total. El objetivo es identificar las combinaciones lineales que mejor representan las variables. Las constantes o vectores de los componentes principales dan idea sobre el peso que tiene cada variable en cada componente.

6.5.2 Regresión Lineal Múltiple

El análisis de regresión lineal es una técnica estadística utilizada para estudiar la relación entre variables cuantitativas. Tanto en el caso de dos variables (regresión simple) como en el de más de dos variables (regresión múltiple), el análisis de regresión lineal puede utilizarse para explorar y cuantificar la relación entre una variable llamada dependiente o criterio (Y) y una o más variables llamadas independientes o predictoras (X_1, X_2, \dots, X_p), así como para desarrollar una ecuación lineal con fines predictivos (Martín, 2019).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \epsilon$$

Donde $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$, son los parámetros y el término de error ϵ es una variable aleatoria, que corresponde a la variabilidad en “y” que no puede ser explicada por el efecto lineal de variables independientes (Anderson et al., 2012).

Si existe una correlación lineal significativa entre dos variables, se deben de considerar dos hipótesis: una nula y una alternativa.

Hipótesis nula $H_0: \rho = 0$ (sin correlación)

Hipótesis alternativa $H_1: \rho \neq 0$ (correlación)

Las hipótesis utilizan el **P-valor** para representar el coeficiente de correlación lineal entre las variables. Luego de plantear las hipótesis se selecciona el nivel de significancia “ α ”, para una prueba de hipótesis formal. Siendo el valor de significancia más común el de 0.05. El valor de “t”, se utiliza para encontrar el valor de “p”, la cual permite tomar un criterio de decisión aceptar o rechazar la hipótesis nula, este criterio depende de la comparación entre el valor de significancia y el valor de P.

Valor P $\leq \alpha$: Respaldar la afirmación de una correlación lineal.

Valor P $> \alpha$: No respaldar la afirmación de una correlación lineal.

Las pruebas t además permite contrastar la hipótesis nula, si la hipótesis nula es rechazada, la prueba proporciona evidencia estadística suficiente para concluir que el parámetro es diferente de cero y que la relación individual entre la variable dependiente y la variable independiente es significativa. Un coeficiente de cero indica ausencia de relación lineal, de modo que los coeficientes significativamente distintos de cero nos informan sobre qué variables son relevantes en la ecuación de regresión (Triola, 2018).

7. Metodología

7.1 Sitios de Muestreo

Para la toma de muestras de Radón en agua, se seleccionaron 9 puntos de muestreo: dos fumarolas: El Sauce y El Playón y 7 fuentes superficiales: Apunia, Fuente El Cashal, Fuente El Cashal Caliente, Agua Shuca, Río Los Ausoles puntos A, B y C. La Figura 7.1 muestra los sitios de muestreo y las estructuras geológicas presentes en el sitio.

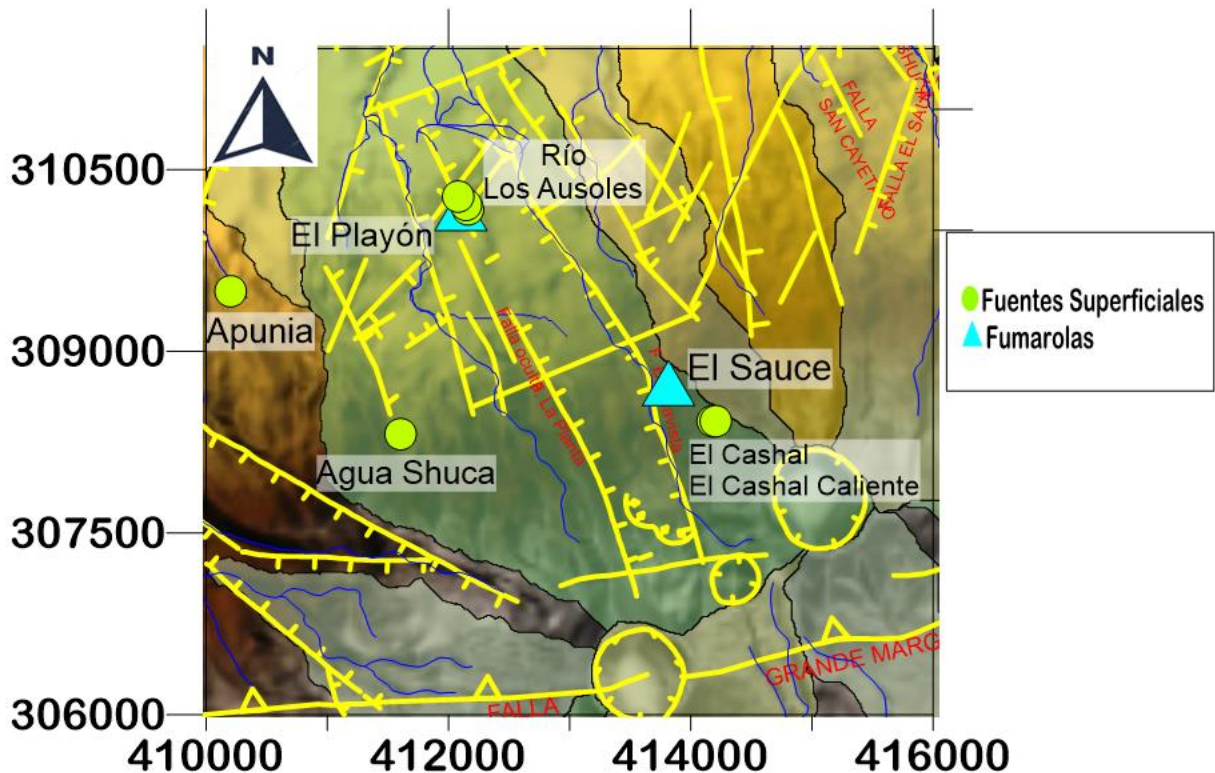


Figura 7.1 Mapa de Sitios de Muestreo en Zona Hidrotermal El Playón.

7.2 Análisis de Radón en Agua

Para la recolección de muestras de Radón en agua es necesario preparar con anticipación los viales de centelleo y el coctel centellador, el cual es el encargado de absorber la radiación incidente y producir los fotones de luz.

Para la preparación de la solución centelladora (tomando como base 1 Litro de Tolueno):

1. Se añadieron 250 ml de Tolueno, utilizada como solución orgánica del líquido centellador.

2. Se mezclaron 0.05 gramos de POPOP y 0.5 gramos de PPO por litro de solvente.
3. Se llevó a cabo la dilución de solutos centelladores en la solución de Tolueno, esto en una cámara extractora de gases.
4. Se añadieron 10 ml de la solución centelladora en cada vial de vidrio.
5. La recolección de muestras se realizó por duplicado (como es requerido por la norma) para verificar la confiabilidad de los resultados. Para la recolección de muestras en campo, la norma sugiere el uso de jeringas desechables con agujas hipodérmicas de 12 ml de capacidad con calibre 20, 38 mm; por consiguiente, se utilizaron este tipo de agujas, una distinta para cada punto de muestreo.

7.2.1 Muestreo de Vapor Condensado de Fumarola

Para muestras de vapor no fue necesario realizar ningún análisis o tratamiento de muestras in situ.

1. Se limpió el área de recolección de muestra, esto con el fin de evitar contaminación de la misma. Se conectó un embudo con una manguera especial para condensado y posteriormente se colocó el embudo en el área previamente preparada. Para ejercer mayor presión y lograr condensar el vapor de forma más rápida y efectiva, se añadió tierra seca y rocas que se encontraron en el lugar. Además, se tomó la temperatura de la fumarola haciendo uso de una termocupla.
2. Se empleó una ampolla de dos salidas de 250 ml de capacidad para condensar el vapor proveniente de fumarola, conectando la manguera a una de las salidas de la ampolla dejando la otra abierta para permitir la condensación del vapor.
3. Se colocó la ampolla en un balde con hielo (para enfriar la muestra) y se esperó a coleccionar el vapor.
4. Se introdujo la aguja hipodérmica dentro de la manguera, conectada a una de las salidas de la ampolla, para tomar 10 ml de vapor condensado, eliminando las burbujas de aire que pudiesen estar presentes y luego se depositó en el vial de centelleo previamente preparado con 10 ml de coctel.

7.2.2 Muestra de Agua Superficial

1. Se utilizó un beaker de plástico. Se introdujo el beaker en el fluido de la fuente superficial evitando burbujeo y turbulencia.

2. Se ambientó la aguja hipodérmica y luego se procedió a la toma de la muestra.
3. Se colocó la aguja en el fondo del beaker y se sustrajeron 12 ml de agua para eliminar las burbujas de aire y se dejaron exactamente los 10 ml de muestra que son requeridos por la norma.
4. Se depositó la muestra en el vial de centelleo preparado con los 10 ml de coctel.

7.3 Análisis Estadístico

7.3.1 Análisis por Componentes Principales

Para este análisis se hizo uso del programa *Statgraphics*. Los pasos para la obtención del número de componentes principales son los siguientes:

1. Se realizó una gráfica de sedimentación, la cual permite observar el número de factores que explican la mayor parte de variabilidad de los datos. Los factores mayores a 1 explican la mayor parte de variabilidad y los factores restantes explican una proporción muy pequeña de la variabilidad por lo cual no son significativos.
2. Luego se obtuvo una tabla de componentes principales la cual presenta los valores de los componentes principales para cada uno de los “n” casos. La tabla de componentes principales permite observar las variables que se agrupan en cada una de las componentes.
3. Se elaboró un diagrama de dispersión, el cual es la representación de los objetos (punto de muestreo) respecto a las dos primeras componentes principales obtenidas en el paso dos, la gráfica de dispersión representa visualmente las puntuaciones del segundo componente principal versus las puntuaciones del primer componente principal.
4. Se realizó la gráfica de los pesos del componente que es la representación de las variables (parámetros) respecto a las dos primeras componentes principales, Esta gráfica permite identificar cuáles variables tienen mayor importancia en cada componente. Las variables que se aproximan a -1 o 1 indican que la variable afecta considerablemente al componente y las variables cercanas a 0 indican que la variable tiene poca influencia en el componente.
5. Finalmente se realizó la gráfica Bigráfica la cual es la representación de los objetos y las variables respecto a las dos primeras componentes principales, la gráfica Bigráfica sobrepone la gráfica de dispersión y la gráfica de los pesos del componente.

7.3.2 Regresión lineal múltiple

El análisis de regresión lineal múltiple se realizó con el programa IBM SPSS.

1. Como primer paso se elaboró la tabla del resumen del modelo, la cual indica la proporción de la variabilidad del modelo explicado por el número de variables independientes.
2. Luego se realizó la prueba de análisis de varianza, la cual estima si la relación global entre la variable dependiente y las variables independientes es significativa, lo cual permite estimar la existencia de una correlación lineal significativa.
3. Y finalmente se elaboró la tabla de Coeficientes, la cual presenta los valores de coeficientes estandarizados, no estandarizados y la significancia, todos estos coeficientes permiten describir la ecuación lineal múltiple y la influencia que aporta cada variable independiente al modelo propuesto.

8. Análisis de datos

8.1 Datos Químicos

Se obtuvieron valores de concentraciones de gas Radón y de Parámetros Físicoquímicos, a continuación, se presentan los resultados.

8.1.1 Concentraciones De Gas Radón (^{222}Rn) y Parámetros Físicoquímicos

Se realizaron un total de 9 campañas de muestreo iniciadas en el mes de mayo del presente año, en cada muestreo se evaluaron, además de la concentración de gas Radón, los parámetros físicoquímicos de las distintas matrices de agua en estudio. La tabla 8.1 muestra los resultados de la última campaña de muestreo realizada el día 23 de octubre de 2019, los datos completos de todas las campañas de muestreo aparecen en el anexo A.

Tabla 8.1. Resultados obtenidos en el noveno muestreo.

Punto de Muestreo	Cloruros (ppm)	Conductancia ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	^{222}Rn (Bq/L)
Fuente Apunia	33.312	214	7.04	26.3	5.12
Fuente El Cashal	2.198	160.75	6.94	21.8	15.76
Fuente El Cashal Caliente	3.225	572	6.59	33.9	2.8
Río los Ausoles "B"	5.212	232.5	7.04	43.4	4.58
Fumarola El Sauce	0.871	15.83	7.27	96.3	19.73
Fumarola El Playón	1.589	5.4	6.89	98	27.75

Además, para la caracterización de las aguas es necesario conocer el quimismo de cada una de las fuentes, la tabla 8.2 muestra los parámetros (valores en ppm) utilizados para la elaboración de diagramas ternarios y de Stiff.

Tabla 8.2. Quimismo utilizado para la caracterización de las aguas.

Punto de Muestreo	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃
Fuente Apunia	11.21	25.65	6.99	7.66	25.70	93.88
Fuente El Cashal	16.90	21.25	9.28	3.55	17.53	102.45
Fuente El Cashal Caliente	28.99	70.16	15.81	3.41	988.55	162.34
Río Los Ausoles "A"	14.00	19.32	5.71	4.96	49.04	47.11
Río Los Ausoles "B"	16.97	20.40	5.85	7.82	49.61	48.42
Agua Shuca	15.96	17.40	4.52	7.736	76.11	6.42
Pozo Geotérmico	202.00	23.32	0.01	196.10	116.23	108.10
Fuente El Salitre	297.72	26.19	6.24	167.92	38.08	461.40

9. Presentación De Resultados

9.1 Caracterización De Las Aguas

Para el análisis del tipo de agua en la zona de estudio se realizaron representaciones gráficas correspondientes al diagrama ternario, diagrama de Piper y diagramas de Stiff.

Los diagramas de Stiff brindan información cualitativa del tipo de agua que se encuentra presente en el lugar, la Figura 9.1 muestra las fuentes superficiales El Cashal y Apunia, ambas son aguas bicarbonatadas cálcicas.

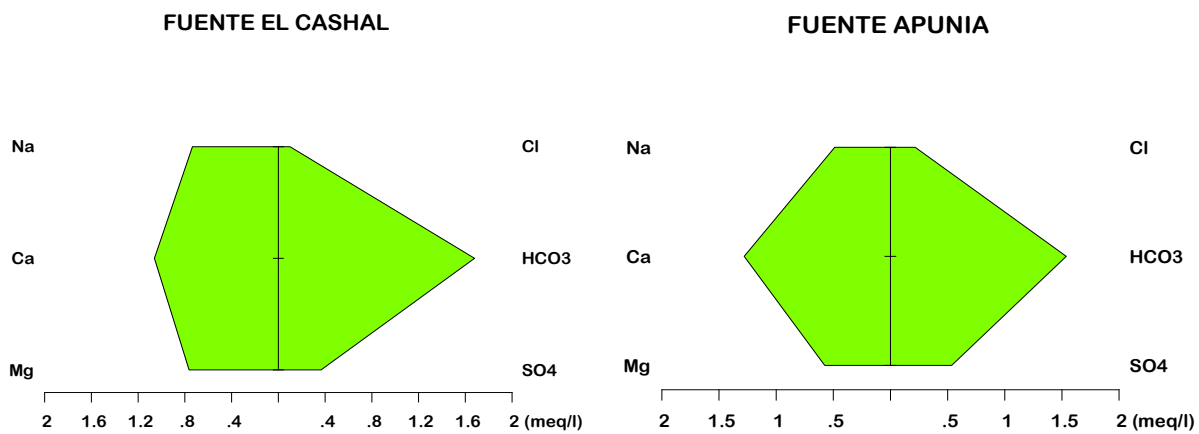


Figura 9.1. Diagramas de Stiff para Fuente El Cashal y Apunia

La Fuente El Cashal Caliente y Agua Shuca son aguas superficiales pero los diagramas de Stiff (Ver Figura 9.2) indican que son aguas sulfatadas, Agua Shuca podría considerarse Sulfatada Cálcica lo que indica que ambas fuentes tienen influencia geotérmica.

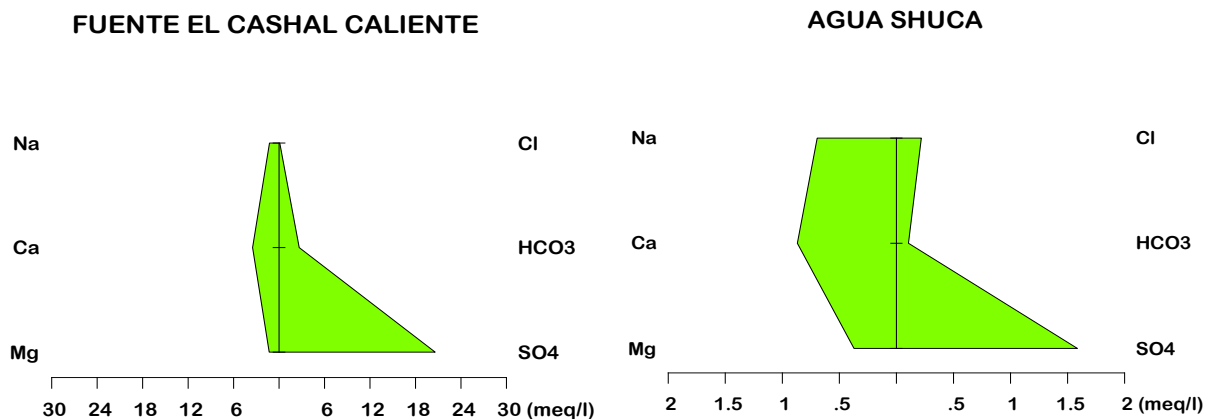


Figura 9.2. Diagramas de Stiff para Fuente El Cashal Caliente y Agua Shuca

En el Río Los Ausoles se tomaron 2 puntos de muestreo (A y B), los diagramas de la Figura 9.3 indican que son aguas sulfatadas, bicarbonatadas-cálcicas que aun cuando es una fuente superficial tiene influencia geotérmica.

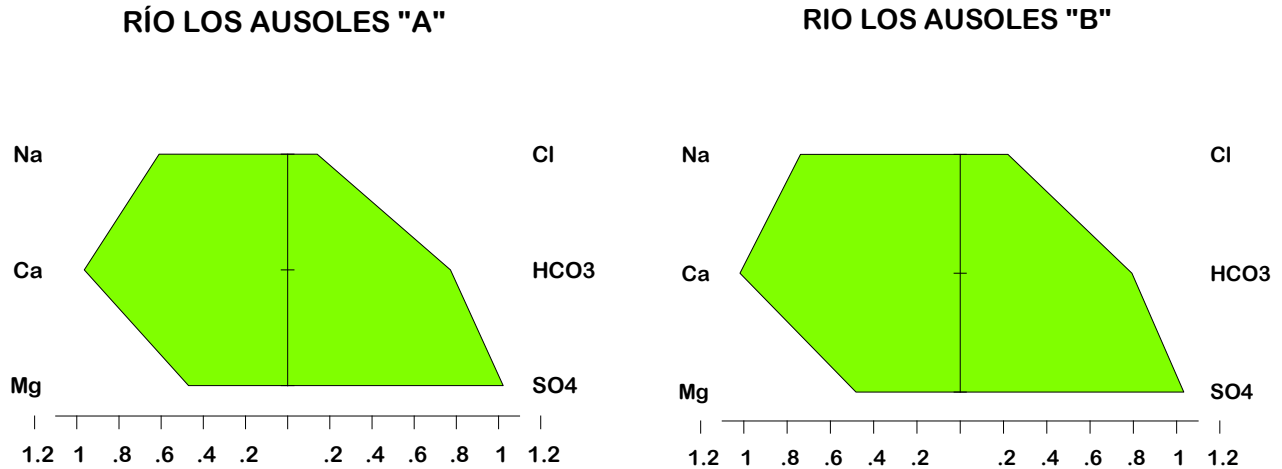


Figura 9.3. Diagramas de Stiff para Río Los Ausoles "A" y "B"

También se presenta un diagrama de Stiff (Figura 9.4) para un pozo geotérmico, el agua de este pozo tiene características distintas a las de las aguas superficiales mostrándose como agua Clorurada Sódica, propia del fluido geotérmico maduro.

POZO GEOTÉRMICO

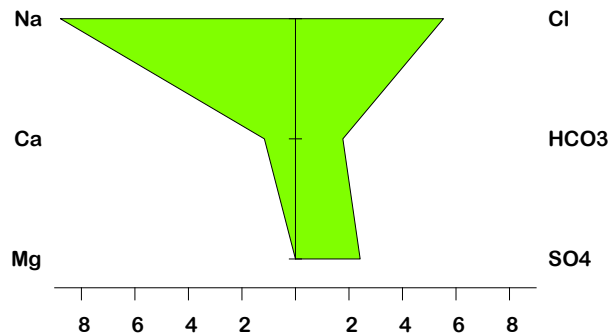


Figura 9.4. Diagrama de Stiff para un pozo geotérmico

La caracterización de la Fuente El Salitre (figura 9.5) muestra que contiene agua bicarbonatada sódica, esta fuente es superficial, pero se sabe que es parte de la zona de descarga del campo geotérmico.

EL SALITRE

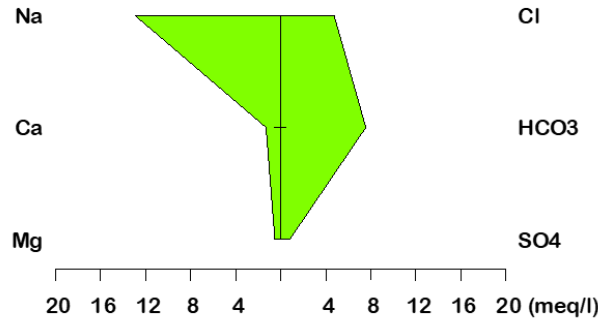


Figura 9.5. Diagrama de Stiff para Fuente El Salitre

El diagrama de Piper (Figura 9.6) está compuesto de dos triángulos con un rombo que recoge la información de ambos triángulos, evidenciando así que la Fuente El Cashal y Río Apunia son aguas bicarbonatadas, de origen completamente superficial. Agua Shuca y Fuente El Cashal Caliente son aguas sulfatadas, de origen superficial y muy comunes de un sistema geotérmico, tienen bajos valores de Cloruros comparados con los de agua geotérmica y poseen pH ácido producido por procesos secundarios someros, tales como reacción con gases que emergen desde la profundidad. El Río Los Ausoles A y B, aparecen como una mezcla entre aguas sulfatadas y bicarbonatadas. La fuente El Salitre aparece como mezcla de agua bicarbonatada con influencia de agua geotérmica, por su contenido de cloruros. El pozo geotérmico aparece como agua clorurada, correspondiente a agua madura utilizada en la explotación geotérmica.

Diagrama de Piper

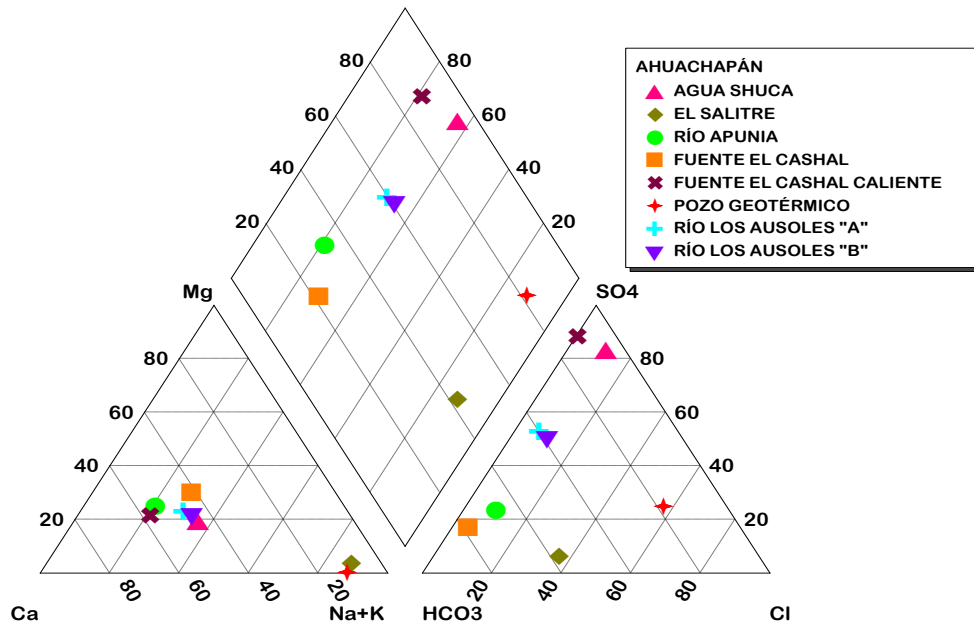


Figura 9.6. Diagrama de Piper

9.2 Radón en Agua

La Figura 9.7 presenta los resultados de las concentraciones promedio de gas Radón disuelto en las distintas matrices de agua junto con las fallas geológicas presentes en la zona. Se observa que la mayor concentración de Radón (^{222}Rn) está en las fumarolas: El Sauce y El Playón, seguido por Agua Shuca y el Río Los Ausoles; y, las fuentes El Cashal y Apunia. En las zonas de mayor concentración de Radón se aprecia la presencia de fallas geológicas que permiten el ascenso de este gas a la superficie.

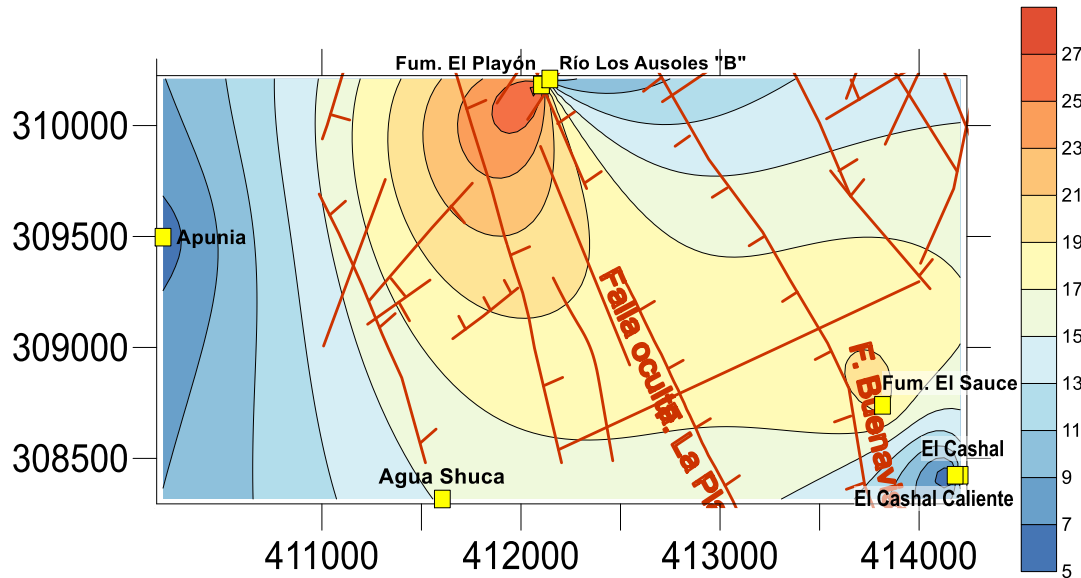


Figura 9.7. Concentraciones de Radón Disuelto en Agua.

9.3 Radón y Sismicidad

La vigilancia de gas Radón fue reconocido como una herramienta para la predicción de movimientos telúricos o terremotos, la corteza terrestre antes de un sismo provoca cambios en el transporte de gas y el aumento de los componentes volátiles profundos procedentes de la cámara magmática, se espera que los cambios de tensión que ocurren dentro de la superficie terrestre durante un terremoto generen un aumento en la concentración de gas Radón en el suelo; además, la actividad sísmica, en el flujo del fluido subterráneo factores que pueden explicar los cambios anómalos en la concentración de gas Radón (Khattak, et al., 2011).

Un hallazgo importante en esta investigación es la presencia de una anomalía en las concentraciones de Radón en la fumarola El Sauce, fumarola El Playón y Agua Shuca antes de un evento sísmico de 5.9 grados, en la escala de Richter, ocurrido en El Salvador el 16 de mayo de 2019, en el cuarto muestreo que se realizó el 14 de mayo, dos días antes del sismo. La Figura 9.8 muestra los datos de concentraciones de Radón de los 9 muestreos en la cual se aprecia la anomalía mencionada.

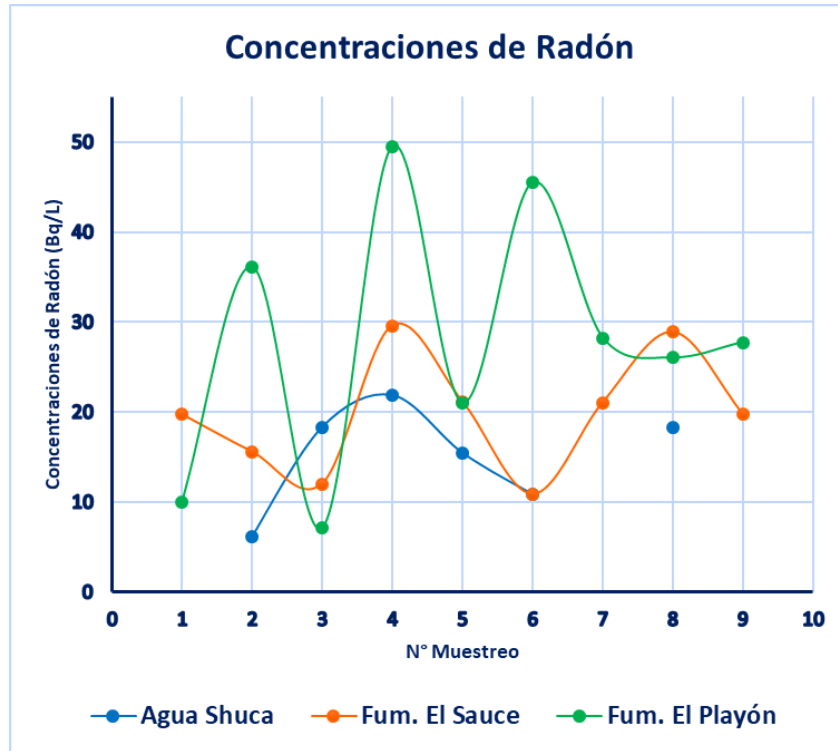


Figura 9.8. Concentraciones de gas Radón

Por otra parte, en la Fumarola El Sauce, los primeros cuatro muestreos presentan una relación directa en el comportamiento de las concentraciones de Radón-Cloruros y Radón-Sólidos Totales Disueltos, en los siguientes muestreos (del 5 al 8) se observa una relación inversa entre los mismos parámetros. El cuarto muestreo presentó una anomalía significativa en las concentraciones de Radón, Cloruros y Sólidos Totales Disueltos (Ver Figura 9.9).

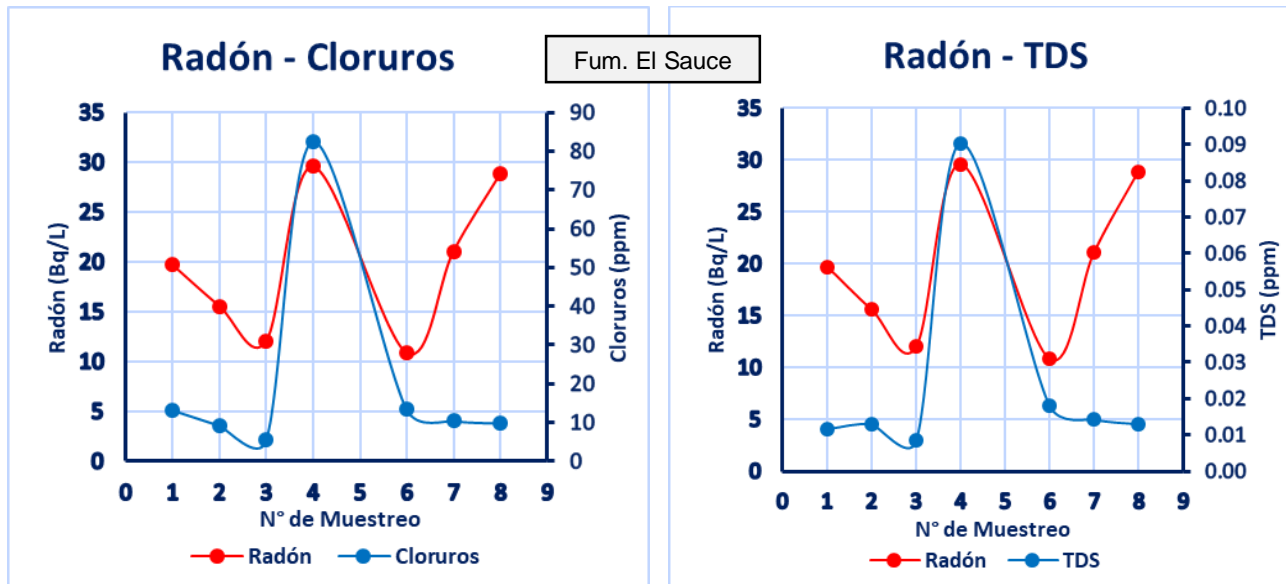


Figura 9.9. Cloruros y Sólidos Totales Disueltos, Fum. El Sauce

La fumarola El Playón presentó anomalías en el cuarto y sexto muestreo. En el sexto muestreo, también hubo un sismo dos días después, evidenciando un incremento en la concentración de Radón, Cloruros y Sólidos Totales Disueltos (Ver Figura 9.10).

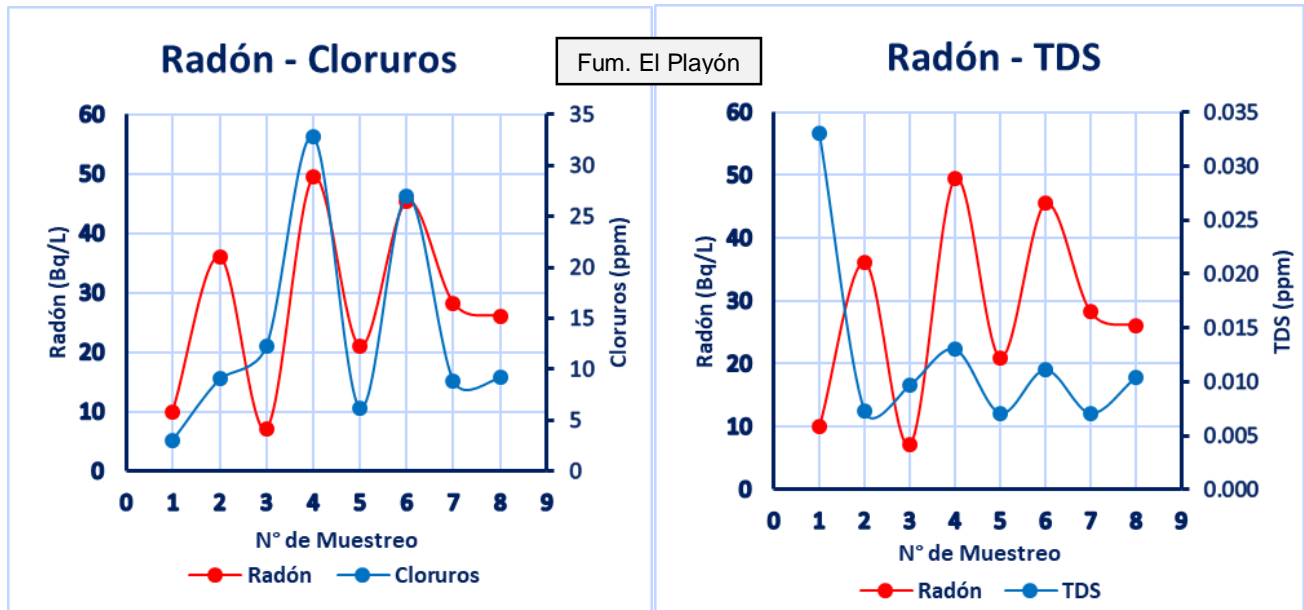


Figura 9.10. Cloruros y Sólidos Totales Disueltos, Fum. El Playón

Agua Shuca muestra un incremento en la concentración de Radón y Cloruros el día 14 de mayo (4 de mayo) (Ver Figura 9.11).

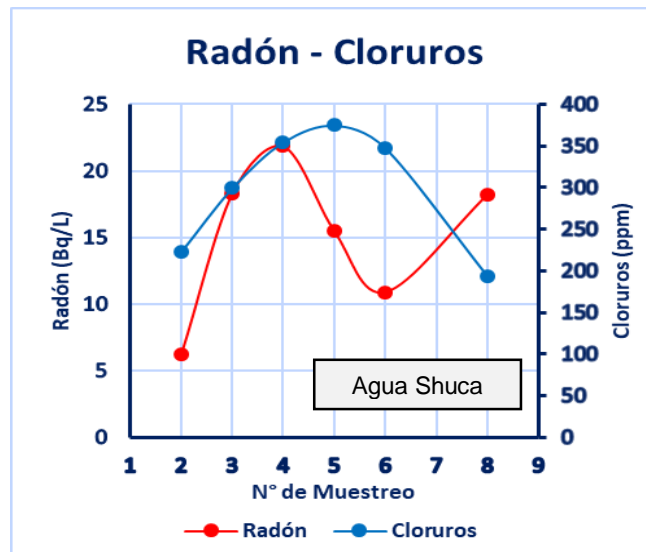


Figura 9.11. Cloruros, Agua Shuca

Lo interesante de estos resultados es que todas las fuentes, en las que se presentó la anomalía en la concentración de Radón, tienen influencia hidrotermal y conexión con el fluido geotérmico. El aumento en las concentraciones de Radón, Cloruros y Sólidos Totales Disueltos puede deberse a las estructuras geológicas presentes en la zona que permiten un mayor ascenso de fluidos previos a un evento sísmico.

9.4 Análisis Estadístico

9.4.1 Análisis Por Componentes Principales

El análisis de componentes principales se realizó para un total de 52 datos obtenidos de los 9 puntos de muestreo, de los cuales se evaluaron 8 parámetros: Concentraciones de gas Radón (^{222}Rn), pH, Temperatura, Oxígeno Disuelto, Cloruros, Conductividad, Conductancia Específica y Sólidos Totales Disueltos. Con excepción del muestreo 9 que además de las concentraciones de Radón, se evaluó: pH, Temperatura, Cloruros y Conductividad.

Para aplicar la técnica ACP se deben realizar pruebas para validar el uso de la misma, como la prueba KMO y la prueba de esfericidad de Bartlett.

9.4.1.1 Prueba de KMO y Bartlett

La tabla 9.1 muestra una medida Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación muestral de **0.807**, lo cual indica una buena adecuación muestral del conjunto de datos, por tal motivo es aceptable el ACP. Asimismo, la prueba de esfericidad de Bartlett es de **0.000**, el cual es menor a la significancia (0.05), por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa (el ACP tiene sentido), lo que indica que las variables están suficientemente correlacionadas entre sí y que tiene sentido realizar el análisis de componentes principales al set de datos.

Tabla 9.1. Prueba de KMO y Bartlett.

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		0.807
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado	683.839
	Gl	28.00
	Sig.	0.000

9.4.1.2 Proporción de Varianza Explicada

Los eigenvalores o autovalores son cantidades que expresan la varianza total que está explicada por cada componente y los porcentajes de varianza explicada asociadas también a cada componente. La tabla 9.2 muestra el número de componentes principales, los autovalores, el porcentaje de varianza y el porcentaje acumulado, pero solo se obtuvieron tres autovalores mayores que 1, los cuales corresponden al componente 1 el cual explica el 56.62% de la

variabilidad, el componente 2 explica el 23.46% de la variabilidad de los datos y finalmente el componente 3 explica el 12.55%. Por lo que el procedimiento extrae tres componentes principales las cuales permiten explicar un 92.63% de la varianza del conjunto de datos.

Tabla 9.2. Varianza total explicada.

COMPONENTE	AUTOVALORES INICIALES		
	Total	% de varianza	% Acum.
1	4.53	56.618	56.618
2	1.88	23.458	80.076
3	1.00	12.552	92.628
4	0.39	4.829	97.457
5	0.13	1.580	99.037
6	0.06	0.807	99.844
7	0.01	0.131	99.975
8	0.00	0.025	100.000

9.4.1.3 Gráfica de Sedimentación

La gráfica de sedimentación presentada en la Figura 9.12 muestra los autovalores versus el número de componentes. La gráfica de sedimentación ordena los autovalores desde el más grande hasta el más pequeño, en la figura presentada se observan la cantidad de tres autovalores mayores que uno, lo cual indica que hay tres componentes principales que explican la mayor parte de variabilidad total en los datos (dada por los autovalores).

Gráfica de Sedimentación

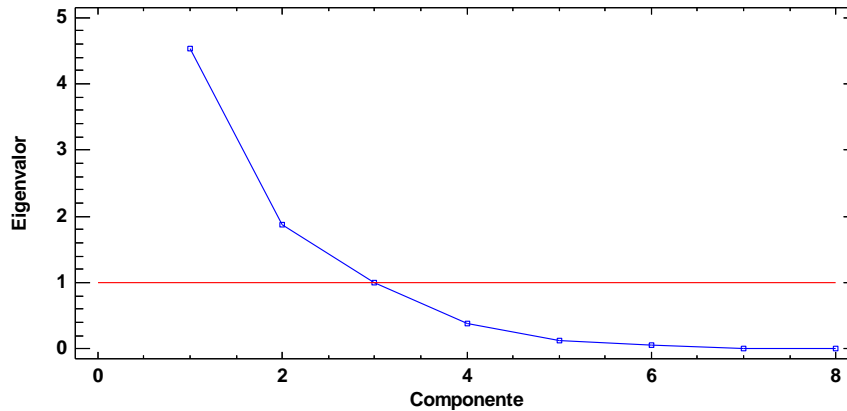


Figura 9.12. Gráfico de sedimentación.

9.4.1.4 Tabla de Pesos de los Componentes

La tabla 9.3 muestra los valores estimados de los parámetros para cada una de las componentes extraídas, los valores al interior de cada columna frecuentemente tienen interpretaciones interesantes. Al observar la tabla de componentes, la primera componente presenta valores absolutos altos en cuatro parámetros los: Conductividad (0.45), Sólidos Totales Disueltos (0.45), Conductancia Específica (0.45) y Cloruros (0.42); por lo cual, se puede inferir que estos están relacionados entre sí y además con la primera componente principal. La segunda componente tiene ponderaciones altas en tres parámetros: pH (0.45), temperatura (-0.63) y concentración de Radón (^{222}Rn), lo que significa que la temperatura y la concentración de Radón (^{222}Rn), están correlacionadas inversamente con el pH y además los tres parámetros están correlacionados con la componente principal dos. Finalmente, la componente tres está correlacionada únicamente con el Oxígeno Disuelto (0.99), su correlación es muy alta por lo cual la componente tres describe perfectamente el comportamiento de las concentraciones de Oxígeno Disuelto.

Las primeras dos componentes principales explican un 80.076%, por lo cual se plantean los diagramas para las dos primeras componentes.

Tabla 9.3. Componentes principales.

	COMPONENTE		
	1	2	3
Temperatura	-0.12	-0.63	0.01
pH	-0.34	0.45	0.10
Conductividad	0.47	0.04	0.02
Conductancia Específica (SPC)	0.47	0.02	0.03
Sólidos Totales Disueltos (TDS)	0.47	0.04	0.02
Oxígeno Disuelto (DO)	-0.02	-0.06	0.99
Cloruros (Cl)	0.45	-0.09	0.04
Concentración de Radón (Rn)	-0.12	-0.62	-0.03

9.4.1.5 Diagrama de Dispersión

La figura 9.13 presenta el conjunto de puntos muestreados distribuidos en las primeras dos componentes principales, se observan agrupaciones que obedecen a diferentes fenómenos, en el cuadrante dos se tienen todos los puntos de la fuente Apunia, Fuente El Cashal y algunos valores de la Fuente El Cashal Caliente y el Río Los Ausoles “B”, en el cuadrante uno se tienen los puntos restantes de estas últimas fuentes, estos puntos restantes son, en su mayoría, los obtenidos en la fuente El Cashal Caliente y el Río Los Ausoles “B”. Los puntos que están en el cuadrante cuatro son las fuentes superficiales con mezcla de vapor geotérmico (Agua Shuca) y cuadrante tres contiene los puntos obtenidos de las fumarolas.

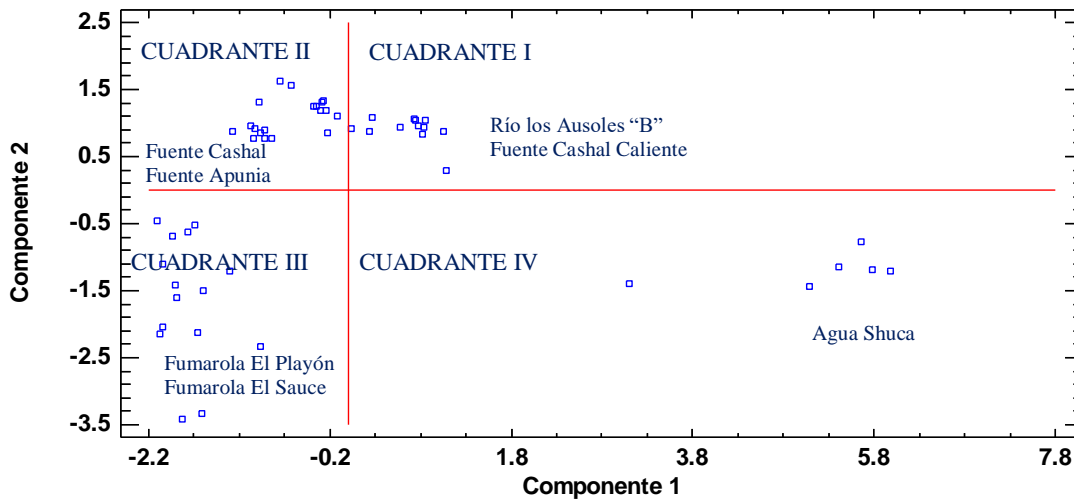


Figura 9.13. Diagrama de Dispersión.

9.4.1.6 Grafica de Pesos de Componentes

En la Figura 9.14 presenta la gráfica de los valores obtenidos (vectores) para cada uno de los parámetros analizados en las primeras dos componentes principales. La primera componente se observa que está correlacionada con la Conductividad, Cloruros, Sólidos Totales y Conductancia Específica, la segunda componente principal está correlacionada con el pH de forma directa y con la concentración de Radón y Temperatura de forma inversa. El Oxígeno Disuelto no está correlacionado con ninguna de las dos primeras componentes, por ello, se observa su comportamiento anómalo en la gráfica de pesos del componente.

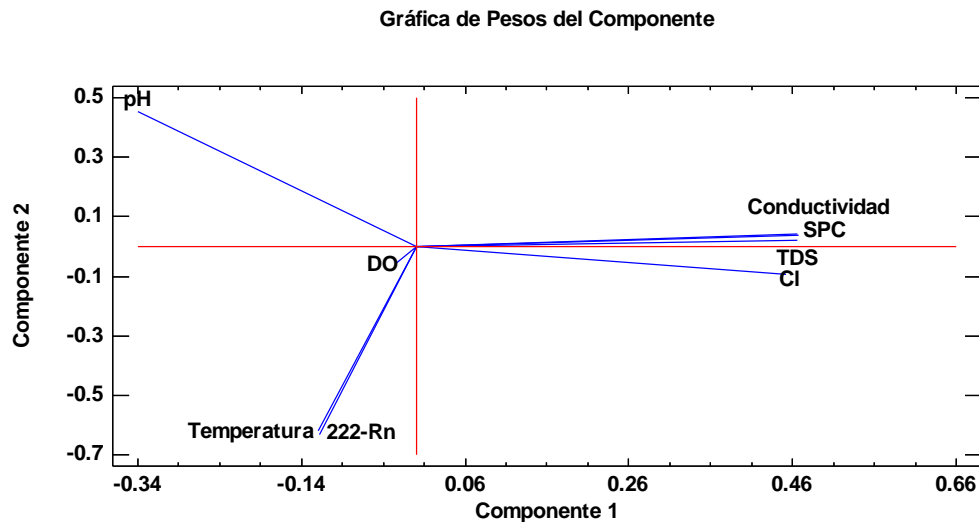


Figura 9.14. Gráfico de Pesos del Componente.

9.4.1.7 Grafica Bigráfica

La Figura 9.15 muestra los valores del diagrama de dispersión y los vectores de los pesos de las componentes, al observar los puntos y sus agrupaciones se aprecia que las fuentes superficiales con temperaturas frías (entre 20 y 30°C) y sin influencia geotérmica están agrupadas en el cuadrante dos, las fumarolas están agrupadas en el cuadrante tres, en el cuadrante uno se encuentran las fuentes superficiales que tiene mezcla con aguas geotérmicas y finalmente la fuente superficial Agua Shuca, la cual es una mezcla de aguas superficiales con vapor geotérmico, se encuentra ubicada en el cuadrante cuatro.

Bigráfica

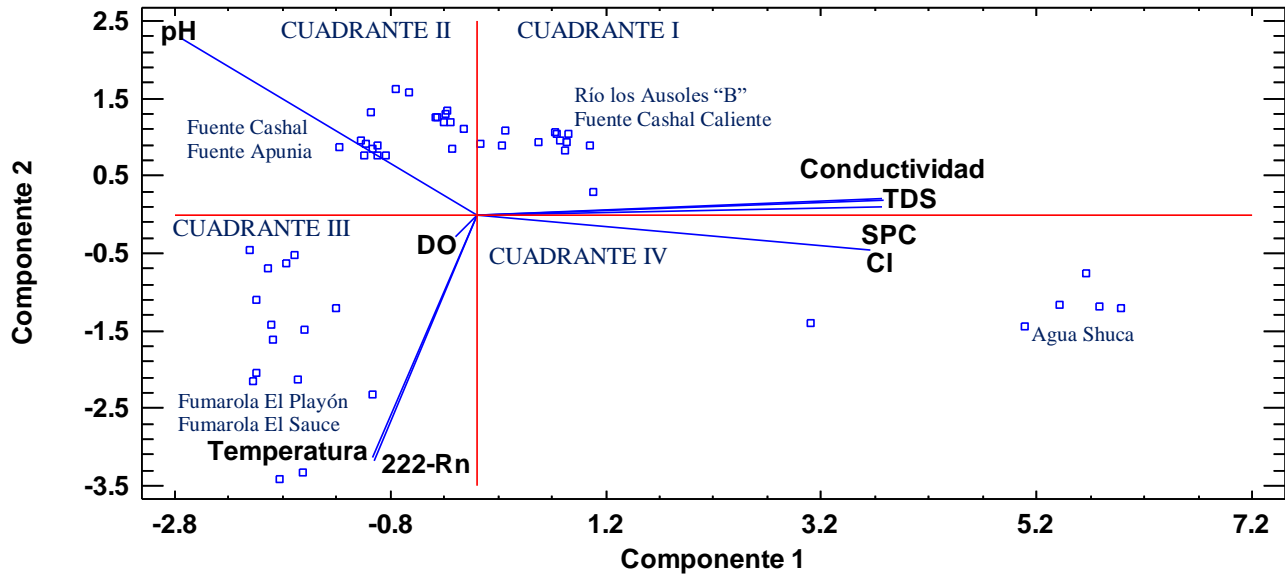


Figura 9.15. Gráfico Bigráfica.

El análisis de Componentes principales permite observar el comportamiento de las aguas, sus agrupaciones, sus relaciones y a la vez las evoluciones que éstas experimentan a través del tiempo. Las componentes uno y dos podrían ser utilizadas para una clasificación de los diferentes tipos de aguas, esta clasificación es diferente a las que se utilizan comúnmente porque utilizan la concentración de Radón como parámetro de clasificación. A continuación, se hace uso de la técnica de regresión lineal múltiple con los siguientes parámetros: Concentración de Radón, Temperatura y pH en la componente uno, Cloruros y Conductividad en la componente dos, esto con el fin de clasificar y reducir el número de parámetros a evaluar.

9.4.2 Regresión Lineal Múltiple Para Componente Uno

Se comienza el análisis de regresión lineal múltiple con la componente uno. La primera componente principal se describe respecto a dos parámetros: Cloruros y Conductividad, con estos dos parámetros se intentará explicar la componente uno. Se tomará el nivel de significancia de 0.01 para cada una de las pruebas T y F.

La tabla 9.4 muestra los valores de coeficiente de correlación R, R^2 , R^2 ajustado y el error estándar de la estimación. El coeficiente de determinación obtenido en el modelo es $R^2 = 0.991$, el valor obtenido indica que la proporción de variabilidad de la componente principal uno explicado por el modelo de dos variables independientes: Cloruros y Conductividad explica el 99.10%.

Tabla 9.4. Resultado de Predictores: Constante, Cloruros y Conductividad.

MODELO	R	R ²	R ² AJUSTADO	ERROR ESTÁNDAR DE LA ESTIMACIÓN
1.00	.996 ^a	0.991	0.991	0.204

9.4.2.1 Prueba de Análisis de La Varianza

La prueba F es una prueba que plantea la hipótesis nula que los parámetros del modelo son iguales a cero, mientras que la hipótesis alternativa afirma que uno o más de los parámetros son distintos de cero: $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 0$ $H_a =$ Al menos uno de los $\beta_p \neq 0$, si se acepta la hipótesis alternativa, se concluye que la relación global entre la variable dependiente y las variables independientes es significativa. Por lo cual sí existe una correlación lineal significativa. Los resultados obtenidos en la tabla 9.5 muestran un valor de 0.000 para P-valor de la prueba F, el cual es menor que el nivel de significancia planteado (0.01), por lo cual se rechaza la hipótesis nula H_0 . Se concluye que la relación global entre la concentración de Radón (²²²Rn) y las variables independientes es significativa. Por lo cual sí existe una correlación lineal significativa.

Tabla 9.5. Variable dependiente CP1, predictores: Cte., Cloruros y Conductividad.

MODELO		SUMA DE CUADRADOS	gl	MEDIA CUADRÁTICA	F	SIG.
1	Regresión	228.957	2.00	114.478	2742.300	.000 ^b
	Residuo	2.046	49.00	.042		
	Total	231.002	51.00			

9.4.2.2 Pruebas de Significancia

Las pruebas t permiten contrastar la hipótesis nula, si la hipótesis nula es rechazada, la prueba proporciona evidencia estadística suficiente para concluir que el parámetro es diferente de cero y que la relación individual entre la variable dependiente y la variable independiente es significativa. Un coeficiente de cero indica ausencia de relación lineal, de modo que los coeficientes significativamente distintos de cero nos informan sobre qué variables son relevantes en la ecuación de regresión (Triola, 2018).

Los coeficientes no estandarizados son los valores constantes que acompañan a cada parámetro y los coeficientes estandarizados son coeficientes que proporcionan una pista muy útil sobre la importancia relativa de cada variable independiente en la ecuación de regresión. En general, una variable tiene tanto más peso (importancia) en la ecuación de regresión cuanto mayor (en valor absoluto) es su coeficiente de regresión estandarizado (Pardo & Ruíz, 2005).

La tabla 9.6, presenta los valores obtenidos de los coeficientes no estandarizados, coeficientes estandarizados y el nivel de significancia obtenidos, al observar los coeficientes estandarizados

se visualiza que la conductividad es el parámetro que tiene mayor influencia seguido de los cloruros, además ambos parámetros tienen un P-valor menor que la significancia, por lo cual estas dos variables describen a la primera componente.

Tabla 9.6. Coeficientes de variable dependiente CP1.

MODELO	COEFICIENTES NO ESTANDARIZADOS		COEFICIENTES ESTANDARIZADOS	T	SIG.	
	B	Error estándar	Beta			
1	(Constante)	-1.929	0.039		-49.3	0.000
	Conductividad	0.006	0.001	0.282	-7.45	0.000
	Cloruros	0.004	0.000	0.727	19.22	0.000

Los coeficientes no estandarizados son los valores que acompañan a los parámetros evaluados, a partir de los coeficientes obtenidos en los resultados de regresión lineal múltiple, se establece la ecuación 9.1 para describir a la primera componente con respecto a los Cloruros y Conductividad:

Ecuación 9.1 $CP1 = -1.929 + 0.006 (Cl) + 0.004 (conductividad)$

Se realiza el mismo análisis para describir la segunda componente principal con respecto a los parámetros de Temperatura, pH y la concentración de Radón.

9.4.3 Regresión Lineal Múltiple Para Componente Dos

La componente dos se realiza respecto a tres parámetros: Temperatura, pH y la concentración de Radón. Se utiliza el mismo nivel de significancia de 0.01 para cada una de las pruebas T y F. La tabla 9.7 muestra los valores de coeficiente de correlación R, R², R² ajustado y error estándar de la estimación. El coeficiente de determinación obtenido en el modelo es R²= **0.998**, el valor obtenido indica que la proporción de variabilidad de la componente principal dos explicado por el modelo de tres variables independientes explica el 99.80%.

Tabla 9.7. Resultado de predictores: Constante, Radón, pH, Temperatura.

MODELO	R	R ²	R ² AJUSTADO	ERROR ESTÁNDAR DE LA ESTIMACIÓN
1.00	.999 ^a	0.998	0.998	0.06596

9.4.3.1 Prueba de Análisis de La Varianza

Los resultados obtenidos en la tabla 9.8 muestran un valor de 0.000 para el P-valor de la prueba F, el cual es menor que el nivel de significancia planteado (0.01), por lo cual se rechaza la hipótesis nula H₀. Se concluye que la relación global entre la concentración de Radón (²²²Rn) y las variables independientes es significativa. Por lo cual sí existe una correlación lineal significativa.

Tabla 9.8. Variable dependiente CP2 y Predictores: Constante, Radón, pH y Temperatura.

MODELO		SUMA DE CUADRADOS	gl	MEDIA CUADRÁTICA	F	SIG.
1	Regresión	95.498	3.00	31.833	7316.484	.000
	Residuo	0.209	48.00	.004		
	Total	95.707	51.00			

9.4.3.2 Pruebas de Significancia

La tabla 9.9, presenta los valores obtenidos de los coeficientes no estandarizados, coeficientes estandarizados y el nivel de significancia, al observar los coeficientes estandarizados indica que la temperatura es el parámetro que tiene mayor influencia en la componente principal seguida por la concentración de Radón y el pH, además los tres parámetros tienen un P-valor menor que la significancia, por lo cual estas tres variables describen a la segunda componente.

Tabla 9.9. Coeficientes de la Variable dependiente CP2.

MODELO		COEFICIENTES NO ESTANDARIZADOS		COEFICIENTES ESTANDARIZADOS	T	SIG.
		B	Error estándar	Beta		
1	(Constante)	-1.557	0.087		-18.0	0.000
	pH	-0.021	0.000	-0.471	-54.1	0.000
	Temperatura	-0.612	0.014	0.322	44.7	0.000
	Radón	-0.61	0.001	-0.461	-53.5	0.000

Los coeficientes no estandarizados son los valores que acompañarán a los parámetros evaluados, a partir de los coeficientes obtenidos en los resultados de regresión lineal múltiple, se establece la ecuación para describir a la segunda componente con respecto a los parámetros temperatura, pH y concentración de Radón:

Ecuación 9.2
$$CP2 = -1.557 + 0.612(pH) - 0.061(Rn) - 0.021(Temperatura)$$

Con las ecuaciones obtenidas tanto para la primera componente principal como para la segunda, se puede utilizar para predecir una clasificación de las aguas dependiendo del cuadrante en que se ubique los puntos de muestreo.

9.4.4 Clasificación de las Aguas con Análisis de Componentes Principales

Se evaluaron los valores de concentración de Radón, Temperatura, pH, Cloruros y Conductividad para una última campaña de muestreos realizado el día 23 de noviembre del año 2019, en la cual se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 8.1. Luego se ingresaron los valores de los parámetros en las fórmulas de las componentes uno y dos obtenidas a través de las ecuaciones 9.1 y 9.2, la tabla 9.10 muestra los resultados de estos cálculos.

Tabla 9.10: Coeficientes.

Punto de Muestreo	CP1	CP2
Fumarola El Sauce	-1.860454	-0.33359
Fuente El Cashal	0.37835	1.59338
Fuente El Cashal Caliente	-1.272812	1.27112
Fuente Apunia	-0.873128	1.88686
Fumarola El Playón	-1.897866	-1.09107
Río los Ausoles "B"	-0.967728	1.5607

Se graficaron los valores de la componente uno y dos, siendo los valores de la componente dos la variable dependiente y la componente uno la variable independiente, la figura 9.16 presenta los puntos obtenidos, en los cuadrantes uno y dos están las fuentes Apunia, Fuente El Cashal, Fuente El Cashal Caliente, Río los Ausoles "B" y en el cuadrante tres se encuentran las fumarolas El Sauce y El Playón.

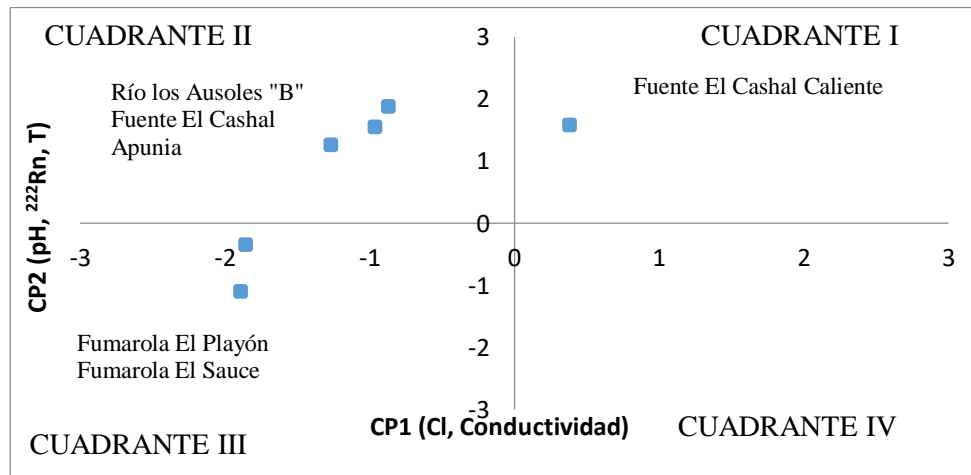


Figura 9.16. Gráfico de clasificación de muestras por ACP.

9.4.4.1 COMPARACIÓN DE METODOLOGÍA ASTM D5072-09 (1Lt) vs ASTM D5072-09 (2016) (10ml)

La metodología ASTM D5072-09 (2016) sugiere el uso de viales de vidrio para centelleo líquido con capacidad de 20 ml, colectando así una muestra de agua de 10 ml y 10 ml de solución centelladora. En el marco del Diplomado en Geotermia para América Latina edición 2018, se llevó a cabo una investigación (Morales & Sigüenza, 2018), en la cual obtuvieron resultados de concentraciones de Radón (^{222}Rn), Cloruros, pH, Conductividad y Temperatura. En dicha investigación se utilizó una metodología de colección de muestra de 1 Litro, el objetivo es comparar estadísticamente los resultados obtenidos con las muestras de 10 ml versus las de 1 Litro.

Haciendo uso de las ecuaciones las ecuaciones 9.1 y 9.2, se puede estimar la caracterización de las aguas con los parámetros: Radón, pH y Temperatura (en el eje "Y") y Cloruros y Conductividad (en el eje "X"). Esta caracterización podría ser una nueva metodología de clasificación de las aguas teniendo como parámetro la concentración de Radón, algo que nunca se utiliza actualmente. La tabla 9.11 muestra los sitios de muestreo y los valores de concentración de Radón obtenidos por (Morales & Sigüenza, 2018):

Tabla 9.11: Coeficientes (Morales & Sigüenza, 2018)

Sitio de Muestreo	Concentración de Radón (Bq/L)
El Salitre Parte Alta	14.61
La Labor	1.02
Agua Shuca, Sin Nacimiento Empozada	10.97
El Playón Punto Frío Arriba	2.31
El Playón Punto Caliente Arriba	10.10
El Playón Punto Frío Abajo	0.61
La Labor	0.83
El Playón Punto Frío Arriba	0.54
El Playón Punto Frío Abajo	1.85
Aguas Termales St	6.95
Agua Shuca	20.72
Agua Shuca Nuevo Punto Frío	2.30
Apunia	8.75
El Playón Punto Caliente Arriba	10.64
El Playón Punto Frío Abajo	0.55

La figura 9.17 muestra los valores obtenidos al realizar en análisis de componentes principales, observamos valores en los cuadrantes I, II y IV, donde los valores en el cuadrante uno son los puntos (muestreos) de fuentes superficiales mezcladas con aguas geotérmicas, los puntos del cuadrante dos son los puntos de las aguas superficiales sin influencia geotérmica, los puntos del cuadrante cuatro son los puntos de aguas superficiales mezclados con vapor geotérmico. El Cuadrante uno contiene las fuentes superficiales: La Labor, El Playón y Agua Shuca, las cuales poseen influencia de agua geotérmica. En este cuadrante, entre más alejado del origen

se encuentre un punto se infiere que tiene mayor influencia de agua geotérmica, en este caso, se observa un punto alejado de los demás, que corresponde a la fuente El Salitre, la cual es una fuente superficial que tiene influencia de agua geotérmica, ya que está comprobado por diferentes autores que es la descarga del campo geotérmico.

En el cuadrante dos están los valores de las fuentes superficiales: fuente Apunia y Agua Shuca, sin nacimiento empozada las cuales no presentan influencia geotérmica.

En el cuadrante tres deberían de aparecer las fumarolas, en este caso no se tienen datos fumarólicos por lo tanto no aparecen en el cuadrante.

Finalmente, en el cuadrante cuatro se tienen diferentes puntos de muestreo donde los valores que están más cerca al cuadrante tres (fumarolas) son lo que presentan mayor influencia de vapor geotérmico, lo cual indica que el aporte de vapor es apreciable y el punto más alejado del conjunto de datos y del origen es donde hay menor influencia de vapor (Agua Shuca).

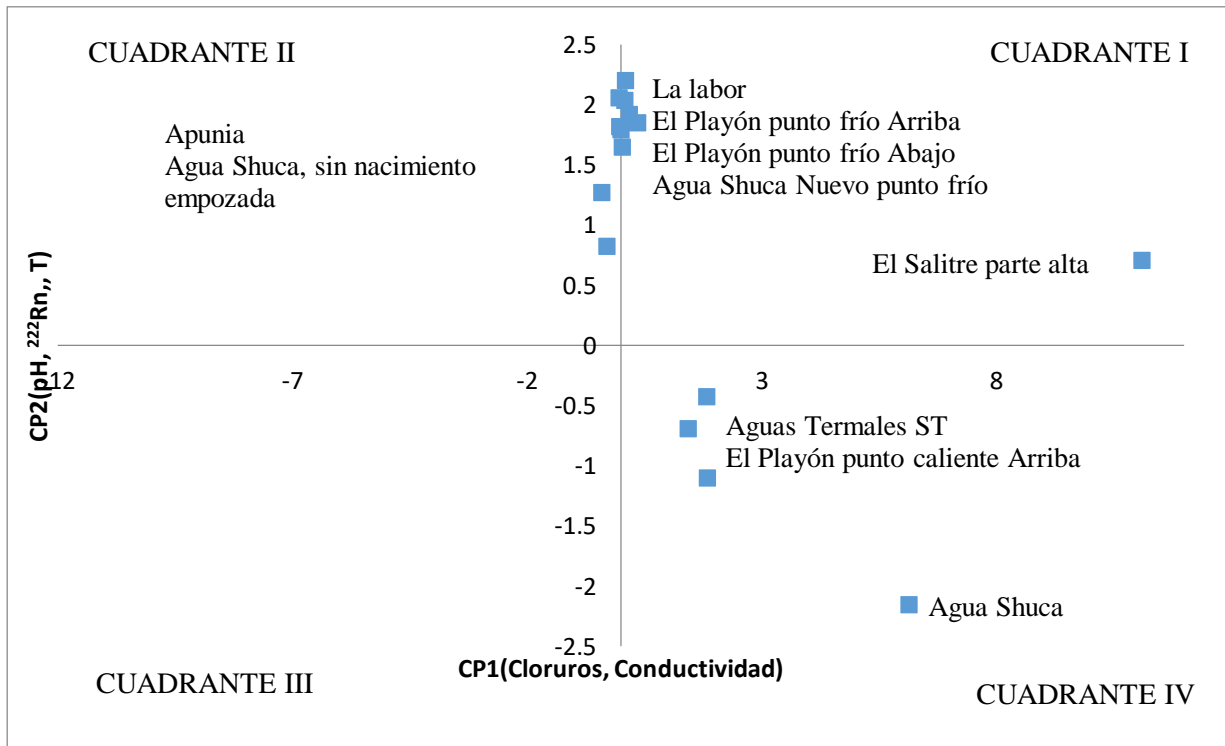


Figura 9.17. Gráfico de Componentes Principales.

9.5 Gases Difusos

Los gases difusos aportan información valiosa sobre la zona hidrotermal en estudio. Se presentan mapas de contornos de concentraciones de: Radón (^{222}Rn), Torón (^{226}Rn), Mercurio (Hg), Sulfuro de Hidrógeno (H_2S), Dióxido de Carbono (CO_2), Hidrógeno (H_2) y Helio (He), estos mapas corresponden a la zona de El Playón y fueron elaborados con información tomada de la investigación “**Estudio de Desgasificación de origen volcánica de las fumarolas del Campo Geotérmico de Ahuachapán, Ahuachapán**” (Grimaldi, 2011).

9.5.1 Radón (^{222}Rn) y Temperatura de Suelo ($^{\circ}\text{C}$)

El mapa de concentración de gas Radón (Figura 9.18), presenta los valores más altos en la zona céntrica comprendida entre ambas fallas geológicas, alcanzando valores arriba de los 18 Bq/L. El sector relatado con mayor concentración puede interpretarse como una salida de gases, ya sea fractura o contacto geológico; que además se relaciona con permeabilidad de las rocas. El Radón se asocia con movimiento convectivo y advectivo de un sistema, es decir sistemas donde se está dando un ascenso de flujo.

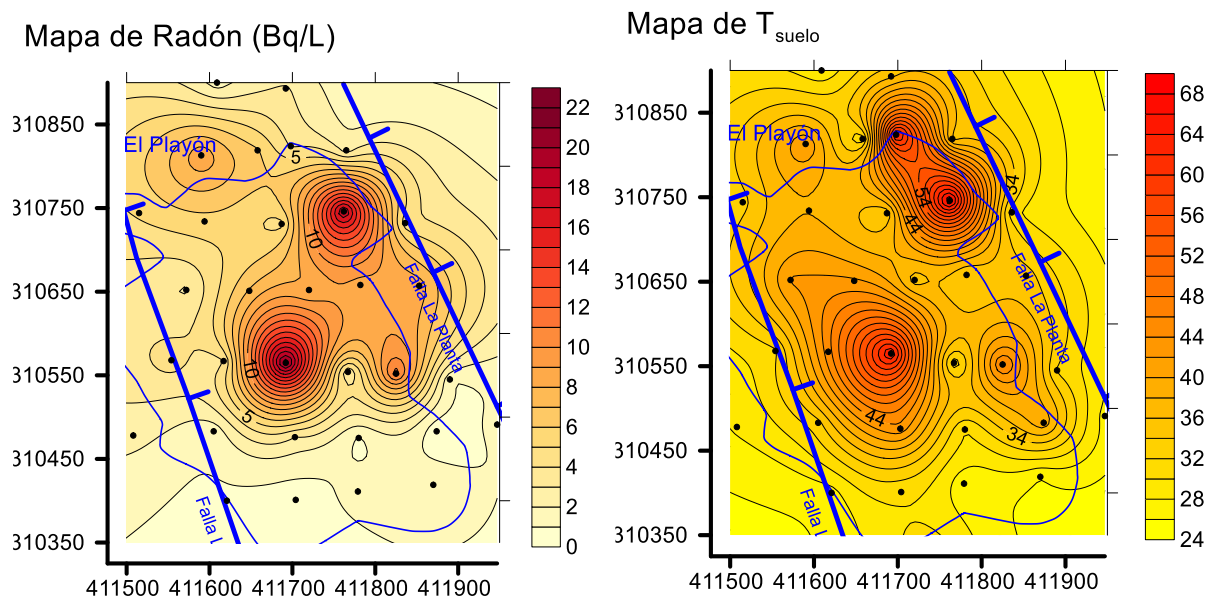


Figura 9.18. Mapas de las concentraciones de Radón y Temperatura de Suelo

Además, la Figura 9.18 muestra el comportamiento de la temperatura del suelo, la cual presenta el mismo patrón del Radón. Se observa que las zonas de mayor temperatura en suelo corresponden a las zonas de mayor concentración de Radón.

9.5.2 Torón (^{220}Rn)

La presencia de este isótopo (^{220}Rn), sugiere un ascenso rápido de fluidos (Magaña et al, 2002); al igual que el radón las altas concentraciones de este gas se asocia a la presencia de zonas de fracturamiento y permeabilidad alta, al realizarse un análisis rápido de los resultados, se observó que las concentraciones de Torón suelen ser similares a las de Radón (^{222}Rn) (Ver Figura 9.19), esto puede asociarse a que ambos gases provienen de la misma zona de la cámara magmática o fuente de calor del sistema geotermal de interés. La zona que presenta mayor emanación de gas Torón se observa en el centro en orientación al Noroeste con valores de concentración arriba de los 12 Bq/L.

Mapa de Torón (Bq/L)

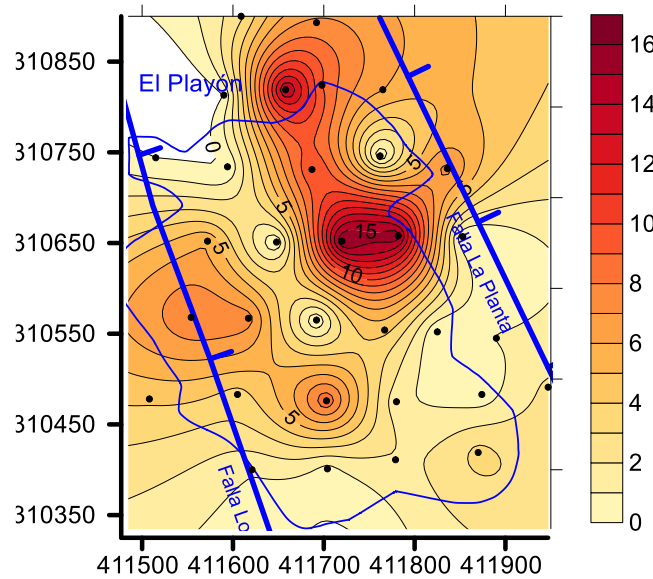


Figura 9.19. Concentraciones de Torón (Bq/L)

9.5.3 Mercurio (Hg)

La concentración de Mercurio en el área de El Playón, posee los niveles más altos al Noroeste de la zona (Ver Figura 9.20). Este gas puede estar relacionado con la fuente de calor o cámara magmática predominante en el sistema; teniendo en cuenta que el Mercurio es un gas que sugiere la existencia de altas temperaturas en reservorio.

Las concentraciones máximas poseen valores que rondan los 0.07 mg/m^3 .

Mapa de Hg

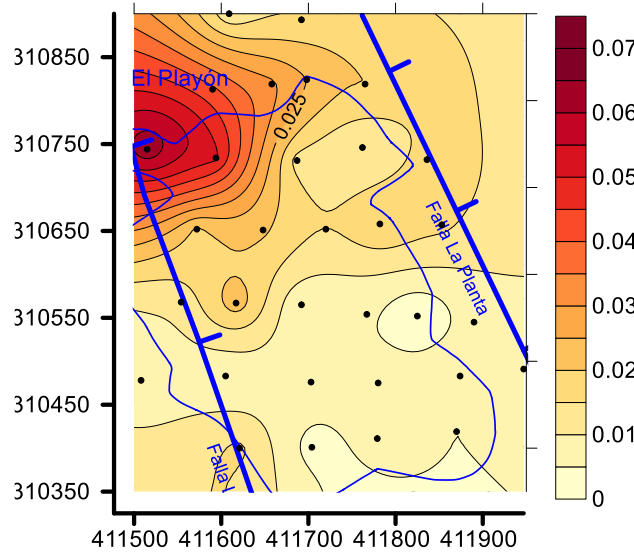
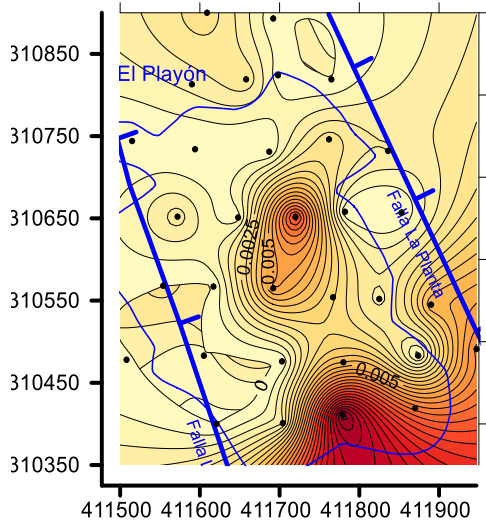


Figura 9.20. Concentraciones de Hg.

9.5.4 Sulfuro de Hidrógeno (H₂S)

El H₂S es el segundo gas más abundante en sistemas geotérmicos, después del CO₂; en el mapa de isocontornos correspondiente a la Zona de El Playón (Figura 9.21), se puede apreciar que las altas concentraciones se encuentran en la zona Sureste, con algunas alternancias de valores menores en la zona céntrica del área de estudio, posiblemente asociados a secciones con recubrimientos altos por sedimentación de minerales de alteración hidrotermal o por poca densidad de puntos de muestreo.

Mapa de H₂S



Mapa de Flujo de H₂S

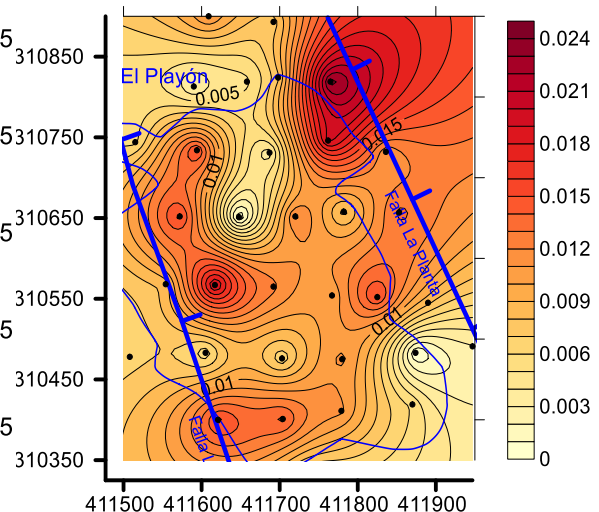


Figura 9.21. Concentraciones de H₂S.

9.5.5 Dióxido de Carbono (CO₂)

La presencia de CO₂ puede indicar ya sea el ascenso vertical y posible falla geológica activa o la presencia de vapor geotérmico a alta temperatura en la zona.

De acuerdo a la Figura 9.22, se observa una mayor emanación de este gas al Noroeste, evidenciando la presencia de las fallas geológicas o estructura en esa orientación, que permite el ascenso de flujos de fluidos hacia la superficie.

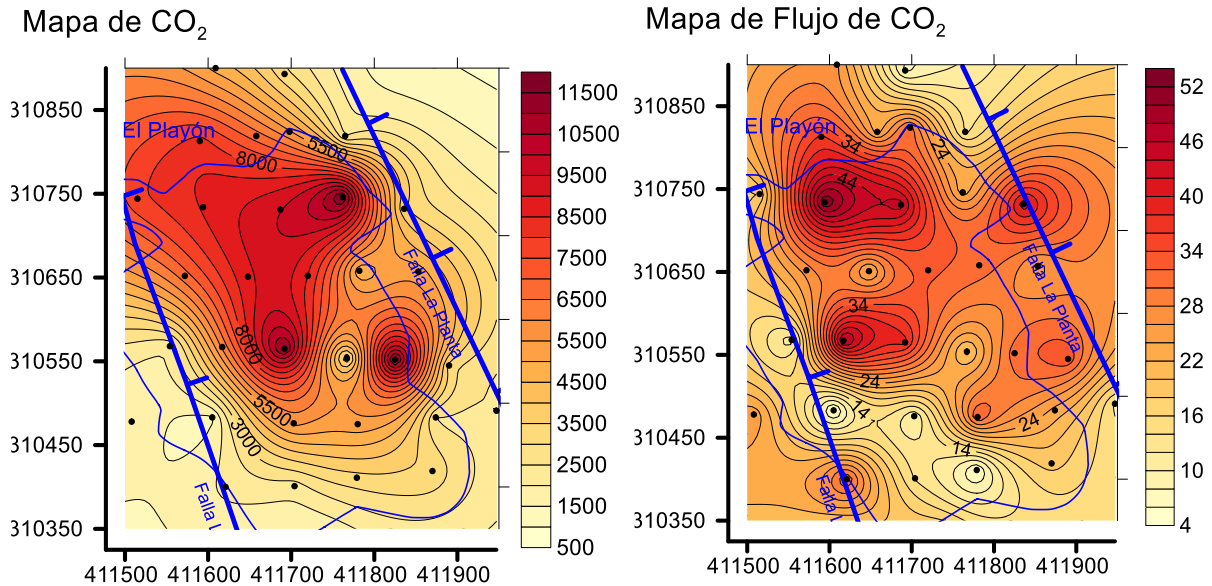


Figura 9.22. Concentraciones de CO₂.

9.5.6 Concentración Hidrógeno (H₂)

Las concentraciones de H₂ en la zona pueden indicar una desgasificación de origen magmático a través del suelo o la presencia de vapor geotérmico a alta temperatura en la zona; además, sugiere zonas con alta permeabilidad y ascenso vertical de los fluidos (Ver Figura 9.23). El gas Hidrógeno es un gas inerte y volátil, debido a esa característica, él rápidamente puede ser removido en la transición desde zonas profundas hacia la superficie.

Mapa de H₂

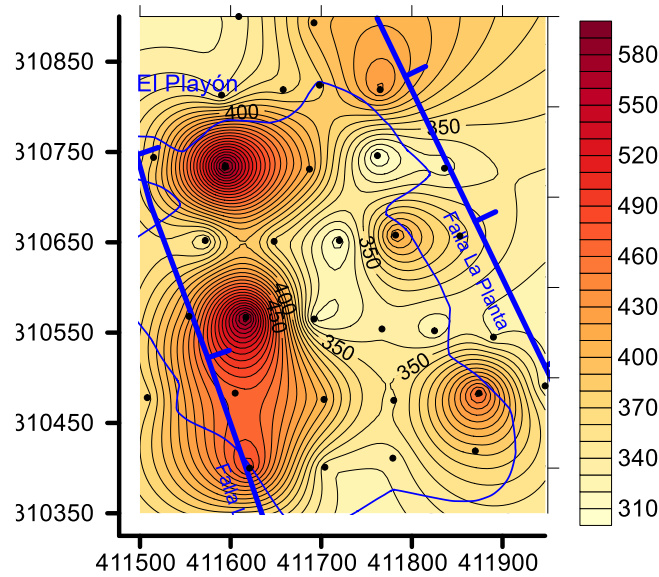


Figura 9.23. Concentraciones de H₂.

9.5.7 Helio (He)

El Helio se desplaza hacia la superficie a través de zonas donde existe permeabilidad vertical y proviene de fuentes profundas. La mayor concentración de Helio se encuentra al Suroeste de la zona (Ver Figura 9.24).

Mapa de He

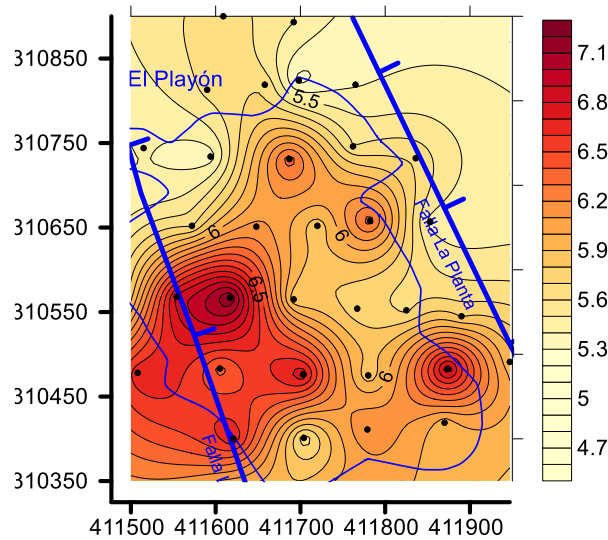


Figura 9.24. Concentraciones de He.

10. Conclusiones y Recomendaciones

10.1 Conclusiones

- Las concentraciones anómalas de gas Radón en el área de Ahuachapán corroboran la presencia del mismo en magnitud proporcional a la cercanía de una falla o manifestación geotérmica, esto incluye acuíferos someros y aguas con mezcla de acuíferos subterráneos.
- Los resultados de Radón analizados conjuntamente con parámetros fisicoquímicos utilizando la técnica de Componentes Principales proporciona una herramienta alternativa de mucha precisión y claridad para clasificar y agrupar aguas de acuerdo a su origen y además para determinar en etapas de exploración geotérmica correlaciones entre algunas de las principales variables geoquímicas como cloruros y conductividad, agrupadas en el componente principal 1 y Radón, pH y temperatura agrupados en el componente principal 2, así como también correlación en mapas de variables individuales de Radón en agua respecto a atributos geológicos como fallas y respecto a mapas de gases difusos, principalmente Radón difuso en suelo, temperatura en suelo, H₂S y CO₂ difuso en suelo; por lo tanto, se recomienda incluir el parámetro Radón en agua y la metodología de análisis cuantitativo así como también la metodología estadística de análisis de datos propuesta en esta investigación para el monitoreo e identificación de tipos de agua de acuerdo a su origen en etapas de exploración e incluir mapas de estas variables individuales o de componentes principales para definir anomalías geotérmicas de interés que puedan ser corroboradas con otras técnicas de prospección geofísicas para el caso de nuevos campos geotérmicos en exploración.
- La caracterización de las aguas haciendo uso de los diagramas de Stiff y de Piper agruparon a las fuentes El Cashal y Apunia como aguas bicarbonatadas (aguas superficiales), El Cashal Caliente y Agua Shuca como aguas sulfatadas; es decir, con influencia de vapor geotérmico, los puntos A y B del Río Los Ausoles como aguas sulfatadas-bicarbonatadas-cálcicas (aguas superficiales con mezcla de vapor y agua geotérmica), el pozo geotérmico como agua clorurada sódica (propia de fluido geotérmico) y la Fuente El Salitre como agua bicarbonatada-sódica (agua superficial con influencia de agua geotérmica). La clasificación anterior corresponde también a la obtenida con el Análisis por Componentes Principales, comprobando así la efectividad de la aplicación de este método estadístico y la confiabilidad de los datos obtenidos en campo.
- Las mayores concentraciones de Radón (²²²Rn) se obtuvieron en la Fumarola El Playón y Fumarola El Sauce. La fuente El Cashal, a pesar de ser una fuente superficial sin influencia geotérmica, posee concentraciones de Radón alrededor de 15 Bq/L y una temperatura de 23°C, por lo tanto, la procedencia del Radón en esta fuente se debe a otro tipo de mecanismo de transporte del gas disuelto en el agua y probablemente proviene de la interacción con la roca.

- El análisis estadístico por Componentes Principales permite observar las correlaciones entre las concentraciones de gas Radón y los parámetros fisicoquímicos temperatura y pH.

10.2 Recomendaciones

- Las concentraciones de gas Radón en agua medidas en aguas superficiales y fumarolas, pueden considerarse para ser incluidas en el muestreo geoquímico y para uso de carácter exploratorio en un proyecto Geotérmico.
- Según resultados obtenidos en este estudio se logra visualizar que existe una conexión directa, entre el incremento de la concentración de gas Radón medido con los movimientos de placas tectónicas que producen sismos, por lo cual es recomendable realizar más estudios que corroboren esta teoría que tiene validez para el caso de estudio de esta tesis en la cual si se logró medir el incremento de concentración días antes de darse un fenómeno sísmico.
- Para enriquecer esta investigación sería interesante extender las mediciones de gases difusos en los puntos donde se tomaron las mediciones de Radón en agua, si bien es cierto son matrices distintas, se podría obtener resultados interesantes sobre el comportamiento de Radón como emisión difusa y de Radón como gas disuelto en agua.
- Basándose en esta investigación y con los resultados obtenidos, se sugiere establecer el análisis de gas Radón, tanto en agua como en suelo, como una técnica de exploración geotérmica. Con las ecuaciones obtenidas de resultados estadísticos, se podría realizar una caracterización de las aguas tomando los parámetros: Radón, Temperatura y pH.
- Es importante poder implementar las mediciones de Radón en Agua en los muestreos geoquímicos superficiales y ambientales para enriquecer la investigación científica. En el caso específico de la Fuente El Cashal, debido a las concentraciones de altas de Radón y siendo esta una fuente que suministra a muchas comunidades del área, se recomienda realizar periódicamente monitoreo de sus concentraciones para prevenir el riesgo a la salud de la población de la zona.

11. Agradecimientos

Agradecemos a Dios por haber finalizado este estudio que nos ha hecho crecer como personas y profesionales, hemos recibido apoyo incondicional de nuestras familias y compañeros, adquiriendo conocimiento y entablando buenas relaciones interpersonales.

A LaGeo, la Universidad de El Salvador y a la Universidad de las Naciones Unidas (UNU-GTP) por brindarnos la oportunidad de realizar el Diplomado en Geotermia para América Latina Edición 2019.

A nuestros asesores: Licda. María Inés Magaña y Doctor Álvaro Amaya por su tiempo y disposición en aportar sus conocimientos en esta investigación, gracias a ustedes hemos podido terminar satisfactoriamente este trabajo.

Gracias al Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, especialmente al Lic. Ramiro Rodríguez y Msc. Julio Payés, por la disposición de trabajar en conjunto con LaGeo y enriquecer así la investigación científica.

Agradecer también al personal que nos colaboró durante el diplomado. A Martín Cubías y Harold Selva quienes con paciencia y mucha amabilidad brindaron sus conocimientos, su tiempo y nos enseñaron las técnicas para muestreo en campo.

A Jacqueline Hernández, Noel López, Emilio Guerra, Jaime Hernández y Antonio Matus por estar disponibles cada vez que solicitamos su apoyo en solventar dudas y por brindarnos su opinión sobre esta investigación. En general, al área geoquímica de LaGeo, por su valioso tiempo y disposición para enseñarnos todo lo necesario para el desarrollo de la misma.

A Carlos Grajeda, por su disposición en compartir experiencias e información valiosa para este trabajo de investigación.

12. Referencias bibliográficas

- Anderson, D. R., Sweeney, D. J., & Williams, T. A. (2012). *Estadística para Negocios y Economía*. Mexico D.F: Cengage Learning Editores.
- Cubero, J., & Flores, F. (1995). *MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA EL ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD VARIETAL EN ENSAYOS AGRÍCOLAS. II Edición*. Sevilla: Sevilla : Consejería de Agricultura y Pesca, D.L.
- Grimaldi, D. (2011). *Estudio de Desgasificación de origen volcánica de las fumarolas del Campo Geotérmico de Ahuachapán, Ahuachapán*. San Salvador.
- Khattak, N. U., Asif Khan, M., Nawab, A., & Abbas, S. M. (2011). *Radon Monitoring for geological exploration: A review*. National Centre of Excellence in Geology, University of Peshawar, Pakistan.
- Magaña, M. I. (2002). *Radon and Carbon Dioxide Diffuse Soil Degassing at Ahuachapan Geothermal Field, El Salvador*.
- Malimo, S. J. (2011). *Use of Radon and Carbon Dioxide in Geochemical Exploration — Case Study of Silali Geothermal Prospect, Kenya*. Geothermal Development Company Ltd., Nakuru, Kenia.
- Martín, R. (2019, Agosto). Retrieved from UCLM.es: https://previa.uclm.es/profesorado/raulmmartin/Estadistica/PracticasSPSS/REGRESION_LINEAL_CON_SPSS.pdf
- Morales, K., & Sigüenza, A. (2018). *DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD DEL RADÓN (222Rn) EN FUENTES TERMALES DE ÁREAS GEOTÉRMICAS*. UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.
- Pardo, A., & Ruíz, M. Á. (2005). *Análisis de datos con SPSS 13 Base*. España: McGraw-Hill.
- Segovia, N., Barragan, R. M., Alfaro, R., Tello, E., Mena, M., & Segovia, e. (2005). *Geochemical Characteristics and 222Rn Measurements at Cuitzeo Basin (Mexico) Thermal Springs and Artesian Wells*. Universidad Nacional Autónoma de Mexico.
- Triola, M. F. (2018). *Estadística, decimo segunda edición* . Mexico D.F: Pearson.

ANEXO A

Punto de Muestreo	N°	Temp	pH	σ^*	SPC	TDS	DO%	DO	Cloruros	Concentración de ^{222}Rn
Fuente El Cashal		°C		$\mu\text{S/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	ppm		mg/L	ppm	Bq/L
	1	22.50	6.20	220.00	213.30	0.14	61.10	5.10	12.14	15.37
	2	22.50	6.14	217.00	210.50	0.14	55.80	4.44	12.33	14.39
	3	24.10	6.16	200.00	258.00	0.16	65.40	4.79	18.75	15.95
	4	23.20	5.98	185.00	189.60	0.12	50.10	4.26	16.87	14.57
	5	22.00	6.24	201.00	197.10	0.13	67.30	5.43	15.37	16.90
	6	21.60	6.25	190.00	18.87	0.12	66.90	4.67	14.96	15.93
	7	21.80	6.21	184.00	186.90	0.12	74.00	6.20	10.13	12.98
	8	22.00	6.19	197.00	198.90	0.13	63.40	5.15	8.07	14.20
Río Apunia										
	1	26.80	6.17	170.00	170.00	0.11	53.70	4.47	16.62	5.84
	2	26.80	6.14	300.00	340.50	0.24	55.50	4.45	37.17	5.61
	3	27.90	5.86	313.00	300.50	0.19	76.00	6.21	58.61	8.43
	4	27.30	6.09	300.00	310.00	0.19	44.20	3.76	53.80	5.55
	5	26.90	6.10	312.00	300.40	0.20	65.30	5.25	67.07	6.32
	6	26.90	6.18	303.00	302.10	0.20	70.80	5.80	53.88	5.91
	7	26.70	6.64	303.00	311.10	0.20	75.50	6.40	42.14	5.31
	8	26.80	6.08	318.00	308.60	0.20	76.80	6.22	34.94	4.91
Fuente El Cashal Caliente										
	1	38.2	6.04	340.00	324.10	0.22	56.80	4.79	66.19	3.65
	2	37.9	5.93	550.00	520.00	0.36	48.90	3.90	77.50	4.77
	3	40.1	5.95	560.00	526.00	0.35	82.60	6.68	114.36	5.29
	4	38.7	5.90	590.00	575.00	0.37	71.80	6.08	124.46	4.86
	5	38.5	6.01	540.00	539.00	0.35	71.00	5.75	117.82	5.43
	6	37.4	5.97	550.00	538.00	0.35	56.40	4.63	109.20	4.47
	7	38.4	5.96	540.00	527.00	0.35	62.20	5.12	92.76	3.99
	8	38.0	6.01	520.00	529.00	0.34	109.40	8.86	86.03	3.58
Río Los Ausoles "B"										
	1	30.80	6.85	376.00	61.79	0.25	57.00	4.78	59.12	6.22
	2	27.20	6.38	423.00	409.00	0.27	54.70	4.36	66.28	MLD^a
	3	35.50	5.91	510.00	506.00	0.33	55.90	4.73	113.91	5.69
	4	30.60	6.13	417.00	439.90	0.28	42.70	3.66	87.18	8.72
	5	38.50	6.37	418.00	389.00	0.22	54.20	4.40	109.50	10.03
	6	40.50	4.97	483.00	479.00	0.31	51.70	4.24	109.14	5.52
	7	40.20	6.10	434.00	439.50	0.28	63.00	5.27	83.34	7.16
	8	34.00	6.50	374.00	370.20	0.24	82.10	6.70	58.96	7.51

Fumarola El Sauce										
	1	97.1	5.38	18.0	17.6	0.012	53.5	4.43	13.26	19.74
	2	97.1	6.20	20.0	19.3	0.013	43.9	3.53	9.30	15.58
	3	97.3	6.43	13.0	12.9	0.008	77.8	6.36	5.45	12.02
	4	96.3	5.12	34.0	139.0	0.090	64.2	5.55	82.40	29.59
	5	96.3	5.90	20.0	20.0	0.013	69.5	5.63	6.67	MLD^a
	6	96.0	5.98	28.0	27.6	0.018	69.8	5.71	13.49	10.87
	7	96.7	5.85	22.0	22.0	0.014	94.5	7.80	10.52	21.07
	8	96.3	5.25	21.0	20.4	0.013	63.1	5.14	9.82	28.88
Fumarola El Playón										
	1	97.6	4.90	5.0	4.8	0.033	52.2	4.33	3.02	9.94
	2	97.6	5.90	12.0	12.0	0.007	55.1	4.46	9.03	36.11
	3	98.8	5.81	16.0	15.4	0.010	59.5	4.82	12.28	7.09
	4	98.3	5.30	20.0	20.3	0.013	69.1	5.88	32.88	49.45
	5	98.3	6.16	11.0	10.8	0.007	57.3	4.66	6.22	21.01
	6	97.3	4.91	17.0	17.0	0.011	53.0	4.35	27.00	45.48
	7	98.6	5.77	11.0	11.0	0.007	117.9	10.12	8.83	28.25
	8	97.6	5.80	16.0	15.9	0.010	54.3	4.28	9.17	26.03
Agua Shuca										
	2	65.2	3.92	1540	1480	0.962	521	4.15	222.90	6.1918
	3	49.9	4.09	1520	1445	0.956	64.6	5.20	299.61	18.3161
	4	44.2	4.07	1170	1236	0.800	64.7	5.47	354.69	21.8544
	5	49.9	4.11	1290	1256	0.813	68.3	5.49	374.84	15.4814
	6	65.5	3.97	1450	1442	0.943	65.4	5.37	347.73	10.8854
	8	66.7	4.38	950	909	0.598	66.5	5.34	194.03	18.2366

^a Menor al Límite Detectable del Equipo.