

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL GAS RADÓN
(²²²Rn) EN AGUAS SUPERFICIALES, AGUAS
SUBTERRÁNEAS Y VAPOR CONDENSADO
PROVENIENTE DE FUMAROLA DE LA ZONA
HIDROTHERMAL EL PLAYÓN, AHUACHAPÁN Y
PROPUESTAS DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE SU
RADIOACTIVIDAD EN LAS AGUAS DE CONSUMO
HUMANO**

PRESENTADO POR:
DE LA O PAYÉS, JOSÉ FLAVIO
GRAJEDA HERNÁNDEZ, CARLOS ENRIQUE
MEJÍA MORALES, STEPHANIE TATIANA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA "DR. FABIO CASTILLO FIGUEROA", FEBRERO 2020

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR

Mtr. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL

Mtr. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO

Dr. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTORA

ING. SARA ELISABETH ORELLANA BERRÍOS

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO QUÍMICO

Título:

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL GAS RADÓN (^{222}Rn) EN AGUAS
SUPERFICIALES, AGUAS SUBTERRÁNEAS Y VAPOR CONDENSADO
PROVENIENTE DE FUMAROLA DE LA ZONA HIDROTÉRMICA EL PLAYÓN,
AHUACHAPÁN Y PROPUESTAS DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE SU
RADIOACTIVIDAD EN LAS AGUAS DE CONSUMO HUMANO**

Presentado por:

DE LA O PAYÉS, JOSÉ FLAVIO
GRAJEDA HERNÁNDEZ, CARLOS ENRIQUE
MEJÍA MORALES, STEPHANIE TATIANA

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

Mtr. MIGUEL FRANCISCO ARÉVALO MARTÍNEZ

Asesores Externos:

Licda. MARÍA INÉS MAGAÑA (LaGeo)
Licda. AÍDA SANTANA DE ZAMORA (CIAN)

San Salvador, febrero 2020

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

Mtr. MIGUEL FRANCISCO ARÉVALO MARTÍNEZ

Asesores Externos:

Licda. MARÍA INÉS MAGAÑA (LaGeo)

Licda. AÍDA SANTANA DE ZAMORA (CIAN)

RESUMEN

Los análisis de la actividad radiactiva en el agua de consumo humano relacionado con los niveles de la concentración del gas Radón (^{222}Rn) han incrementado en los últimos años a nivel mundial y nacional, debido a la amenaza radiactiva relacionada con la acumulación del gas Radón.

En el presente trabajo se ha llevado a cabo una evaluación acerca de la concentración de gas Radón (^{222}Rn) disuelto en muestras de agua de fuentes superficiales, subterráneas y vapor condensado proveniente de fumarola de la zona hidrotermal El Playón, en el municipio de Ahuachapán; con la finalidad de contribuir al monitoreo de radionúclidos disueltos en el agua de consumo y su evaluación frente al Límite Máximo Permisible por el Reglamento Técnico Salvadoreño (RTS) 13.02.01:14 para Radón (el cual es de 11.1 Bq/L), junto con algunas medidas para su mitigación en el agua para consumo humano.

El análisis de las concentraciones de gas Radón (^{222}Rn) en las muestras de agua recolectadas en ocho campañas de muestreo realizadas entre los meses de abril, mayo y junio del año 2019, en un total de doce puntos distintos, han arrojado resultados que sobrepasan los 11.1 Bq/L para una de las fuentes de agua de consumo humano y los 40 Bq/L en el caso de las muestras de vapor condensado de fumarolas, lo cual evidencia la presencia de radionúclidos disueltos en algunas de las fuentes de agua dentro de la zona hidrotermal del municipio de Ahuachapán.

Las mediciones de gas Radón (^{222}Rn) se realizaron por medio de la implementación del método de prueba estándar para Radón en agua potable ASTM D5072-09, con un espectrómetro de centelleo líquido modelo Tri-Carb 2100TR en el Centro de Investigación y Aplicaciones Nucleares de la Universidad de El Salvador. Además, se han evaluado en las muestras de agua recolectadas los siguientes parámetros fisicoquímicos: Cloruros, Sólidos Totales, Conductividad, pH y Temperatura, con el propósito de evaluar mediante un análisis estadístico una correlación lineal entre las concentraciones de Gas Radón y dichos parámetros físico-químicos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios nuestro Padre quien nos ha permitido llegar hasta este momento, a nuestros padres por su invaluable amor, apoyo y esfuerzo durante este tiempo y a nuestra demás familia y seres queridos que han estado presentes en cada etapa de nuestra vida.

Gracias a nuestros asesores: María Inés Magaña, Aída Santana de Zamora, Francisco Arévalo, Julio Payés y Ramiro Rodríguez por su apoyo, su tiempo y dedicación durante este trabajo de graduación.

A LaGeo y al Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador por su disposición de trabajar en equipo para lograr los mejores resultados en esta valiosa investigación.

A Martín Cubías, Harold Selva, Saúl Jacinto y demás personal del laboratorio geoquímico de LaGeo, por su disposición para acompañarnos en cada una de las visitas a campo que realizamos, poniendo todo su esfuerzo y dedicación por ayudarnos.

A Jaime Hernández, Jacqueline Hernández, Noel López, Antonio Matus, Claudia Pichardo y Diana Martínez por sus valiosos aportes de conocimiento en la aplicación e interpretación de la parte geotérmica de esta investigación.

A nuestros profesores de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería en Alimentos quienes siempre han estado en la disposición de enseñar y de aportar para el desarrollo de los estudiantes.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	v
AGRADECIMIENTOS	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
OBJETIVOS.....	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1. CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO CONCERNIENTE AL GAS RADÓN	4
1.1. LA RADIOACTIVIDAD COMO UN FENÓMENO NATURAL	5
1.1.1. Fuentes Naturales y Artificiales de Radiación.....	8
1.1.2. Efectos Biológicos de la Radioactividad.....	10
1.1.2.1. Riesgos asociados a la exposición al gas Radón.....	11
1.2. RADÓN: UN ELEMENTO RADIOACTIVO DE ORIGEN NATURAL	12
1.2.1. Procedencia Natural del Gas Radón.....	13
1.2.2. Mecanismos de Transporte del Gas Radón en la Corteza Terrestre.....	15
1.2.3. Detección y Cuantificación de ²²² Rn en Muestras de Agua.....	16
1.2.3.1. Descripción física del espectrómetro de centelleo líquido TRI-CARB 2100TR/SL.....	18
1.3. RADIOISÓTOPOS NATURALES PRESENTES EN EL AGUA	19
1.3.1. Límites de Parámetros Radioactivos para el Agua de Consumo Humano	20
1.3.2. Calidad Radiológica del Agua de Consumo Humano.....	21
1.3.2.1. Reglamentos de seguridad del agua potable en El Salvador.	22
1.3.2.2. Propuestas de mitigación para Radón en agua de consumo.	23
2. CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	24
2.1. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	26
2.1.1. Geología de la Zona Hidrotermal “El Playón”, Ahuachapán	26
2.2. DESCRIPCIÓN HIDROLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	28
2.2.1. Selección de Puntos de Muestreo en la Microcuenca, Ahuachapán	30
2.2.1.1. Puntos seleccionados dentro de la microcuenca de estudio.	30
2.2.2. Características de las Fuentes de Agua Superficial y Subterránea Dentro de la Microcuenca de Estudio, Ahuachapán	31

2.2.3.	Vapor Condensado Proveniente de Fumarola El Playón y Fumarola El Sauce.....	35
2.3.	MÉTODOS DE MUESTREO PARA LA CUANTIFICACIÓN DE RADÓN EN MUESTRAS DE AGUA	38
2.3.1.	Preparación de Viales de Centelleo Líquido.....	38
2.3.2.	Metodología de Muestreo para Vapor Condensado Proveniente de Fumarola.....	39
2.3.3.	Metodología de Muestreo para Aguas Subterráneas	40
2.3.4.	Metodología de Muestreo para Agua Superficial	41
2.3.5.	Metodología de Muestreo para Análisis Físicoquímicos en Muestras de Agua Superficial, Subterránea y Vapor Condensado Proveniente de Fumarola	42
2.4.	METODOLOGÍA PARA EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE GAS RADÓN (²²² Rn) EN MUESTRAS DE AGUA	43
2.4.1.	Método ASTM D5072-09 (2016) Para la Cuantificación de gas Radón (²²² Rn) en Muestras de Agua	43
2.4.1.1.	Modificaciones a la metodología ASTM D5072-09 (2016) para la cuantificación de gas Radón (²²² Rn).	44
2.4.1.2.	Calibración y estandarización de la metodología ASTM D5072-09 (2016)...	45
2.4.1.3.	Control de calidad del método ASTM D5072-09 (2016).....	47
2.5.	MODELAMIENTO ESTADÍSTICO Y DISTRIBUCIÓN DE MATRICES PARA EL ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	55
2.5.1.	Descripción de la Metodología de Análisis por Componentes Principales	57
2.5.1.1.	Interpretación de comunalidades de la metodología ACP.	59
2.5.1.2.	Varianza total explicada de la metodología ACP.	59
2.5.1.3.	Gráfica de sedimentación de la metodología ACP.	59
2.5.1.4.	Matriz de componentes principales de la metodología ACP.....	59
2.5.2.	Descripción de la Metodología de Correlación Lineal de Pearson	59
2.5.3.	Descripción de la Metodología de Regresión Lineal Múltiple	62
2.5.3.1.	Resumen del modelo para una regresión lineal múltiple.	63
2.5.3.2.	Prueba de análisis de la varianza en una regresión lineal múltiple.	63
2.5.3.3.	Pruebas de significación para una regresión lineal múltiple.	64
2.5.3.4.	Los coeficientes de regresión parcial estandarizados en una regresión lineal múltiple.	64
3.	CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN....	65
3.1.	CALIBRACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA ASTM D5072-09 (2016)	65

3.1.1.	Cálculo de la Actividad de gas Radón (^{222}Rn) en el Patrón de Referencia NIST-01 y en Muestras de Agua	66
3.1.2.	Cálculo de la Incertidumbre de la Cuantificación de Gas Radón (^{222}Rn) en Muestras de Agua	67
3.1.3.	Nivel Crítico y Concentración Mínima Detectable de gas Radón en Agua por el Método ASTM D5072-09 (2016)	71
3.2.	CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS DEL CONTROL DE CALIDAD SEGÚN LA METODOLOGÍA ASTM D5072-09 (2016)	72
3.2.1.	Demostración Inicial de las Capacidades del Laboratorio, Instrumento y Analista	72
3.2.2.	Verificación de la Calibración del Método ASTM D5072-09 (2016)	74
3.2.3.	Cálculo de la Actividad de las Muestras en Blanco por Cada Lote de Medición ...	75
3.2.4.	Cálculo de las Pruebas por Duplicado por Cada Muestra de Agua.....	75
3.3.	RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN DE GAS RADÓN EN LOS SITIOS DE MUESTREO	76
3.3.1.	Cuantificación de Gas Radón en Muestras de Agua Subterránea: Pozos Mirasol, Instituto Agrícola y San Luis	76
3.3.2.	Cuantificación de Gas Radón en Muestras de Agua Superficial: Río Apunia, Río Cashalate, Fuente El Cashal, Agua Shuca y Fuente El Cashal Caliente.....	77
3.3.3.	Cuantificación de Gas Radón en Muestras de Vapor Condensado Proveniente de Fumarola El Sauce y Fumarola El Playón.....	77
3.3.4.	Mapa de Concentraciones de Radón en el Área de Estudio, Ahuachapán	78
3.3.5.	Mapa de Concentraciones de Radón y Fallas Geológicas en la Zona de Estudio, Ahuachapán.....	79
3.4.	MEDICIÓN DE PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS EN MUESTRAS DE AGUA SUPERFICIAL, SUBTERRÁNEA Y DE VAPOR CONDENSADO	79
3.4.1.	Parámetros Físicoquímicos en Muestras de Agua Subterránea: Pozos Mirasol, Instituto Agrícola y San Luis	80
3.4.2.	Parámetros Físicoquímicos en Muestras de Agua Superficial: Río Apunia, Río Cashalate, Fuente El Cashal, Agua Shuca y Fuente El Cashal Caliente	81
3.4.2.1.	Parámetros físicoquímicos en muestras de agua superficial de consumo humano: Río Apunia y Fuente El Cashal.	81
3.4.2.2.	Parámetros físicoquímicos en muestras de agua superficial: Río Cashalate ...	81
3.4.2.3.	Parámetros físicoquímicos en muestras de agua superficial de mezcla: Fuente El Cashal Caliente, Río El Playón “B”, Agua Shuca.	82

3.4.2.4. Parámetros fisicoquímicos para muestras de vapor condensado proveniente de fumarola El Playón y El Sauce.	83
3.4.3. Comparación de los Parámetros Fisicoquímicos en las Matrices de agua Subterránea, Superficial y Vapor Condensado de Fumarola, Ahuachapán.....	84
3.5. COMPARACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE GAS RADÓN (^{222}Rn) CON EL REGLAMENTO TÉCNICO SALVADOREÑO RTS 13.02.01:14	89
3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO ENTRA LA CONCENTRACIÓN DE GAS RADÓN Y LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS	91
3.6.1. Análisis Estadísticos para Fuentes de Agua Superficial: Cashal y Apunia.	91
3.6.1.1. Análisis de componentes principales para fuentes de agua superficial.	91
3.6.1.2. Correlación lineal de Pearson para fuentes de agua superficial.....	95
3.6.2. Análisis Estadísticos para Aguas Superficiales Mezcladas con Agua Geotérmica: Río El Playón “B” y Cashal Fuente Caliente.....	96
3.6.2.1. Análisis de componentes principales para fuentes de agua superficial mezclada con agua geotérmica.	96
3.6.2.2. Correlación lineal de Pearson para aguas superficiales mezcladas con agua geotérmica: Río El Playón “B” y Cashal Fuente Caliente.	97
3.6.3. Análisis Estadístico para Vapor Condensado Proveniente de Fumarola El Sauce y Fumarola El Playón.....	100
3.6.3.1. Análisis de componentes principales para vapor condensado proveniente de fumarola El Sauce y Fumarola El Playón.	101
3.6.3.2. Correlación lineal de Pearson para vapor condensado proveniente de fumarola El Sauce y Fumarola El Playón.	102
3.6.4. Análisis Estadístico para Datos Obtenidos de Agua Subterráneas (Pozos).....	105
3.6.4.1. Análisis de componentes principales para fuentes de agua subterránea.	105
3.6.4.2. Correlación de Pearson para fuentes de agua subterránea.	105
3.6.5. Análisis Estadístico para Datos Obtenidos de “Agua Shuca”	106
3.6.5.1. Análisis de componentes principales de los datos del punto Agua Shuca.	106
3.6.5.2. Correlación lineal y prueba de hipótesis formal de los datos del punto Agua Shuca.	106
3.7. MÉTODO DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE.....	108
3.7.1. Resumen del Modelo de Regresión Lineal Múltiple.....	108
3.7.2. Ecuación del Modelo de Regresión Lineal Múltiple.....	109
3.7.3. Comparación de Valores Pronosticados con Valores Medidos de Concentración de Gas Radón.....	110

3.8. PROPUESTAS DE MITIGACIÓN DEL GAS RADÓN EN AGUA DE CONSUMO HUMANO.....	112
3.8.1. Sistemas de Aireación para la Reducción de Gas Radón en Agua	112
3.8.1.1. Sistema de torre empacada para la reducción de gas Radón en agua.	113
3.8.1.2. Sistema de burbuja difusa para la reducción de gas Radón en agua.	114
3.8.1.3. Aireación simple durante el almacenamiento para la reducción de gas Radón en agua para consumo.	116
3.8.1.4. Pérdida de gas Radón en agua por los sistemas de distribución de agua.	116
CONCLUSIONES	117
RECOMENDACIONES	119
REFERENCIAS	120
ANEXOS.....	124
Anexo A: Conglomerado de Datos para el Cálculo de la Actividad de Gas Radón en Muestras de Agua.....	125
Anexo B: Ejemplos de Cálculo para la Cuantificación de la Actividad de Gas Radón en Muestras de Agua y Patrones de Referencia.	133
Anexo C: Espectros de Gas Radón (^{222}Rn) y su Progenie en Muestras de Agua y Patrón NIST-01	135
Anexo D: Metodología en el Uso del Programa IBM SPSS Utilizado en el Análisis Estadístico...	136
Anexo E: Precipitación Diaria Acumulada en Milímetros, Cinco Días Antes de la Toma de Muestras (2019).....	138
Anexo F: Mapa Hidrológico de Ahuachapán	140
Anexo G: Mapa Sísmico de El Salvador de Abril a Julio de 2019	142
Anexo H: Mapas de Concentración de Gas Radón en Muestras de Agua, Ahuachapán.....	144
Anexo I: Muestreo de Vapor Condensado de Fumarola y Agua Superficial	145

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1:	Tipos comunes de radioactividad.....	6
Tabla 1.2:	Fuentes naturales y artificiales de radiación	9
Tabla 1.3:	Datos físicos del elemento radioactivo Radón (^{222}Rn)	13
Tabla 1.4:	Solubilidad de Radón en varios medios a 1 atmósfera de presión parcial y 20°C	13
Tabla 1.5:	Concentraciones de Uranio y Torio según el tipo de roca y suelo	14
Tabla 1.6:	Límites de parámetros radioactivos para el agua de consumo humano.....	23
Tabla 2.1:	Puntos de muestreo tomados dentro de la microcuenca durante la investigación.....	30
Tabla 2.2:	Fuentes de agua subterránea dentro de la microcuenca de estudio, Ahuachapán	33
Tabla 2.3:	Fuentes de agua superficial dentro de la microcuenca de estudio, Ahuachapán.....	34
Tabla 2.4:	Fumarolas El Playón y El Sauce muestreadas para obtener vapor condensado.....	37
Tabla 2.5:	Compuestos químicos utilizados en una solución centelladora	38
Tabla 2.6:	Patrones de referencia utilizados en la calibración y control de actividad del método ASTM D5072-09 (2016).....	45
Tabla 2.7:	Clasificación de los puntos de muestreo según las características de las muestras de agua.....	57
Tabla 2.8:	Índice de medida de adecuación muestral KMO para análisis por ACP	58
Tabla 2.9:	Interpretación de los coeficientes de la correlación lineal de Pearson	61
Tabla 2.10:	Niveles de significancia para una prueba de hipótesis formal	62
Tabla 3.1:	Conteos por segundo registrados en el centellador líquido para el estándar NIST-01 y el Fondo	66
Tabla 3.2:	Cálculo de Factor de Calibración a partir de tres réplicas del patrón NIST-01	66
Tabla 3.3:	Actividad y sesgo de gas Radón en el patrón de referencia NIST-01	67
Tabla 3.4:	Datos para la desviación estándar relativa del volumen de muestra	69
Tabla 3.5:	Datos para el cálculo de la incertidumbre estándar relativa del Factor de Calibración $\mu_r(\text{CF})$	70
Tabla 3.6:	Datos para el cálculo de la incertidumbre estándar combinada en la cuantificación de gas Radón (^{222}Rn)	70
Tabla 3.7:	Actividad de siete réplicas del patrón de referencia independiente IRD-01	72
Tabla 3.8:	CPM para las soluciones en blanco para la demostración inicial del laboratorio, instrumento y analista.....	73
Tabla 3.9:	Actividad de tres soluciones en blanco para la demostración inicial del laboratorio, instrumento y analista.....	74
Tabla 3.10:	Actividad del patrón de referencia CIAN-01	74
Tabla 3.11:	Actividad de un blanco de prueba por cada lote de medición	75
Tabla 3.12:	Concentraciones de Radón en muestras de agua de pozos Mirasol, Instituto Agrícola y San Luis.....	76
Tabla 3.13:	Concentración de gas Radón (Bq/L) en muestras de agua superficiales: Río Apunia, Río Cashalate, Fuente El Cashal, Agua Shuca y Fuente El Cashal Caliente...	77
Tabla 3.14:	Concentración de gas Radón en muestras de vapor condensado de fumarola El Sauce y fumarola El Playón	78

Tabla 3.15: Parámetros fisicoquímicos en muestras de agua subterránea: pozos Mirasol, Instituto Agrícola y San Luis	80
Tabla 3.16: Parámetros fisicoquímicos en muestras de agua superficial de consumo humano	81
Tabla 3.17: Parámetros fisicoquímicos en muestras de agua superficial en el río Cashalate.....	82
Tabla 3.18: Parámetros fisicoquímicos en muestras de agua superficial de mezcla: fuente El Cashal Caliente, río El Playón “B”, Agua Shuca	83
Tabla 3.19: Parámetros fisicoquímicos en muestras de vapor condensado de fumarola El Playón y El Sauce	84
Tabla 3.20: Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos en muestras de agua subterránea, superficial y vapor condensado de fumarola, Ahuachapán	85
Tabla 3.21: Comparación entre las concentraciones de gas Rn obtenidas en muestras de agua para consumo humano y el LMP según el RTS 13.02.01:14.....	90
Tabla 3.22: Matriz de correlación lineal de Pearson para agua superficial.....	91
Tabla 3.23: Prueba de KMO y Bartlett para Análisis de Componentes Principales.....	92
Tabla 3.24: Método de extracción de comunalidades para ACP de agua superficial	92
Tabla 3.25: Varianza total explicada para Análisis de Componentes Principales	93
Tabla 3.26: Matriz de componentes extraídos para Análisis de Componentes Principales	94
Tabla 3.27: Prueba de hipótesis formal para fuentes de agua superficial	95
Tabla 3.28: Prueba de KMO y Bartlett para aguas superficiales mezcladas con agua geotérmica: Río El Playón “B” y Cashal Fuente Caliente.....	96
Tabla 3.29: Matriz de componentes para aguas superficiales mezcladas con agua geotérmica: Río El Playón “B” y Cashal Fuente Caliente.....	97
Tabla 3.30: Prueba de hipótesis formal para aguas superficiales mezcladas con agua geotérmica: Río El Playón “B” y Cashal Fuente Caliente.....	98
Tabla 3.31: Prueba de KMO y Bartlett para vapor condensado proveniente de fumarolas El Sauce y El Playón	101
Tabla 3.32: Matriz de componente para vapor condensado proveniente de fumarolas El Sauce y El Playón	101
Tabla 3.33: Prueba de hipótesis formal para vapor condensado proveniente de fumarolas El Sauce y El Playón	102
Tabla 3.34: Prueba de hipótesis formal para fuentes de agua subterránea (pozos)	105
Tabla 3.35: Prueba de hipótesis formal para los datos del punto de muestreo Agua Shuca	106
Tabla 3.36: Resumen del modelo regresión lineal múltiple.....	108
Tabla 3.37: Prueba de análisis de la varianza del modelo de Regresión Lineal Múltiple	109
Tabla 3.38: Coeficientes de prueba de significación en una regresión lineal múltiple.....	109
Tabla 3.39: Valores de concentración de Radón pronosticados y su porcentaje de error	110
Tabla 3.40: Eficiencia, flujo y costos de construcción para sistemas de mitigación de gas Radón en agua de consumo humano	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Serie radioactiva natural del ^{238}U con los tiempos de semidesintegración de cada núcleo	7
Figura 1.2: Diferentes tipos de fuentes radiactivas en la superficie terrestre	10
Figura 1.3: Fenómenos de emanación y exhalación del gas Radón.....	16
Figura 1.4: Esquema de un detector centellador, acoplado a un fotomultiplicador	17
Figura 1.5: Esquema de un espectrómetro de centelleo líquido Tri-Carb	18
Figura 2.1: Mapa geológico de la República de El Salvador	27
Figura 2.2: Mapa geológico del área de estudio, Ahuachapán	28
Figura 2.3: Distribución de microcuencas en el sitio de estudio	29
Figura 2.4: Ciclo hidrológico del agua.....	31
Figura 2.5: Cortes transversales de sistemas geotérmicos.....	36
Figura 2.6: Recolección de vapor condensado proveniente de fumarola	39
Figura 2.7: Instrumento de colección de muestra de agua utilizada para consumo humano.....	40
Figura 2.8: Llenado de un vial de vidrio con agua para su análisis por centelleo líquido.....	41
Figura 2.9: Medidor portátil multiparamétrico YSI Professional Pus, del CIAN-FIA-UES.....	42
Figura 2.10: Espectrómetro de centelleo líquido (Tri-Carb 2100TR) del CIAN-FIA-UES	43
Figura 2.11: Procedimiento para la calibración y estandarización del método ASTM D5072-09	46
Figura 2.12: Procedimiento en la demostración inicial de las capacidades del laboratorio, instrumento y analista.....	48
Figura 2.13: Procedimiento para la verificación de la calibración del método ASTM D5072-09	52
Figura 2.14: Procedimiento para el análisis de muestras en blanco del método ASTM D5072-09...52	
Figura 2.15: Procedimiento para el análisis de muestras por duplicado según el método ASTM D5072-09	53
Figura 3.1: Mapa de contornos para las concentraciones de gas Radón en agua del área de estudio, Ahuachapán	78
Figura 3.2: Fallas geológicas dentro del área de estudio, Ahuachapán.....	79
Figura 3.3: Valores promedio de temperatura en muestras de agua subterránea, superficial y vapor condensado de fumarola, Ahuachapán	85
Figura 3.4: Valores promedio de unidades de pH en muestras de agua subterránea, superficial y vapor condensado de fumarola, Ahuachapán.....	86
Figura 3.5: Valores promedio de conductividad en muestras de agua subterránea, superficial y vapor condensado de fumarola, Ahuachapán.....	87
Figura 3.6: Valores promedio de TDS en muestras de agua subterránea, superficial y vapor condensado de fumarola, Ahuachapán	87
Figura 3.7: Valores promedio de DO en muestras de agua subterránea, superficial y vapor condensado de fumarola, Ahuachapán	88
Figura 3.8: Valores promedio de Cloruros en muestras de agua subterránea, superficial y vapor condensado de fumarola, Ahuachapán	89
Figura 3.9: Comparación entre las concentraciones de gas Radón en muestras de agua para consumo humano y el LMP según el RTS 13.02.01:14	90

Figura 3.10: Gráfico de sedimentación	94
Figura 3.11: Parámetros fisicoquímicos y concentraciones de Rn en Fuente El Cashal Caliente	99
Figura 3.12: Parámetros fisicoquímicos y Concentraciones de Rn en el Río El Playón “B”	100
Figura 3.13: Parámetros fisicoquímicos y concentraciones de Rn en Fumarola El Sauce	103
Figura 3.14: Parámetros fisicoquímicos y concentraciones de Rn en Fumarola El Playón	104
Figura 3.15: Parámetros fisicoquímicos y concentraciones de Rn en el punto de Agua Shuca	107
Figura 3.16: Valores de Concentración de Rn experimentales y pronosticados: El Cashal.....	111
Figura 3.17: Valores de Concentración de Rn experimentales y pronosticados: Fuente Apunia	111
Figura 3.18: Porcentaje de eliminación de Rn para diferentes empaquetaduras	114
Figura 3.19: Porcentaje de eliminación de Rn para flujos altos y bajos en la estación de bombeo de <i>Scobie Pond</i>	115

INTRODUCCIÓN

La presencia de radionúclidos como Uranio, Radio y Radón identificados en muestras de agua subterránea y superficial se han producido gracias a los fenómenos naturales de la radioactividad. Los radionúclidos como el Radón (^{222}Rn) provienen de fuentes naturales de radiación presentes en la corteza terrestre; entre ciertos tipos de rocas que contienen en su composición isótopos radioactivos de Uranio, Torio o Actinio. Estas rocas entran en contacto con el agua subterránea y transmiten los radionúclidos, como el Radón, al agua potable. Aunque es un peligro menos urgente, la presencia de radionúclidos en el agua destinada al consumo humano puede llegar a producir efectos negativos en la salud, debido a la exposición a las diferentes partículas radioactivas (alfa, beta y los rayos gama) que emiten a medida que los elementos radiactivos se descomponen.

El Radón disuelto en el agua no puede ser detectado por los sentidos, a diferencia de muchos contaminantes del agua que pueden identificarse por su olor, color o sabor al agua. Por lo tanto, es importante aplicar técnicas analíticas (centelleo líquido) para su identificación y cuantificación en las aguas de consumo. Debido a la fuerte influencia del sitio geológico, condiciones geoquímicas e hidrológicas es muy difícil pronosticar la cantidad de actividad de radionúclidos en el agua; es complicado desarrollar información específica del sitio sobre la ocurrencia y la actividad de Radón porque las fuentes de agua son comúnmente una mezcla de numerosas fuentes de agua subterránea y superficial, sin embargo debe de existir un monitoreo constante de aquellos sitios identificados con concentraciones de Radón por arriba del Límite Máximo Permisible por el Reglamento Técnico Salvadoreño RTS 13.02.01:14.

En El Salvador se conoce muy poco de las concentraciones de radionúclidos en los suministros de agua, en este contexto en esta investigación se han hecho análisis en muestras de agua superficial y subterránea para examinar el nivel de concentración de Radón en algunas áreas específicas del municipio de Ahuachapán entre los meses de abril, mayo y junio del año 2019. La variación en la concentración de Radón también se ha correlacionado con las propiedades fisicoquímicas del agua para proporcionar una herramienta de monitoreo en los niveles de Radón en las fuentes de agua que así lo requieren.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Dentro de los requisitos de calidad para el agua de consumo humano se establecen los requerimientos físicos, químicos y microbiológicos que se deben cumplir, con el fin de proteger la salud pública; estos requerimientos se aplican a todos los servicios públicos, municipales y privados sea cual fuere el sistema o red de distribución, en lo relativo a la prevención y control de la contaminación de las aguas; dentro de los requisitos químicos se analizan los parámetros radioactivos (radionúclidos). Sin embargo, debido al alto costo de los requerimientos técnicos para el análisis de radioactividad en agua, los estudios al respecto son muy limitados en el país, insuficientes para determinar si las concentraciones de radionúclidos no sobrepasan los límites máximos permisibles por el Reglamento Técnico Salvadoreño RTS 13.02.01:14 en el agua de consumo humano del territorio salvadoreño.

El proceso de identificar radionúclidos en el agua de consumo humano y determinar su concentración requiere tiempo y es costoso; por lo tanto, los análisis no se efectúan de manera rutinaria. Un enfoque más práctico será realizar los estudios en base a los recursos analíticos y técnicos disponibles y en conformidad con los antecedentes del tema, siguiendo esta misma línea, el objetivo general de esta investigación consiste en realizar un estudio radiológico en algunos puntos del municipio de Ahuachapán de la actividad radioactiva del gas Radón en muestras de agua (^{222}Rn); el cual es un producto de la desintegración del Radio (^{226}Ra) elemento altamente radiactivo producido por la descomposición del Uranio.

En El Salvador, se han efectuado análisis destinados a la identificación y cuantificación de Radón y Radio en aguas de consumo del área metropolitana de San Salvador (Morales, et. al, 2019). No obstante, niveles más altos de concentración de Radón en aguas superficiales y subterráneas se han identificado dentro de la zona hidrotermal de El Playón, en el departamento de Ahuachapán (Morales y Sigüenza, 2018), por lo tanto, es preciso levantar información cuantitativa respecto a la actividad radiológica del gas Radón en el agua de consumo que se extrae de pozos perforados localizados dentro de la microcuenca hidrológica de la zona hidrotermal y sentar las bases para la mitigación de la radioactividad del Radón en las aguas de consumo humano en caso de ser necesaria.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estudiar el comportamiento del gas Radón (^{222}Rn) en aguas superficiales, aguas subterráneas y vapor condensado proveniente de fumarola de la zona hidrotermal El Playón, Ahuachapán y proponer medidas de mitigación de su radiactividad en las aguas de consumo humano.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Medir la concentración de la actividad radiológica de gas Radón (^{222}Rn) en muestras de agua provenientes de tres matrices diferentes.
- II. Analizar las propiedades fisicoquímicas de agua superficial, agua subterránea y el vapor condensado proveniente de fumarola en base a los parámetros: Cloruros, Sólidos Totales, Conductividad, pH y Temperatura.
- III. Estimar una relación entre las concentraciones de Radón (^{222}Rn) con las propiedades fisicoquímicas de agua superficial, aguas subterráneas y el vapor condensado proveniente de fumarola.
- IV. Indagar la existencia de una correlación en el comportamiento del gas Radón (^{222}Rn) entre las aguas superficiales, aguas subterráneas y el vapor condensado proveniente de fumarola.
- V. Sugerir medidas para aminorar la concentración de gas Radón (^{222}Rn) presentes en las aguas de consumo humano.
- VI. Comparar los valores de concentración del gas Radón (^{222}Rn) con el Límite Máximo Permisible por el Reglamento Técnico Salvadoreño RTS 13.02.01:14.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO CONCERNIENTE AL GAS RADÓN

La radioactividad es un fenómeno de origen natural o artificial causado por la desintegración del núcleo de un átomo inestable, que resulta en la emisión de energía en forma de partículas en movimiento o de ondas electromagnéticas. La radioactividad está ligada al planeta tierra desde su origen, debido a que ha estado expuesta a distintos tipos de radiación, tanto del espacio exterior como del material radioactivo de su corteza y núcleo.

Desde el descubrimiento de la radiación se ha encontrado evidencia acerca de los efectos de ésta en la salud, las investigaciones han permitido conocer las consecuencias a corto y largo plazo a la exposición de tejidos u órganos humanos a la radiación, pudiendo llegar a provocar un alto porcentaje de daño celular, lo que implicaría una alteración o trastorno del órgano o tejido expuesto. La exposición a la radiación también puede provocar la transformación no letal de las células, sin embargo, existe la posibilidad de que la transformación no letal de una célula produzca cáncer en la persona expuesta o que esa transformación tenga efectos hereditarios negativos.

La mayor fuente de exposición a la radiación natural que experimenta el ser humano sobre la superficie terrestre es ocasionada por el gas noble Radón (Rn). El ^{222}Rn proviene del decaimiento radioactivo del ^{226}Ra (Radio) dentro de la cadena de decaimiento radioactiva del ^{238}U (Uranio), presente en la mayoría de rocas y suelos del planeta. Estos radionúclidos son transmitidos de la roca al agua subterránea, lo cual podría comprometer la seguridad del agua de consumo humano respecto a su contenido de radionúclidos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) dentro del marco para la seguridad del agua de consumo humano, hace un énfasis particular en el monitoreo y vigilancia de la calidad radiológica del agua por los riesgos a la salud asociados a la presencia de radionúclidos de origen natural. Así mismo, propone medidas sencillas para el tratamiento efectivo del agua con el objeto de reducir las concentraciones de Radón y, por lo tanto, la reducción de riesgos a la salud mediante la aplicación de estas tecnologías.

En El Salvador la entidad responsable de la vigilancia y el monitoreo de los aspectos microbiológicos, químicos, radiológicos y de aceptabilidad del agua de consumo es el Ministerio

de Salud junto a la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), como administradora y aseguradora de la calidad del recurso hídrico; a través del cumplimiento del Reglamento Técnico Salvadoreño RTS.13.02.01:14, vigente desde abril de 2018, elaborado en parcialidad con las Guías para la Calidad del Agua de Consumo Humano de la OMS, con el objetivo de establecer los límites permisibles de los parámetros microbiológicos, físicos, químicos y radiológicos que debe cumplir el agua para el consumo humano.

1.1. LA RADIOACTIVIDAD COMO UN FENÓMENO NATURAL

Algunos elementos químicos del medio ambiente son radiactivos de forma natural, estos se encuentran en cantidades variables en el suelo, agua y aire; de modo que la exposición a ellos es inevitable (OIEA, 2016). Científicamente la radioactividad es una propiedad en virtud de la cual algunos elementos, tales como el Uranio, el Torio (Th), el Radio o el Radón, se desintegran con el paso del tiempo para dar lugar a nuevos átomos; emitiéndose, al mismo tiempo, en este tipo de procesos, radiaciones y partículas de naturaleza diversa (Quindós, 1995). Estas diferentes emisiones llevaron a Ernest Rutherford entre los años de 1898 y 1907 a identificar tres tipos de radioactividad (α , β , γ) pero ahora se conocen muchos más, los cuales se detallan en la Tabla 1.1.

La unidad de desintegración radioactiva es el *Curio* (*Ci*), nombrada así en homenaje a los físicos y químicos Pierre y Marie Curie y se define como la actividad que 1g de ^{226}Ra (isótopo del elemento químico Radio) emite en un segundo (3.7×10^{10} desintegraciones por segundo, DPS) o lo que es lo mismo, 2.22×10^{12} desintegraciones por minuto (DPM). La unidad de radioactividad en el Sistema Internacional (SI) es el *Becquerel* (Bq). Un Bq es una desintegración por segundo y su conversión a *Ci* viene dado por la ecuación 1.2. El *Curio* representa una cantidad muy grande de radioactividad desde el punto de vista biológico, por lo que generalmente se utilizan unidades como el $\text{pCi} = 10^{-12} \text{ Ci}$.

$$1 \text{ curio} = 3.7 \times 10^{10} \text{ DPS} = 2.22 \times 10^{12} \text{ DPM} \quad (\text{ec. 1. 1})$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} \quad (\text{ec. 1. 2})$$

Tabla 1.1: Tipos comunes de radioactividad.

TIPO	SÍMBOLO	IDENTIDAD	ΔZ^*	ΔA^{**}	EJEMPLOS
Alfa	$\alpha, {}^4_2\alpha, {}^4_2He^{2+}$	Núcleo de Helio	-2	-4	${}^{204}_{82}Pb \rightarrow {}^{200}_{80}Hg + {}^4_2He$ ${}^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^4_2He$
Beta	$\beta, \beta^-, {}^0_{-1}\beta, {}^0_{-1}e$	Electrón	+1	0	${}^{24}_{11}Na \rightarrow {}^{24}_{12}Mg + {}^0_{-1}e$
Gamma	$\gamma, {}^0_0\gamma$	Radiación electromagnética de alta energía	0	0	
Positrón	$\beta^+, {}^0_{+1}\beta, {}^0_{+1}e$	Electrón de carga positiva	-1	0	${}^{43}_{22}Ti \rightarrow {}^{43}_{21}Mg + {}^0_{+1}\beta$
Neutrón	$n, {}^1_0n$	Neutrón	0	-1	${}^{17}_7N \rightarrow {}^{16}_7N + {}^1_0n$
Protón	$p, {}^1_1p, {}^1_1H^{1+}$	Núcleo de Hidrogeno -1	-1	-1	
Captura K		Captura de un electrón	-1	0	${}^{44}_{22}Ti + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^{44}_{21}Sc$

*Diferencia en el número atómico

**Diferencia en el número másico

Fuente: UAH, 1994

Los núcleos de los átomos están compuestos por protones y neutrones. Algunos núcleos tienen una combinación de protones y neutrones que no conducen a una configuración estable. Estos núcleos son inestables o radiactivos. Cuando una desintegración produce un núcleo a su vez inestable, éste prosigue dando una serie (o cadena) radioactiva. Hay tres series radioactivas naturales, serie del ${}^{238}U$, serie del ${}^{235}U$ y serie del ${}^{232}Th$, en las que las emisiones α , alternadas a veces con emisiones β , acaban en un isótopo estable de Plomo, no sin antes producirse una decena de elementos radioactivos en el intermedio (UAH, 1994). En cada una de las tres series aparece un determinado isótopo¹ del gas Radón; el ${}^{220}Rn$ que se encuentra en la serie del ${}^{232}Th$, el ${}^{219}Rn$ se encuentra en la serie del ${}^{235}U$ y el ${}^{222}Rn$ se encuentra en la cadena del ${}^{238}U$ (Quindós, 1995), la cual, de acuerdo a la Figura 1.1 finaliza con el isótopo estable del ${}^{206}Pb$ (Plomo).

¹ Átomo que pertenece al mismo elemento químico que otro, tiene su mismo número atómico, pero distinta masa atómica.

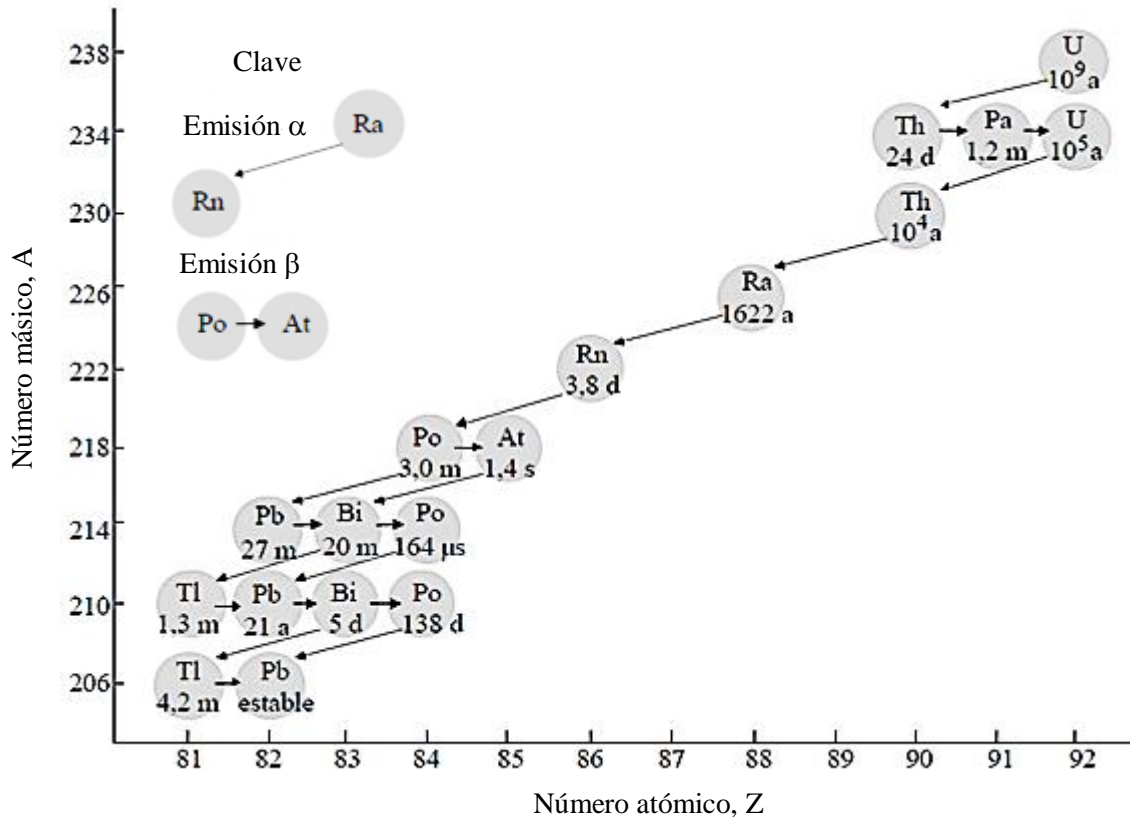


Figura 1.1: Serie radioactiva natural del ^{238}U con los tiempos de semidesintegración de cada núcleo (a = años, d = días, m = minutos, s = segundos). (UAH, 1994).

El ^{222}Rn procede directamente de la desintegración radioactiva del ^{226}Ra (véase la Figura 1.1) tras una emisión de una partícula α (núcleos de Helio doblemente ionizados debido a la pérdida de dos electrones); al isótopo de ^{226}Ra se restan dos unidades de su número atómico² (Z) y cuatro unidades de su masa atómica³ (A) transformándose así en el isótopo ^{222}Rn como se muestra en la ecuación 1.3 y 1.4:



La velocidad a la que ocurren estas desintegraciones radioactivas se le conocen con el nombre de actividad (v), la cual depende directamente del número de partículas (N) presente en una muestra y viene dado por la ecuación 1.5:

² Número de protones que hay en el núcleo del átomo de un elemento.

³ Número de protones y neutrones en un solo átomo.

$$\nu = -\frac{dN}{dt} = kN \quad (\text{ec. 1.5})$$

La constante de desintegración (K) en la ecuación cinco es diferente para cada radionucleido⁴ y es independiente de la temperatura, del estado físico de la muestra y del compuesto que forma parte (UAH, 1994).

El periodo de desintegración de un isótopo radiactivo es el tiempo promedio de vida de un átomo antes de desintegrarse. El tiempo necesario para que una muestra de material radiactivo se reduzca a la mitad se le conoce como período de semidesintegración o vida media $t_{1/2}$, y viene dado por la ecuación 1.6:

$$t_{1/2} = 0.693/k \quad (\text{ec. 1.6})$$

De los 39 isótopos conocidos del Radón, solo cuatro tienen vidas medias de más de 1 hora, por ejemplo, el periodo de semidesintegración del Torón (^{219}Rn) es de 55.6 s y el del Actinon (^{219}Rn) de 3.96 s, mientras que el ^{222}Rn , que es el isótopo al que se denomina propiamente Radón, tiene un periodo de semidesintegración de 3.824 días (Fuente, 2016); debido a sus vidas medias, habitualmente solo se tiene en cuenta el ^{222}Rn , ya que tras un minuto, es el único isótopo que permanece en una proporción significativa que permita su cuantificación y estudio. Y es que la radiación es un tema de suma importancia para el campo de la investigación científica con un amplio abanico de aplicaciones industriales, médicas y tecnológicas.

1.1.1. Fuentes Naturales y Artificiales de Radiación

La radioactividad es un fenómeno natural y por lo tanto las fuentes naturales de radiación son una característica del medio ambiente, todas las especies del planeta han existido y evolucionado en ambientes con exposición a la radiación natural; y más recientemente a fuentes artificiales desarrolladas durante el último siglo (OIEA, 2016). En la Tabla 1.2 se describen las principales fuentes de radiación clasificadas en base a la exposición a la que se encuentra expuesto el público en general.

⁴ Forma inestable de un elemento químico que libera radiación ionizante a medida que se descompone y se vuelve más estable. Los radionúclidos, también llamados radioisótopos.

Tabla 1.2: Fuentes naturales y artificiales de radiación.

FUENTE	DESCRIPCIÓN
Fuentes cósmicas	Los rayos cósmicos conforman una gran fuente natural de exposición externa a la radiación. La mayoría de estos rayos se originan en el espacio interestelar (algunos de ellos emitidos durante erupciones solares). Estos irradian la tierra de manera directa e interactúan con la atmósfera produciendo así distintos tipos de radiación y material radiactivo.
Fuentes artificiales	Los usos de la radiación han aumentado de manera significativa en las últimas décadas, cuando los científicos aprendieron a utilizar la energía del átomo para una amplia variedad de propósitos: militares, aplicaciones médicas (por ejemplo, el tratamiento del cáncer) y la producción de electricidad. Éstas y otras fuentes artificiales de radiación se suman a la dosis de radiación recibida por las fuentes naturales.
Fuentes en alimentos y bebidas	Las rocas y los minerales presentes tanto en suelo como en agua contienen radionucleidos que pueden transferirse desde éstos a las plantas, y luego a los animales. De este modo, las dosis varían según las concentraciones de radionucleidos tanto en agua como en alimentos, y los hábitos alimenticios locales.
Naturales	Todo lo que se encuentra en y sobre la tierra contiene radionúclidos primigenios ⁵ . Estos radionúclidos de vida extremadamente larga, que se encuentran en el suelo, (⁴⁰ K, ²³⁸ U y ²³² Th) junto con los radionúclidos en los que éstos decaen han emitido radiación desde antes que el planeta tomara su forma actual. Hay dos tipos de fuentes de radiación terrestre: el suelo y el gas Radón.

Fuente: PNUMA, 2016.

La exposición radioactiva sobre la superficie terrestre tiene una procedencia antrópica⁶ en un 12%; y una procedencia natural en un 88%. En la Figura 1.2 se presenta un esquema con la distribución del porcentaje por cada fuente de radiación. Para el caso de las fuentes naturales, el gas Radón es el causante del 65% de estos efectos radiactivos debido a su naturaleza gaseosa; la cual le permite fluir fácil y rápidamente desde la corteza terrestre hasta ser llevado parcialmente a la superficie, ya sea como un gas o disuelto en agua (Garzon, et al., 2004).

⁵ Radionúclidos que existen en la tierra de forma natural y en cantidad significativa.

⁶ Cualquier acción o intervención realizada por el ser humano sobre el planeta.

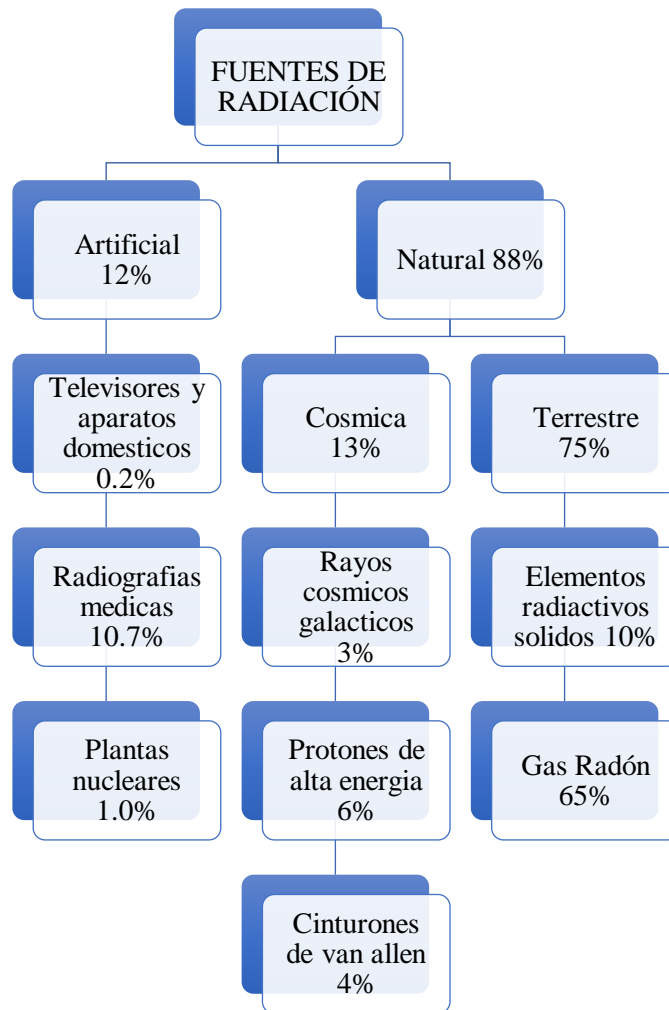


Figura 1.2: Diferentes tipos de fuentes radiactivas en la superficie terrestre. (Garzon, et al., 2004).

1.1.2. Efectos Biológicos de la Radioactividad

Al considerar los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes⁷ no se debe pasar por alto que estas han existido siempre sobre la tierra como elementos químicos que son parte del medio ambiente; estos se encuentran en cantidades variables en el suelo, agua, aire e incluso dentro del cuerpo humano, de modo que la exposición a ellos es inevitable.

La exposición a la radiación puede llegar a provocar la transformación no letal de las células y puedan seguir manteniendo su capacidad de división celular, sin embargo, existe la posibilidad de desarrollar afecciones que invadan o destruyan tejido orgánico circundante (cáncer)

⁷ Radiación de alta energía como para eliminar un electrón de un átomo o molécula y causar su ionización.

en la persona expuesta si la célula es somática⁸, o que esa transformación tenga efectos hereditarios si la célula es germinal⁹. Tales efectos se denominan efectos estocásticos¹⁰ o probabilísticos.

La exposición de tejidos u órganos humanos a la radiación también puede provocar muerte celular, hasta una escala lo suficientemente amplia como para afectar la función del tejido u órgano expuesto. Los efectos de este tipo, denominados efectos deterministas, solo son observables clínicamente en una persona si la dosis de radiación rebasa un determinado nivel umbral de dosis de radiación (OIEA, 2016), la gravedad de sus efectos dependen de la clase y energía de la radiación, el que esta proceda de fuentes externas o incorporadas al organismo y finalmente el tiempo total de irradiación (Quindós, 1995).

En lo concerniente a la clase y energía de la radiación, las partículas alfa, aunque son las menos penetrantes del tipo de partículas radioactivas (éstas pueden ser detenidas por una hoja de papel o por la piel) pueden llegar a ser dañinas si se inhalan o ingieren, ya que en esos casos entran en contacto con los órganos internos. Aun cuando son las menos penetrantes, las partículas alfa causan mayor daño por volumen de unidad que las partículas beta o los rayos gama (Lesikar, et al., 2006).

1.1.2.1. Riesgos asociados a la exposición al gas Radón.

Al ser radioactivo, el Radón da origen a otros elementos que también lo son. Por esta razón cuando se habla de los riesgos del Radón, no deben omitirse la radiación emitida por todo el conjunto, es decir, la debida al Radón y a sus descendientes (Quindós, 1995).

El riesgo de la exposición al gas Radón se fundamenta principalmente en el efecto que pueden inducir el bombardeo de las partículas alfa y los descendientes de la desintegración radiactiva del gas Radón en las células. Respecto a los efectos del gas Radón sobre el organismo, en las últimas décadas se ha demostrado que la prolongada exposición (durante varios años) a altos niveles de gas Radón es la segunda causa de muertes por cáncer pulmonar, la EPA estima que alrededor de un 12% de las muertes por cáncer de pulmón en los EE.UU. están

⁸ Son las células que conforman el crecimiento de los tejidos y órganos de un ser vivo pluricelular.

⁹ Célula del organismo que sufre el proceso de meiosis (división celular propio de las células reproductoras).

¹⁰ Son aquellos efectos donde las dosis de radiación son muy pequeñas, pero son persistentes, por lo general estos efectos se presentan en un largo plazo.

relacionadas con la presencia del gas Radón en el aire de los espacios interiores. También se ha sugerido la existencia de otras patologías debidas al gas Radón, como el cáncer gástrico (Garzon, et al., 2004).

El Radón y sus progenies radioactivas pueden ingresar al cuerpo a través de la respiración y la ingestión, parte del Radón que se ingiere al tomar agua potable pasa por las paredes del estómago e intestino, después de que entra al torrente sanguíneo, la mayoría de esta sustancia va hacia los pulmones, de donde se exhala al respirar, sin embargo, el Radón que queda experimenta el proceso de desintegración (ATSDR, 1990).

Ante estos riesgos, los servicios geológicos y medioambientales de muchos países del mundo están adelantando similares investigaciones y evaluaciones de los niveles del gas Radón en el aire, el suelo y en las aguas de consumo público, con el fin de establecer los niveles de exposición de las comunidades (Garzon, et al., 2004).

En particular, algunos suministros de agua subterránea (pozos perforados) pueden contener altas concentraciones de Radón, aun así, el riesgo asociado a la presencia de gas Radón en aguas de consumo suele ser bajo comparado con la exposición al gas en un ambiente cerrado, sin embargo es un riesgo particular, puesto que además de la exposición por el consumo del gas disuelto en agua, también se produce otra por la inhalación del Radón liberado del agua (OMS, 2018).

1.2. RADÓN: UN ELEMENTO RADIOACTIVO DE ORIGEN NATURAL

El Radón es un gas radiactivo, incoloro e inodoro¹¹, extremadamente volátil¹², en términos de clasificación química el Radón es un gas noble como el Helio, Neón, Argón, Kriptón y Xenón, por lo cual no reacciona con otros elementos químicos y, por lo tanto, su comportamiento está determinado por procesos físicos y no por las interacciones químicas.

Este elemento es el gas más pesado de los gases inertes, con una densidad de 9.73 kg/m³ a 0°C y ocho veces más pesado que el aire. La concentración del Radón se expresa en unidades

¹¹ Que no tiene olor.

¹² Sustancia que se volatiliza fácilmente en contacto con el aire.

de actividad por unidad de volumen, picroCurios por Litro o pCi/L y en unidades del Sistema Internacional en Becquerelios por Litro o Bq/L (Garzon, et al., 2004).

El Radón forma parte, pero en muy pequeña proporción, de la composición del aire atmosférico. Es, además, incoloro, inodoro e insípido. Su solubilidad en el agua es muy grande, del mismo modo que en otros líquidos, principalmente si son orgánicos. Las Tablas 1.3 y 1.4 recogen algunas características fundamentales de este elemento radioactivo (Quindós, 1995).

Tabla 1.3: Datos físicos del elemento radioactivo Radón (^{222}Rn).

MAGNITUD	VALOR
Densidad a 0 °C y 1 atmósfera	9.73 kg/m ³
Coefficiente de difusión en aire	0.1x10 ⁻⁵ m ² /s
Viscosidad a 20 °C y 1 atmósfera	229.0 microPoises

Fuente: Quindós, 1995.

Tabla 1.4: Solubilidad de Radón (^{222}Rn) en varios medios a 1 atmósfera de presión parcial y 20°C.

MEDIO	VALOR
Agua	230 x10 ⁻⁶ m ³ /kg
Glicerina	13.2 x10 ⁻⁶ m ³ /kg
Aceite	26.0 x10 ⁻⁶ m ³ /kg
Alcohol etílico	7.4 x10 ⁻⁶ m ³ /kg

Fuente: Quindós, 1995.

1.2.1. Procedencia Natural del Gas Radón

El gas Radón con un periodo de semidesintegración de 3.8 días, necesita de otro elemento con un periodo de semidesintegración mucho mayor para ser formado en forma continua, y este es el ^{226}Ra que, a su vez, procede de la desintegración del ^{238}U con una vida media de 4,470 millones de años (véase Figura 1.1). Puesto que la concentración del radioisótopo progenitor permanece prácticamente constante debido a su extensa vida media, en un sistema cerrado se tiende a establecer un equilibrio secular¹³ entre los diferentes radioisótopos de la serie.

¹³ Equilibrio radiactivo en el que la relación de actividades de los nucleidos de una cadena de desintegración es igual a la unidad.

Se ha encontrado Uranio en casi todas las rocas y suelos del planeta y su contenido varía según el terreno, así por ejemplo, como puede observarse en la Tabla 1.5, en suelos de origen arcilloso o granítico la proporción de Uranio es mayor que en suelos de origen basáltico¹⁴ y suelos carbonatados como areniscas, donde el potencial emisor de Radón es pequeño (Fuente, 2016); de allí que concentraciones relativamente altas de Radón están asociadas con ciertos tipos de rocas y depósitos sedimentarios sueltos, y con la presencia de estructuras geológicas particulares, tales como volcanismo y las características tectónicas del área (Mingorance, et al., 2018).

Tabla 1.5: Concentraciones de Uranio y Torio según el tipo de roca y suelo.

TIPO DE ROCA	U^{238}(ppm)	Th^{232}(ppm)
Basálticas	1.0	4.0
Granitos	5.0	12.0
Arcillas	3.7	11.0
Arenas	0.5	1.7
Suelos	1.0	6.0
Ultrabásicas	0.001	0.004

Fuente: Quindós, 1995.

Las fallas o fracturas geológicas permiten la transmisión eficiente del gas Radón a la superficie, lo que frecuentemente resulta en altos niveles de Radón en los gases del suelo, por otra parte, el Radón disuelto en el agua subterránea, puede migrar importantes distancias a lo largo de fracturas en ciertas rocas (como por ejemplo rocas calizas), dependiendo de la velocidad del flujo del fluido (Mingorance, et al., 2018).

Los átomos de Radón que se forman a partir del Radio se desplazan debido a su carácter gaseoso. Se denomina exhalación al parámetro que pondera la cantidad de gas que deja escapar la roca fuente de Radón, y emanación al parámetro que determina el movimiento del Radón entre los poros del terreno hasta alcanzar la superficie terrestre. Se muestra un esquema de ambos procesos en la Figura 1.3 (Mingorance, et al., 2018).

¹⁴ El basalto es una roca ígnea volcánica de color oscuro, de composición máfica (rica en silicatos de magnesio, hierro y en sílice)

Después de la emanación, los átomos de ^{222}Rn en el espacio intersticial pueden ser transportados a la superficie del suelo bien por difusión¹⁵ o por advección¹⁶ a través del terreno, hasta que se desintegran o son finalmente liberados al aire. La advección puede ser significativa en algunos casos debido a grietas superficiales o agujeros, producción de gas, el transporte en el agua o la presencia de grandes espacios vacíos (véase Figura 1.3.b). Sin embargo, en la mayoría de los casos, el mecanismo de transporte dominante es la difusión, por lo que el transporte de Radón comúnmente se conoce como difusión (Fuente, 2016).

1.2.2. Mecanismos de Transporte del Gas Radón en la Corteza Terrestre.

Una vez que el Radón escapa de los granos de mineral de Radio y entra en el espacio de poros, la eficiencia de su transporte hacia la superficie depende de los gradientes de concentración (transporte por difusión) y del movimiento del aire inducido por los gradientes de temperatura y presión (transporte por advección o arrastre) (Fuente, 2016).

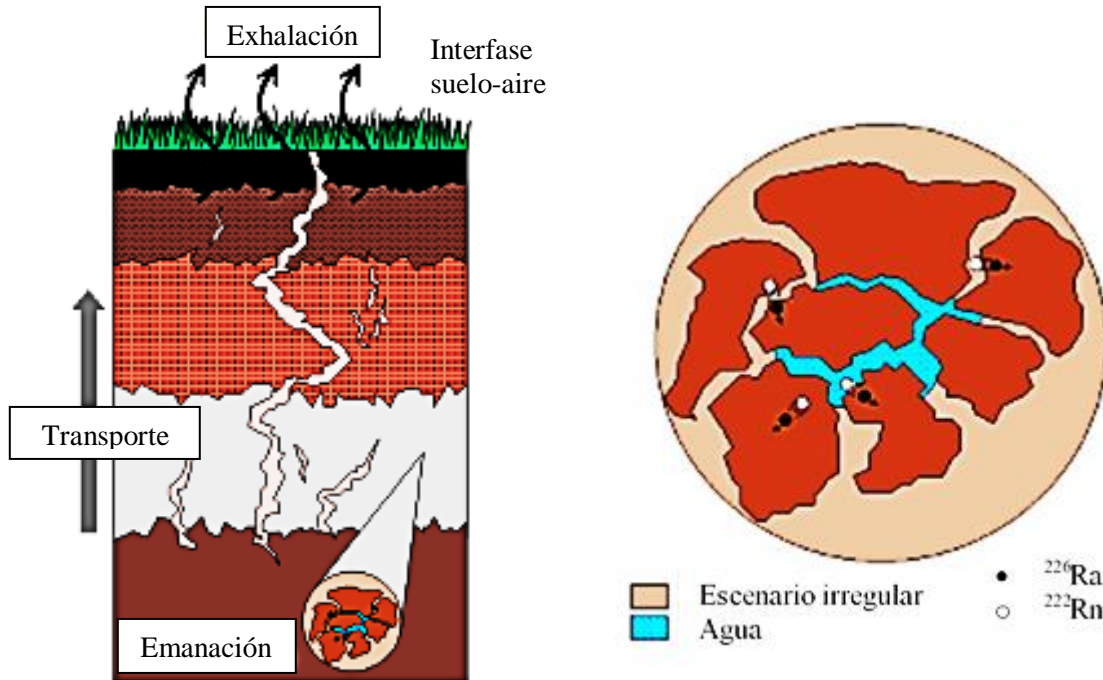
El transporte de Radón por difusión molecular se puede explicar utilizando la primera *ley de Fick* de la difusión (véase la ecuación 1.7) que relaciona el flujo difusivo con la concentración bajo el supuesto de un estado estacionario. La *ley de Fick* postula que el flujo va desde las regiones de alta concentración a las regiones de baja concentración, y su magnitud es proporcional al gradiente de concentración:

$$E = -D_M \nabla C_{Rn} \quad (\text{ec. 1.7})$$

En la ecuación 1.7 E es el flujo o tasa de exhalación de Radón ($\text{Bq}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$), D_M es el coeficiente de difusión molecular del Radón (m^2/s), que caracteriza el proceso de difusión del Radón dentro de un material, y ∇C_{Rn} es el gradiente de la concentración de Radón en el espacio intersticial C_{Rn} (Bq/m^3). El signo negativo en la expresión indica el hecho de que el Radón se difunde desde zonas de concentraciones altas hacia zonas de concentraciones bajas (Fuente, 2016). La migración de gas Radón (^{222}Rn) hasta la superficie depende de varios factores, entre los que destacan: geológicos, meteorológicos y de las características los fluidos en los que se disuelve.

¹⁵ Movimiento de moléculas de una sustancia, gas o líquido, de un medio de menor concentración a un de mayor concentración.

¹⁶ La advección es el transporte de un material o sustancia por medio de un fluido.



- a) Perfil de un suelo donde se señalan los procesos de emanación y exhalación b) Esquema del proceso de emanación del Radón procedente de la desintegración de los átomos de Ra

Figura 1.3: Fenómenos de emanación y exhalación del gas Radón. (Fuente, 2016).

Una vez que el gas Radón escapa desde los minerales, su migración hacia la superficie es controlada por:

- Las características transmisoras del lecho rocoso y del suelo (incluyendo su porosidad y permeabilidad).
- La naturaleza de los fluidos portadores (dióxido de carbono y agua subterránea).
- Los factores meteorológicos (presión atmosférica, viento, humedad relativa, precipitación).
- El ambiente geológico-estructural, sismotectónico e hidrogeológico dominante.

1.2.3. Detección y Cuantificación de ^{222}Rn en Muestras de Agua

La determinación de eventos radiactivos concernientes a ^{222}Rn en muestras de agua se puede llevar a cabo utilizando un espectrómetro de centelleo líquido. Este tipo de detectores se basan en la capacidad que tienen ciertos materiales de emitir un pequeño destello de luz cuando son expuestos a radiación ionizante. Por lo que en el centelleo líquido es necesario una sustancia centelladora en estado líquido; es decir, un líquido (formado por un disolvente

orgánico junto con dos solutos centelladores) encargado de absorber la radiación incidente de la muestra y que al interactuar con la radiación ionizante genere luz; de esta manera, se generan una serie de fotones que pueden ser detectados y medidos instrumentalmente mediante su conversión en impulsos eléctricos (Mosqueda, 2010).

El proceso de centelleo líquido se esquematiza en la Figura 1.4, el cual puede subdividirse en dos fases (Mosqueda, 2010):

- a) **Transformación radiactividad-luz:** el disolvente orgánico transfiere la energía de la radiación ionizante al soluto centellador disuelto (soluto primario), que al perder excitación debe emitir eficazmente una luz, una segunda sustancia centelladora (soluto secundario) capta la luz emitida por el soluto primario y la reemite con una mayor longitud de onda adecuada para su posterior conversión en señal eléctrica.

- b) **Detección y cuantificación instrumental:** la luz de centelleo es convertida en una señal eléctrica por medio de un fotodetector llamado tubo fotomultiplicador, la corriente eléctrica de salida del fotomultiplicador es procesa electrónicamente, primero en una etapa analógica, y luego en otra digital.

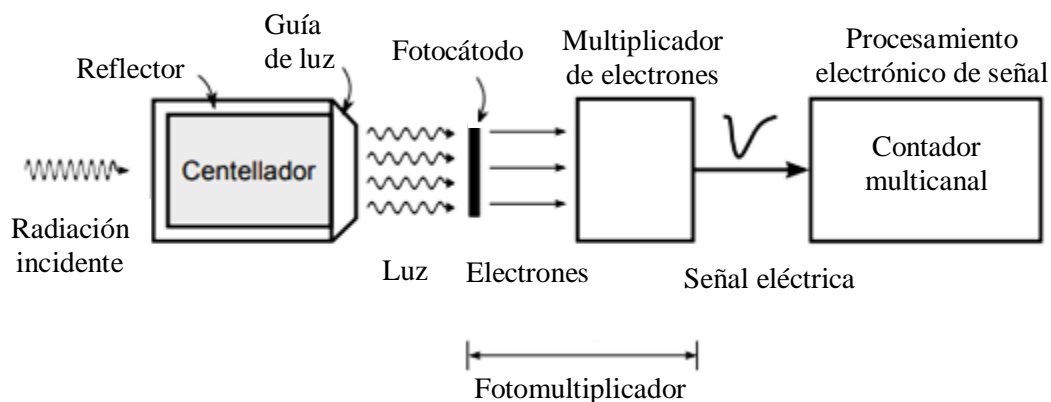


Figura 1.4: Esquema de un detector centellador, acoplado a un fotomultiplicador. (Errico y Giovanetti, s.f.).

Conceptualmente, un fotomultiplicador (PMT, de sus siglas en inglés, *photomultiplier tube*) cuenta con un fotocátodo y un multiplicador de electrones. El primero es una fina capa de un compuesto que emite electrones cuando absorbe fotones en el espectro visible. El segundo, es un arreglo de electrodos conectados a alta tensión que magnifica los electrones incidentes

en el orden de 10^6 (Errico y Giovanetti, s.f.). En la Figura 1.5 se muestra un esquema de un espectrómetro de centelleo líquido.

Las unidades que reporta el instrumento de centelleo líquido se miden en conteos por minuto (CPM). Este es el número de eventos de radiación que registra el instrumento en un minuto. Esto no corresponde necesariamente al número real de eventos (desintegraciones) sino al número de eventos que el aparato detectó (Mosqueda, 2010). El número absoluto de eventos de radiación que se presentan en una muestra se conoce como desintegraciones por minuto (DPM).

1.2.3.1. Descripción física del espectrómetro de centelleo líquido TRI-CARB TR/SL.

En la Figura 1.5 se muestra un esquema del interior del sistema de detección, que puede ser útil a la hora de tener una visión global del mismo, donde, entre otras cosas, puede apreciarse la disposición de los tubos fotomultiplicadores.

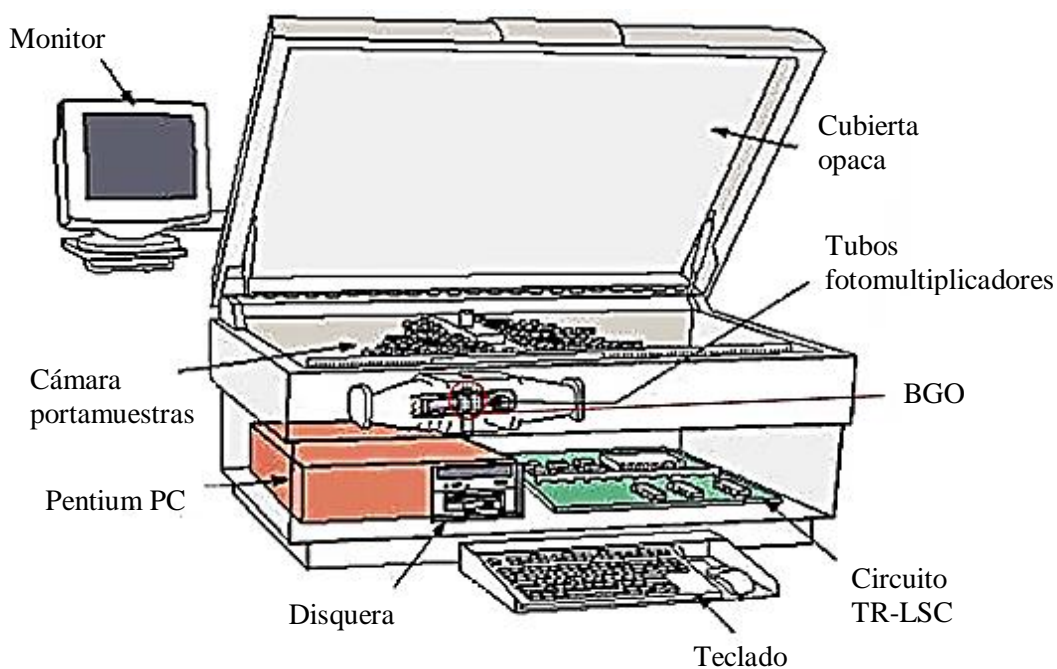


Figura 1.5: Esquema de un espectrómetro de centelleo líquido Tri-Carb (Mosqueda, 2010).

A continuación, y de manera muy breve, se describen los principales componentes de los que consta el citado detector (Mosqueda, 2010):

- a) Está provisto de una unidad de refrigeración, que mantiene todo el recinto, y en particular el lugar que ocupan los dos tubos fotomultiplicadores, a baja temperatura.
- b) Emplea un analizador multicanal multiparámetro y un análisis tridimensional del pulso inicial y de los pulsos retardados, para discriminar, entre eventos reales y pulsos de fondo.
- c) Está equipado con un cargador o transportador de los denominados “cassetts” o portadores de muestra, bidireccional.
- d) El sistema detector está formado por dos tubos fotomultiplicadores (TFM) enfrentados, que actúan en coincidencia. Entre ellos se sitúa el vial con la muestra que se va a analizar.
- e) En la denominada cámara de muestra, en donde se sitúa el vial con la muestra a analizar, se encuentra un detector de guarda, conocido como BGO (óxido de bismuto y germanio), cuya función es la de disminuir los eventos de fondo debidos a la radiación cósmica.

1.3. RADIOISÓTOPOS NATURALES PRESENTES EN EL AGUA

La mayoría de los radionúclidos presentes en el agua provienen de fuentes naturales, transmitidos al agua por ciertos tipos de roca que contienen cantidades de restos de isótopos radioactivos de Uranio. Éste podría llegar a ser un problema serio ya que el agua de consumo humano puede contener sustancias radiactivas (radionúclidos) que podrían presentar un riesgo para la salud humana.

Entre los isótopos presentes en las series radioactivas del ^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th son de especial interés en hidrología subterránea¹⁷ el de ^{226}Ra , el ^{228}Ra y el ^{222}Rn , debido a su solubilidad y por sus efectos nocivos a la salud (OMS, 2018).

Las aguas que circulan por terreno uraníferos¹⁸ pueden llevar cantidades importantes de Rn. Debido a su solubilidad en agua, el Radón se encuentra igualmente tanto en aguas superficiales como en agua subterráneas y del mismo modo que en los suelos, su concentración es muy variable y puede ser considerada una fuente potencialmente importante de exposición del público general a las radiaciones ionizantes naturales (Fuente, 2016).

¹⁷ Es una rama de la Hidrología que trata de las diferentes formas y situaciones del agua bajo la superficie terrestre.

¹⁸ Suelos que contienen Uranio.

El Radón presente en las aguas superficiales, como lagos y ríos, se libera fácilmente en el aire exterior por la agitación a medida que pasa por las rocas y suelos, por ello, las aguas superficiales presentan concentraciones de Radón muy bajas (OMS, 2018), sin embargo, las aguas que se extraen de fuentes subterráneas como manantiales, pozos y sondeos¹⁹ y que fluyen a través de formaciones rocosas que pueden contener Uranio, Radio y Torio, presentan valores más altos (Fuente, 2016).

1.3.1. Límites de Parámetros Radioactivos para el Agua de Consumo Humano

La protección contra las radiaciones se basa en la suposición de que cualquier exposición a la radiación implica cierto nivel de riesgo para la salud. En este sentido la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA) dirige investigaciones para determinar el nivel de un contaminante en el agua potable que es seguro para que una persona lo consuma durante su vida y los niveles que se le pueden requerir razonablemente a los sistemas de abastecimiento eliminar del agua potable, de acuerdo a la tecnología y los recursos actuales. Este nivel seguro se denomina nivel máximo del contaminante (MCL por sus siglas en inglés) (Lesikar, et al., 2006).

Actualmente no existe un MCL para el Radón. Sin embargo, la EPA ha propuesto dos opciones para regular las concentraciones de Radón en el agua potable (Lesikar, et al., 2006):

- i.** La primera opción requiere que los sistemas de agua potable cumplan con un MCL para Radón en agua de 300 pCi/L (11.1 Bq/L).
- ii.** La segunda opción establece un nivel máximo de contaminantes alternativo (AMCL por sus siglas en inglés) en 4,000 pCi/L (148 Bq/L).

Los sistemas públicos de agua en los estados que adoptan programas de mitigación para el Radón (llamados Programas de Mitigación Multimedia) están sujetos al AMCL, mientras que aquellos en los estados que no adoptaron tales programas están sujetos al MCL (EPA, 2012).

Se debe explicar claramente que los niveles de referencia no deben interpretarse como límites obligatorios y que superar un nivel de referencia se puede tomar como un aliciente para hacer una investigación más profunda, pero no es necesariamente una indicación de que el agua de

¹⁹ Es un tipo de pozo con un diámetro aproximado de 180 mm y gran profundidad, de hasta 300 metros.

consumo humano no es segura (OMS, 2018). En las Guías para la calidad del agua de consumo humano de la OMS no se fijan valores de referencia formales para radionúclidos específicos, sino que se utiliza un sistema basado en el análisis de la radiactividad alfa total y beta total en el agua.

1.3.2. Calidad Radiológica del Agua de Consumo Humano

En muchos países el agua potable proviene de fuentes subterráneas como manantiales o pozos. Principalmente en los países en vías de desarrollo las aguas provenientes de dichas fuentes no poseen un abastecimiento satisfactorio (suficiente, seguro y accesible) y además tampoco cuentan con un monitoreo apropiado (el cual es un conjunto de actividades planificadas y rutinarias que se usan para evaluar la eficacia de las medidas de control). En el monitoreo operacional, el proveedor de agua de consumo humano monitorea oportunamente cada medida de control de los aspectos microbiológicos, químicos, radiológicos y aspectos relativos a la aceptabilidad (sabor, olor y apariencia) para permitir una gestión eficaz del sistema y garantizar que se alcancen las metas de protección a la salud.

De acuerdo a los peligros que involucra la falta de cumplimiento por parte de los reguladores del agua y la salud en algunos países acerca de los parámetros a evaluar en el marco regulatorio de normas nacionales que garantizan la calidad y seguridad del agua de consumo humano, la Organización Mundial de la Salud (OMS) en sus *Guías para la calidad del agua de consumo humano* incentiva a que se debe realizar un esfuerzo continuo para mantener la calidad del agua de consumo en el nivel más alto posible.

Estas Guías proporcionan las recomendaciones para gestionar el riesgo de los peligros que pueden comprometer la seguridad del agua de consumo humano, en ellas se explican los criterios que se deben aplicar para poder tener un monitoreo de la contaminación radiológica del agua de consumo humano, los cuales son los siguientes:

- a) Desarrollar monitoreo teniendo en cuenta los recursos disponibles y el potencial de riesgos radiológicos.
- b) Este monitoreo no debe interferir en la evaluación y la gestión adecuada de los riesgos microbiológicos y químicos.

- c) Cuando se considere un nuevo sistema de abastecimiento de agua, se deberán tomar muestras para determinar su idoneidad como fuente de agua de consumo humano en tanto que los sistemas existentes necesitarían ser monitoreados con una baja frecuencia.
- d) La frecuencia de muestreo se deberá reducir si el sistema de abastecimiento de agua tiene características adecuadas y las concentraciones medidas se encuentran siempre por debajo de los niveles de detección.
- e) Sin embargo, la toma de muestras deberá ser más frecuente si existen fuentes cercanas de contaminación potencial por radionúclidos o si se espera que haya cambios rápidos con el tiempo.

Con estos criterios lo que tratan las Guías para la calidad del agua de consumo humano es la protección de la salud pública y una calidad digna de esta (OMS, 2018).

1.3.2.1. Reglamentos de seguridad del agua potable en El Salvador.

La vigilancia de la calidad del agua de consumo humano en El Salvador es responsabilidad del Ministerio de Salud al dictar normas técnicas en materia de salud y ordenar las medidas y disposiciones que sean necesarias para resguardar la salud de la población. La Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) es la responsable de la prestación del servicio de agua potable oportuno y continuo asegurando la calidad de la misma, a través de la ejecución de diversos proyectos de beneficio social para el desarrollo económico del país, para lo cual se hace necesaria la ampliación de coberturas mediante obras de infraestructura que permitan el acceso universal de este bien, así como la ejecución de obras de saneamiento²⁰ que aseguren la calidad de vida y salud de la población (ANDA, 2015).

ANDA utiliza el Reglamento Técnico Salvadoreño RTS 13.02.01:14, el cual tiene correspondencia parcial con las Guías para la calidad del agua potable de la OMS con fin de garantizar la calidad del agua potable. El objetivo principal de este Reglamento es establecer los límites permisibles de los parámetros microbiológicos, físicos, químicos y radiológicos que debe cumplir el agua para el consumo humano; y que debe acatar toda persona natural o jurídica que administra, abastece y opera un sistema de abastecimiento de agua de consumo humano sea público, privado o mixto.

²⁰ Conjunto de obras, técnicas y dispositivos encaminados a establecer, mejorar o mantener las condiciones sanitarias de un edificio, una población, etcétera.

El anexo uno de este Reglamento contempla el Límite Máximo Permisible (LMP²¹) de parámetros para el agua de consumo humano que se solicitarán en situaciones especiales o de emergencias tales como: derrames de plaguicidas, desastres naturales, criterios epidemiológicos²², entre otros. En el apartado cuarto de este primer anexo (véase Tabla 1.6) el reglamento establece un LMP para el Radón en agua de 11.1 Bq/L, en consonancia con el MCL propuesto por la EPA para sistemas públicos de agua que no cuentan con programas de mitigación para el Radón.

Tabla 1.6: Límites de parámetros radioactivos para el agua de consumo humano.

N.º	PARÁMETRO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
1	Alpha total	0.5 Bq/L equivalente a dosis anual
2	Radioactividad Beta total	1 Bq/L equivalente a dosis anual
3	Radio 226	1 Bq/L equivalente a dosis anual
4	Uranio	30 µg/L
5	Radón 222	11.1 Bq/L

Fuente: OSARTEC, 2018.

1.3.2.2. Propuestas de mitigación para Radón en agua de consumo.

Razonablemente, se dispone de medidas simples para disminuir las concentraciones de Radón en un sistema de abastecimiento de agua de consumo humano. La aireación de alto rendimiento es un medio eficaz para la remoción de Radón en los suministros de agua subterránea y puede eliminar hasta 99.9% de Radón. Sin embargo, estos métodos pueden crear una gran fuente de Radón en el aire. La adsorción a través de carbón activado granular, con o sin intercambio de iones, también puede lograr una alta eficiencia de eliminación de Radón, pero es menos eficiente y requiere grandes cantidades de carbón activado granular (OMS, 2018). La OMS propone medidas simples para disminuir las concentraciones de Radón en el agua de consumo humano:

- a) Aireación.
- b) Adsorción a través de carbón activado granular con o sin intercambio de iones.
- c) Agitación y la transferencia de agua de un recipiente a otro.

²¹ Concentración máxima de las características físicas, químicas, y microbiológicas que no causa daño a la salud humana.

²² Distribución, frecuencia y factores determinantes de las enfermedades existentes en poblaciones humanas.

Al dejar reposar el agua también se reducirá la actividad radioactiva del Radón; otra forma es el aumento de la temperatura del agua, ya que la concentración del gas Radón en agua es inversamente proporcional a la temperatura (Quindós, 1995). Pero el problema de aplicar estas acciones correctivas es que si el espacio es confinado se libera en el aire de interior y esto se suma al Radón presente de otras fuentes y da lugar a una dosis mayor de radiación cuando se inhala (OMS, 2018).

CAPÍTULO II METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La geología de El Salvador cuenta con importantes zonas geotérmicas, las cuales son aprovechadas para la generación de energía, esta característica geológica-estructural propicia la presencia de ciertos elementos en la corteza terrestre, como el gas Radón, que al escapar de los minerales que lo forman puede ser arrastrado hasta la superficie gracias a las características del lecho rocoso, del suelo y por la naturaleza de los fluidos portadores como el agua subterránea. La zona hidrotermal del departamento de Ahuachapán cuenta con las características geológicas particulares, tales como: volcanismo, las características tectónicas del área y ciertos tipos de rocas y depósitos sedimentarios sueltos que están asociados con la presencia de gas Radón.

Debido a que el isótopo más importante del gas Radón (^{222}Rn) tiene un tiempo de semidesintegración de 3.824 días, su extracción a partir de muestras de agua para su identificación y la cuantificación de su concentración se lleva a cabo en el lugar de la toma de muestra por medio de un solvente orgánico. El análisis del contenido de gas Radón en muestras de agua superficial, agua subterránea y vapor condensado proveniente de fumarola, ha sido realizado en 12 puntos, los cuales se encuentran distribuidos dentro de una misma microcuenca en la zona hidrotermal del departamento de Ahuachapán. La cuantificación de la actividad de gas Radón en agua ha sido realizado aplicando la técnica analítica de centelleo líquido, utilizando un espectrómetro de centelleo líquido modelo Tri-Carb 2100TR en el Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, en la Universidad de El Salvador (CIAN-FIA-UES), el cual proporciona el número de cuentas o eventos radioactivos ocurridos en el analito de una muestra de agua.

Para obtener resultados de concentración de gas Radón (^{222}Rn) en las muestras analizadas de las distintas matrices de agua, se ha puesto en marcha el método estándar para Radón en agua potable ASTM D5072-09 (2016) publicado en 2009 y revisada en 2016 por *ASTM International*. El método consiste en un procedimiento normalizado para la determinación de Radón (^{222}Rn) en agua de consumo humano, en donde se aprovecha la solubilidad del gas Radón en solvente orgánico para separarlo de la muestra y cuantificarlo en un equipo de centelleo líquido.

2.1. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Salvador está ubicado en América Central, limitado al Norte y el Este por Honduras, al Oeste por Guatemala y al Sur por el Océano Pacífico. Tiene un territorio de 21,040 km² y tiene una población de aproximadamente 7 millones de habitantes. Dos cadenas montañosas atraviesan el país de Este a Oeste dejando entre las mismas una meseta de unos 600 metros de altitud. Hay 21 volcanes activos por lo que las erupciones son relativamente frecuentes. Se encuentra ubicado en el “Cinturón de Fuego” del Pacífico por lo que es un país sujeto a frecuentes movimientos telúricos de origen volcánico, los sismos son frecuentes y de intensidad variable.

El Salvador está situado en el margen tectónicamente activo entre las placas del Coco y el Caribe y la actividad geotérmica de alta temperatura en El Salvador se concentra alrededor de las zonas de subducción de las placas. Los procesos geológicos y tectónicos de ambos márgenes de la placa contribuyen directamente a la generación de los principales motores de los recursos geotérmicos: el calor y la permeabilidad de la roca (Salazar, 2017). La Figura 2.1 muestra un mapa geológico de El Salvador, en el cual se puede observar la litología y las fallas presentes en el país, que permiten caracterizar y delimitar la zona de estudio.

2.1.1. Geología de la Zona Hidrotermal “El Playón”, Ahuachapán

La zona hidrotermal El Playón se encuentra ubicada en el departamento de Ahuachapán, en la zona occidental de El Salvador. Ahuachapán limita al noroeste con Guatemala, al suroeste con el Océano Pacífico, al Sureste con el departamento de Sonsonate y al noroeste con el departamento de Santa Ana. Posee una extensión territorial de 1,239.6 km² (correspondiendo al área rural 1,234.24 km² y al área urbana 5.38 km²). La ciudad de Ahuachapán es una de las más antiguas de El Salvador y al mismo tiempo de mayor densidad demográfica. En la parte occidental del país, donde se encuentra ubicada el área de estudio, afloran principalmente productos volcánicos formados durante el pleistoceno²³ (cuaternario). Las rocas son producto de la intensa actividad volcánica del arco volcánico activo de El Salvador.

²³ El Pleistoceno es una división de la escala temporal geológica que pertenece al período Cuaternario, comienza hace 2.59 millones de años y finaliza aproximadamente en el 10,000 a. C.

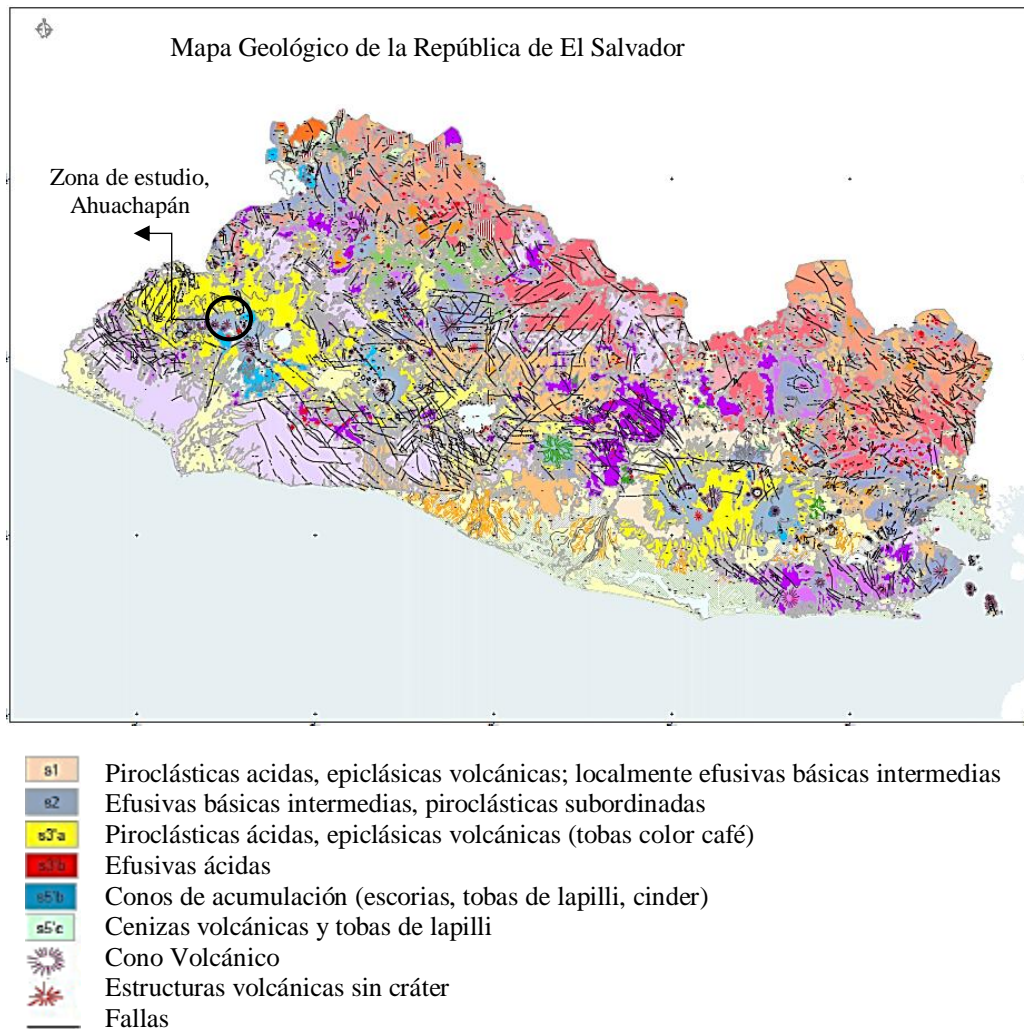


Figura 2.1: Mapa geológico de la República de El Salvador (Bosse, et al., 1978).

La zona de estudio está compuesta por depósitos volcánicos pertenecientes a la formación Cuscatlán principalmente la unidad C3 (véase la Figura 2.1) y a la formación San Salvador, la cual abarca las unidades litológicas S1, S2 y S3 de edad cuaternaria. La unidad C3 (formación Cuscatlán) está compuesta por depósitos lávicos efusivos de composición básica a intermedias que correspondían a edificios volcánicos antiguos. La unidad S1 corresponde a depósitos volcánicos ácidos, principalmente a flujos piroclásticos, los cuales han sido asociados a la formación de la caldera de Ataco que emitió flujos piroclásticos y grandes volúmenes de depósitos de pómez de caída. La unidad S2 está compuesta por rocas volcánicas efusivas básicas a intermedias que comprenden los edificios volcánicos Laguna Verde, Las Ninfas, Hoyo Cuajuste y Las Ranas, en donde se observan flujos lávicos basálticos y andesíticos que

están asociados a la actividad volcánica post caldera. La unidad S3 corresponde a rocas piroclásticas²⁴ de composición ácidas y a epiclastitas²⁵ volcánicas más recientes.

La Figura 2.2 muestra un mapa geológico de Ahuachapán, junto con los sitios de muestreo seleccionados para la investigación, dentro de los cuales se encuentran fuentes superficiales (Río Cashalate, Agua Shuca, Apunia y El Cashal) fuentes subterráneas (Pozo Colonia San Luis #2, Pozo Mirasol y Pozo Instituto Agrícola) y vapor condensado proveniente de fumarola (fumarola El Sauce y fumarola El Playón).

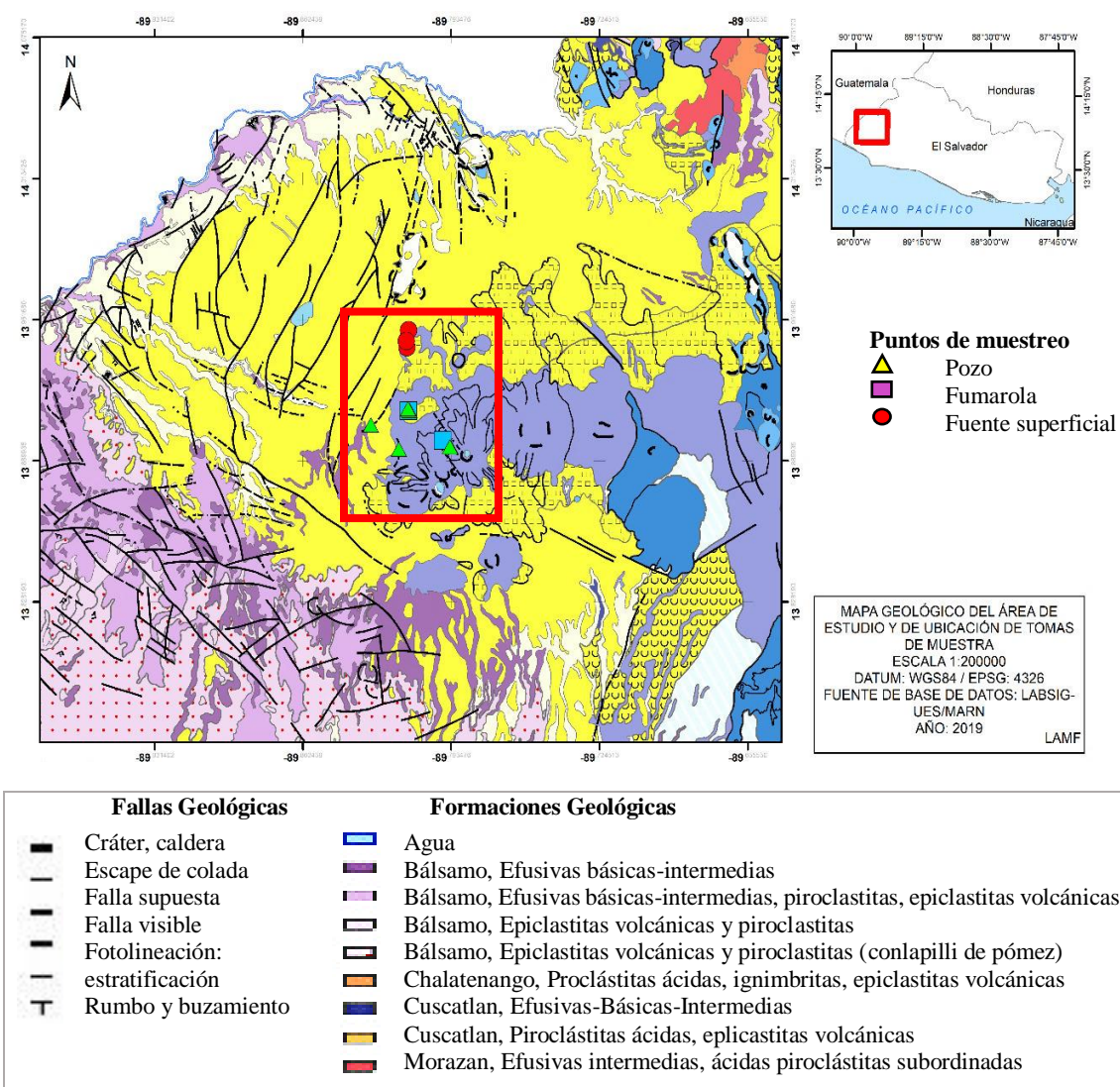


Figura 2.2: Mapa geológico del área de estudio, Ahuachapán (Bosse, et al., 1978).

²⁴ Cualquier fragmento sólido de material volcánico expulsado a través de la columna eruptiva. (Matus, 2019)

²⁵ Roca ígnea volcánica, ligera, de consistencia porosa, formada por la acumulación de cenizas.

2.2. DESCRIPCIÓN HIDROLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio tiene diferentes matrices de agua, las cuales son: aguas superficiales, aguas subterráneas y vapor condensado proveniente de fumarola de la zona hidrotermal El Playón, todas estas matrices se encuentran dentro de la misma microcuenca, la cual se presenta en la Figura 2.3.

Los puntos de muestreo se presentan en el Anexo F sobre un mapa hidrológico de la parte occidental del país, en el cual puede observarse que en la zona de estudio predominan los acuíferos de unidades volcánicas fisuradas de extensión limitada y los acuíferos porosos de gran extensión; los materiales que forman las unidades volcánicas pueden presentar conductividades hidráulicas de medianas a altas, como consecuencia de su porosidad secundaria (fallamiento existente), por otra parte, la conductividad hidráulica en las unidades porosas constituidas por materiales piroclásticos aglomerados y retrabajados (pómez, lapillo, tobas) pueden variar de medianas a bajas, como consecuencia al grado de cementación o Compactación que pueden tener los granos.

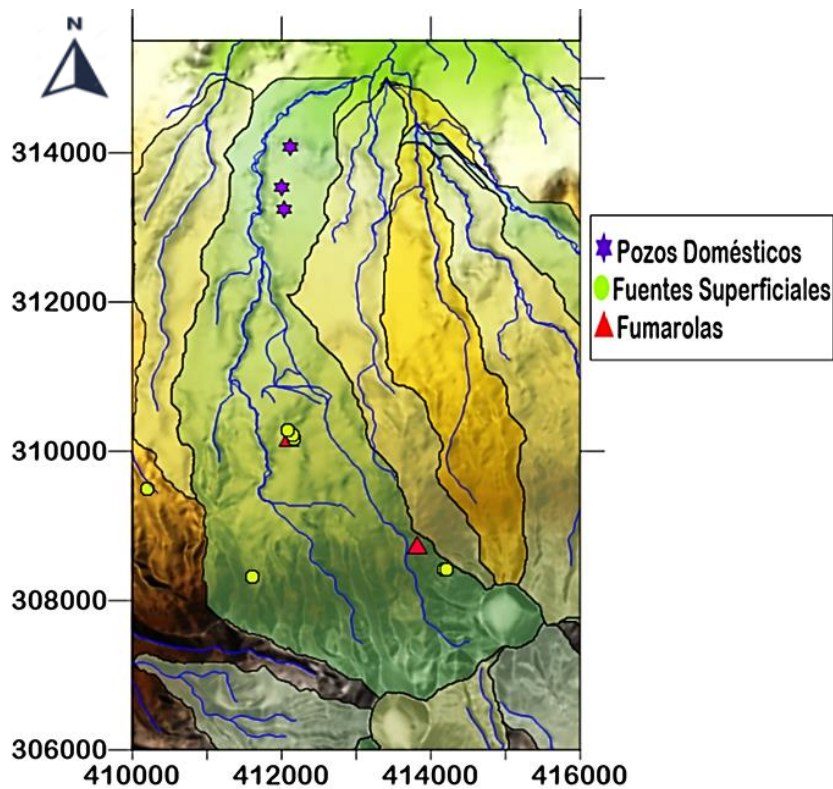


Figura 2.3: Distribución de microcuencas en el sitio de estudio (Matus, 2019).

2.2.1. Selección de Puntos de Muestreo en la Microcuenca, Ahuachapán

Se seleccionó la microcuenca donde se encuentra localizada la zona hidrotermal El Playón y apoyándose en el criterio de los expertos del área geoquímica de LaGeo, se evaluaron doce puntos de las distintas matrices: tres de agua subterránea (pozos de uso doméstico), siete de agua superficial y dos fumarolas. La Figura 2.3 también muestra el mapa de la zona de estudio junto con la ubicación de los puntos de muestreo seleccionados.

2.2.1.1. Puntos seleccionados dentro de la microcuenca de estudio.

Los doce puntos de muestreo que fueron seleccionados aparecen en la Tabla 2.1 con su respectiva clasificación según el tipo de fuente (Subterránea, superficial, superficial con influencia hidrotermal y manifestaciones hidrotermales), el nombre clave para identificar cada punto de muestreo de acuerdo a su ubicación y su emplazamiento geográfica por medio del sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (*Universal Transverse Mercator*, UTM).

Tabla 2.1: Puntos de muestreo tomados dentro de la microcuenca durante la investigación.

NOMBRE DEL SITIO	TIPO DE FUENTE	COORDENADAS “X”	COORDENADAS “Y”
Pozo Col. San Luis #2	Subterránea	412031	313249
Pozo Instituto Agrícola	Subterránea	412116	314071
Pozo Mirasol	Subterránea	412000	313538
Agua Shuca	Superficial (con influencia hidrotermal)	411605	308317
Fuente El Cashal	Superficial	414206	308424
Fuente El Cashal Caliente	Superficial	414181	308424
Río Apunia	Superficial	410202	309497
Río Los Ausoles “A”	Superficial	412161	310173
Río Los Ausoles “B”	Superficial	412145	310210
Río Los Ausoles “C”	Superficial	412080	310279
Fumarola El Playón	Manifestación Hidrotermal	412103	310183
Fumarola El Sauce	Manifestación Hidrotermal	413816	308739

2.2.2. Características de las Fuentes de Agua Superficial y Subterránea Dentro de la Microcuenca de Estudio, Ahuachapán

El ciclo hidrológico del agua, es el responsable de las aguas superficiales y subterráneas, ya que una parte de la precipitación caída (lluvia,) fluye por la superficie terrestre formando corrientes (arroyos y ríos). Otra parte de la precipitación caída se infiltra en el suelo, rellenando poros y fisuras como puede observarse en la Figura 2.4. Cuando éstos se saturan, el agua fluye por gravedad hacia los manantiales, ríos o mares, dando lugar a las aguas subterráneas. Ambas fuentes provienen del mismo fenómeno (ciclo hidrológico) por tal motivo están muy relacionadas entre sí; es muy frecuente que el agua subterránea emerja en fuentes superficiales (siguiendo un recorrido superficial), también puede ocurrir lo contrario que el agua superficial se infiltre, formando posteriormente parte del agua subterránea.



Figura 2.4: Ciclo hidrológico del agua (Aguamarket, 2019).

En muchas ocasiones, las aguas superficiales ofrecen una desembocadura natural de las corrientes subterráneas, por esta razón las fuentes superficiales siguen fluyendo, aunque pasen prolongados períodos sin lluvias. En el trayecto de muchos ríos la relación entre las aguas superficiales y subterráneas resulta muy evidente, cuando el agua circula por el lecho fluvial de un cauce formado sobre un terreno permeable no consolidado, una parte del fluido del río se infiltra rellenando los poros del terreno, formando una zona no saturada la cual corre a la par del río superficial, pero a menor velocidad que el agua superficial. Cuando el nivel del agua se acomoda por debajo de la superficie del cauce, la totalidad del agua es subterránea (Aguamarket, 2019).

Las aguas subterráneas y superficiales, están formadas por sustancias disueltas las cuales se encuentran en estado iónico, los iones fundamentales que podemos encontrar son los siguientes: aniones como los Cloruros Cl^- , Sulfatos SO_4^{2-} y Bicarbonatos CO_3H^- y Cationes como Sodio Na^+ , Calcio Ca^{++} y Magnesio Mg^{++} , forma casi la totalidad de los iones disueltos. Además, también podemos encontrar gases anhídrido carbónico (CO_2) y el Oxígeno disuelto (O_2). Uno de los aniones más importantes es el Ion Cloruro (Cl^-) ya que permite caracterizar químicamente el tipo de agua que se requiere analizar. El Cl^- posee sales en general muy solubles, es muy estable en disolución y muy difícilmente precipitable. Además de ser muy inerte ya que no se oxida ni reduce en aguas naturales.

El Oxígeno disuelto (O_2) produce un medio oxidante y juega un papel importante en la solubilización o insolubilización de iones que cambian con facilidad de valencia, su ausencia puede dar origen a fermentaciones anaerobias en el agua.

Las características fisicoquímicas del agua también es importante medirlas, la temperatura se define como el potencial calorífico referido a un cierto origen, por ejemplo, la temperatura de fusión del hielo. Las aguas subterráneas tienen una temperatura muy poco variable, y responde a la media anual de las temperaturas atmosféricas del lugar, incrementando en el producto de la profundidad por el gradiente geotérmico

Por otro lado, la conductividad eléctrica se define como la capacidad de un agua para conducir electricidad; se mide como la conductividad que existe entre dos electrodos paralelos de 1 cm^2 de superficie cada uno y separados 1 cm situados en el seno del agua a medir de forma que el medio se pueda considerar infinito. La conductividad crece con la temperatura y es preciso tomar una temperatura de referencia, que suele ser 18°C o 25°C ; además, crece con el contenido en iones disueltos. A una misma temperatura, en la conductividad de un agua influye no sólo la concentración iónica, sino el tipo de iones (carga eléctrica, estado de disociación, movilidad, etc.).

El potencial hidrógeno (pH) es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución y se define como el logaritmo negativo de la concentración molar de los iones hidrógeno. Esto es:

$$pH = -\log [H^+] \quad (\text{ec. 2.8})$$

El pH crece con el aumento de la temperatura y por tanto hay que darlo referido a cierta temperatura. Por lo general, varía entre 6.5 y 8 en las aguas subterráneas (Custodio, 2001).

En la Tabla 2.2 se describen las fuentes de agua subterráneas objeto de estudio en esta investigación, las cuales consisten en pozos perforados y otros excavados pertenecientes a directivas comunales, de los cuales suministran agua utilizada por la población para consumo humano y demás necesidades.


Tabla 2.2: Fuentes de agua subterránea dentro de la microcuenca de estudio, Ahuachapán.

DESCRIPCIÓN	SITIO DE MUESTREO
<p>Nombre del sitio: POZO MIRASOL Tipo de fuente: Fuente Subterránea Ubicación: Cantón Santa Rosa Acacalco Profundidad del Pozo: 149.5 metros Año de perforación: 1999 Personas beneficiadas con el servicio: 120 familias Temperatura promedio: 28.2 °C</p>	
<p>Nombre del sitio: POZO INSTITUTO AGRÍCOLA Tipo de fuente: Fuente Subterránea Ubicación: Instituto Nacional Luis Reynaldo Tobar. Llano de Doña María Profundidad del Pozo: 71.89 metros Año de perforación: 1986 Personas beneficiadas con el servicio: 280 alumnos Temperatura promedio: 27.7 °C</p>	
<p>Nombre del sitio: POZO SAN LUIS Tipo de fuente: Fuente Subterránea Ubicación: Colonia San Luis Profundidad del Pozo: 105 metros (75 artesanales) Personas beneficiadas con el servicio: 150 socios, aproximadamente 1500 personas Temperatura promedio: 29.7 °C</p>	

Las fuentes de agua superficial en estudio se describen en la Tabla 2.3, las fuentes denominadas “El Cashal” y “Apunía”, son sitios de donde se bombea agua para el consumo humano a distintas comunidades del municipio de Ahuachapán, estas fuentes son administradas por ANDA.

Los puntos de muestreo denominados “Cashal Caliente” y “Agua Shuca” han sido seleccionados de acuerdo a sus características físicas, las cuales evidencian una influencia o mezcla por aguas geotérmicas o vapor geotérmico.

Tabla 2.3: Fuentes de agua superficial dentro de la microcuenca de estudio, Ahuachapán.

DESCRIPCIÓN	SITIO DE MUESTREO
<p>Nombre del sitio: CASHAL FUENTE Tipo de fuente: Fuente Superficial Ubicación: Cantón Zuntecumat Personas beneficiadas con el servicio: Cantón El barro, Caserío Cerro Blanco, Planta El Cantón Sunsutucupac, Cashal, Cantón El Barro y los Maguyes. Temperatura promedio: 22.5 °C</p>	
<p>Nombre del sitio: CASHAL FUENTE CALIENTE Tipo de fuente: Manifestación Hidrotermal Ubicación: Cantón Zuntecumat Temperatura promedio: 38.4 °C</p>	
<p>Nombre del sitio: FUENTE AGUA SHUCA Tipo de fuente: Manifestación Hidrotermal Ubicación: Agua Shuca Temperatura promedio: 56.9 °C</p>	
<p>Nombre del sitio: APUNIA Tipo de fuente: Fuente Superficial Ubicación: Río Molino Personas beneficiadas con el servicio: Temperatura promedio: 24 °C</p>	

Continúa...

Tabla 2.3: Fuentes de agua superficial dentro de la microcuenca de estudio, Ahuachapán. Continuación.

DESCRIPCIÓN	SITIO DE MUESTREO
<p>Nombre del sitio: RÍO LOS AUSOLES A Tipo de fuente: Fuente Superficial Ubicación: Río Cashalate, El Playón Temperatura promedio: 27.6 °C</p>	
<p>Nombre del sitio: RÍO LOS AUSOLES B Tipo de fuente: Fuente Superficial Ubicación: Río Cashalate, El Playón Temperatura promedio: 34.7 °C</p>	
<p>Nombre del sitio: RÍO LOS AUSOLES C Tipo de fuente: Fuente Superficial Ubicación: Río Cashalate, El Playón Temperatura promedio: 31.3 °C</p>	

2.2.3. Vapor Condensado Proveniente de Fumarola El Playón y Fumarola El Sauce

Una fumarola es básicamente un conducto de emisión de gases, no explosivo, presente tanto en volcanes activos como en aquellos que, aunque se consideren extinguidos mantienen procesos de desgasificación y enfriamiento del magma. Las fumarolas emiten tanto gases magmáticos como vapor de agua generado por calentamiento de los acuíferos por contacto de las rocas confinantes con la intrusión de magma.

Las fumarolas esquematizadas en la Figura 2.5 son manifestaciones hidrotermales las cuales están asociadas a sistemas geotérmicos. Los sistemas geotérmicos son sistemas naturales los cuales están formados por los siguientes elementos: cuerpo de roca caliente, fluido y permeabilidad.

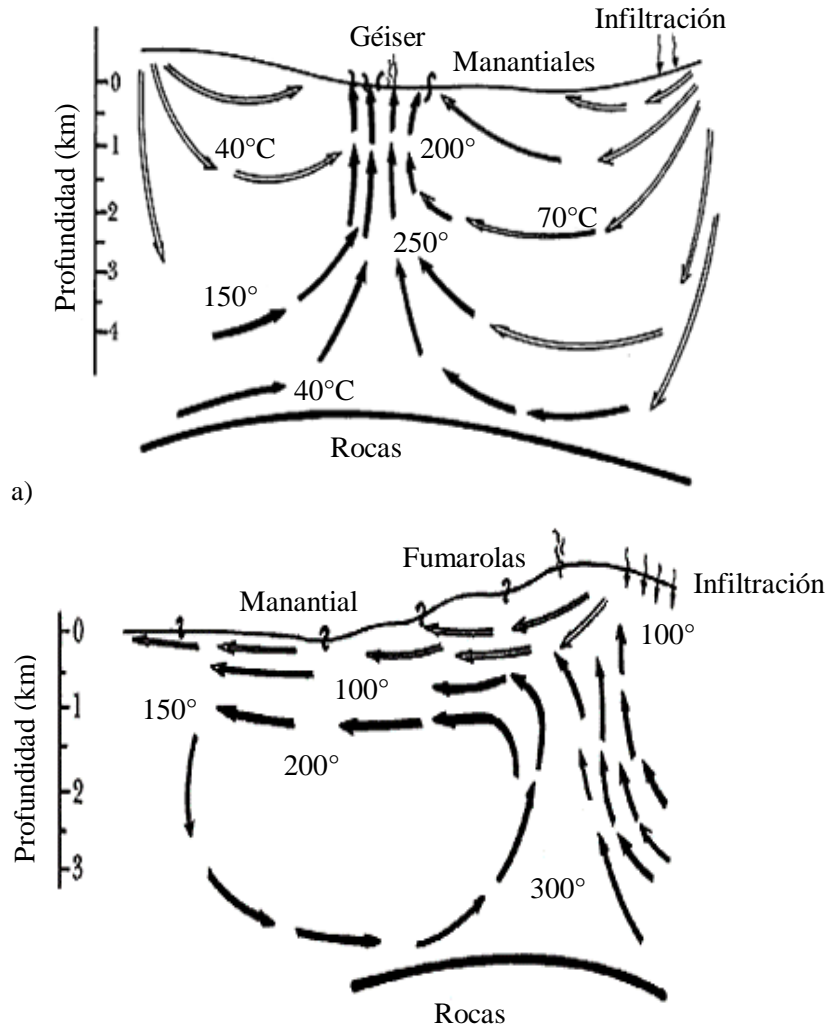


Figura 2.5: Cortes transversales de sistemas geotérmicos: a) Plano b) Montañoso (ILCE, 2019)

Cuando entre los estratos rocosos del subsuelo existe una zona permeable asociadas a fallas normales, fracturas, contacto litológico, intersección de fallas, rocas porosas las cuales permite la infiltración de un fluido (agua meteórica, agua de mar o agua magmática) el cual desciende por gravedad a capas más profundas, (véase la Figura 2.5) el fluido fluye hasta llegar a un estrato de roca sólida o impermeable la cual lo confina, el fluido es calentado por medio del calor proveniente de:



- a) Tensiones y fricción de los movimientos de la tierra que calientan las rocas a lo largo de las zonas de corte.

- b) Reacciones químicas dentro de la tierra que liberan el calor y la proximidad de cuerpos calientes de roca de origen volcánico.

Además, posee una presión de alojamiento mayor que la atmosférica, el fluido es calentado a altas temperaturas y presurizado lo cual genera que el fluido disminuya su peso específico y permita que el fluido ascienda a la superficie (zona de ascenso) a través de fracturas, fallas o rocas permeables del subsuelo, el ascenso de fluido es a profundidades desde 1.5 km hasta 5 km, conteniendo gases disueltos como: CO₂, H₂S, HCl, HF, etc. y elementos como: Cl, Na, Ca, K, Fe, Mg, Al, SiO₂, etc. Las manifestaciones termales pueden ser: pozas de lodo, pozas calientes, suelos vaporizantes, agua caliente, fumarolas, ausoles o géiser (LaGeo, 2019).

En la Tabla 2.4 se presentan las fumarolas localizadas dentro de la zona hidrotermal del departamento de Ahuachapán, de las cuales se ha obtenido vapor condensado para analizar sus concentraciones de gas Radón y parámetros fisicoquímicos.

Tabla 2.4: Fumarolas El Playón y El Sauce muestreadas para obtener vapor condensado.

DESCRIPCIÓN	SITIO DE MUESTREO
<p>Nombre del sitio: FUMAROLA EL SAUCE Tipo de fuente: Manifestación Hidrotermal Fumarola Ubicación: El Sauce</p> <p>Temperatura promedio: 96.6 °C</p>	 <p>A photograph showing a fumarole site with a small, shallow crater in the ground. The ground is rocky and sandy. A large, light-colored rock is visible in the background. The site is located in a natural, outdoor setting.</p>
<p>Nombre del sitio: FUMAROLA EL PLAYÓN Tipo de fuente: Manifestación Hidrotermal Fumarola Ubicación: El Playón</p> <p>Temperatura promedio: 98.0 °C</p>	 <p>A photograph showing a fumarole site with a small, shallow crater in the ground. The ground is rocky and sandy. A person's leg and foot are visible in the background, indicating the site is accessible. The site is located in a natural, outdoor setting.</p>

2.3. MÉTODOS DE MUESTREO PARA LA CUANTIFICACIÓN DE GAS RADÓN EN MUESTRAS DE AGUA

La recolección de muestras para el análisis de Radón se ha realizado en el sitio de muestreo, por lo tanto, antes de describir la metodología de muestreo se presenta el procedimiento para la preparación de los viales de centelleo (véase la Figura I-4 del Anexo I) en donde se introduce la muestra de agua con el objeto de extraer el Radón de la muestra lo más pronto posible.

2.3.1. Preparación de Viales de Centelleo Líquido

Una muestra de agua se analiza en el instrumento de centelleo líquido dentro de un vial de centelleo, el cual contiene 10 ml de un coctel de centelleo y 10 ml de la muestra de agua. Como puede observarse en la Figura 2.8 estos viales son llenados en el punto de muestreo y transportados a una temperatura menor a la temperatura ambiente.

En este proceso, el elemento fundamental es el coctel de centelleo, ya que es el encargado de absorber la radiación incidente y producir los fotones de luz. A continuación, se describe el procedimiento para preparar la solución centelladora en base a 1 litro de tolueno, utilizando los componentes presentados en la Tabla 2.5.

- i. En un beaker se añadió 250 ml de tolueno como solución orgánica del líquido centellador.
- ii. Utilizando una balanza analítica se pesaron 0.05 g de POPOP y 0.5 g de PPO por litro de solvente.
- iii. Con una cámara extractora de gases se llevó a cabo la dilución de los solutos centelladores en la solución de tolueno.
- iv. En viales de vidrio se añadieron, utilizando una pipeta graduada, 10 ml de la solución centelladora por cada vial, dentro de la cámara extractora de gases.

Tabla 2.5: Compuestos químicos utilizados en una solución centelladora.

COCTEL DE CENTELLEO		ABREVIATURA	CONCENTRACIÓN
Solvente	Tolueno	$C_6H_5CH_3$	99.8%
Centellador primario	2,5-Difeniloxazol	PPO	4g/1000ml
Centellador secundario	1,4-Bis-2-(4-metil-5-feniloxazolil)-benceno	Dimetil POPOP	0.1g/1000ml

2.3.2. Metodología de Muestreo para Vapor Condensado Proveniente de Fumarola

Para muestras de vapor y gas no es necesario realizar ningún análisis o tratamiento de muestras in situ. La Figura 2.6 muestra el esquema de recolección de vapor condensado proveniente de fumarola.

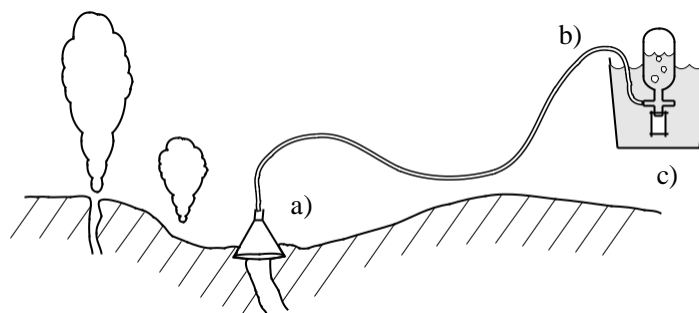


Figura 2.6: Recolección de vapor condensado proveniente de fumarola (Arnórsson, et al., 2006).

- i.** Se limpió el área donde se colectará la muestra para evitar contaminación de la misma. Se conectó el embudo con una manguera especial para condensado y posteriormente se colocó el embudo en el área previamente preparada (como se muestra en la Figura 2.6 a). 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.
- ii.** Se utilizó una ampolla de dos salidas de 250 ml para condensar el vapor de fumarola, para ello, se conectó la manguera a una de las salidas dejando la otra abierta para permitir la condensación del vapor (se puede observar en la Figura 2.6 b).
- iii.** Posteriormente, se introdujo la ampolla en un balde con agua fría esto con el fin de enfriar la muestra (ya que la temperatura de la muestra es arriba de los 95°C) y se esperó a coleccionar 250 ml de vapor condensado (la Figura 2.6 c).
- iv.** 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.

Las muestras de vapor condensado de fumarola se realizaron por duplicado, en total se condensaron 500 ml de vapor, la ampolla tiene capacidad para 250 ml, por lo tanto, se tomó una muestra de los primeros 250 ml condensados y la segunda muestra fue de los 250 ml restantes, esto con el fin de observar la similitud o discrepancia en la concentración de Radón en las mismas.

2.3.3. Metodología de Muestreo para Aguas Subterráneas

Los instrumentos empleados para la toma de muestra de agua para su combinación con coctel centellador en el sitio de muestreo en viales de vidrio, se detallan a continuación:

- a) Embudo de muestreo.
- b) Tubo, con grifo estándar.
- c) Jeringa desechable, capacidad de 12 ml, con calibre 20, 38 mm aguja hipodérmica.
- d) Viales de centelleo líquido de vidrio, 20 ml de capacidad con revestimiento interior de polietileno.

Para el muestreo del agua proveniente de pozos perforados se construyó un instrumento para la recolección de la muestra con una manguera común de riego y un embudo como se muestra en la Figura 2.7. Se conectó el instrumento al grifo y se abrió lentamente hasta permitir el flujo de agua y su acumulación en el embudo. El flujo se ajustó a un nivel que no causara turbulencia en el agua contenida en el embudo y permitiendo que el exceso de agua se derramara sobre el borde del embudo.



Figura 2.7: Instrumento de colección de muestra de agua utilizada para consumo humano.

En este proceso, se verificó que el sistema tuviera la menor cantidad posible de burbujas de agua y se midió la temperatura mientras el agua fluía. Se colocó la punta de la aguja hipodérmica aproximadamente 3 cm debajo de la superficie del agua en el embudo y se retiraron unos pocos ml de agua mientras se deja correr el agua. Con este procedimiento, se enjuagó la jeringa y la aguja hipodérmica tres veces. Luego de ambientar, se colocó de nuevo la punta de la aguja aproximadamente 3 cm debajo de la superficie del agua y se tomaron 12 ml de agua, a pesar de que solo se utilizaron 10 ml de muestra se tomó un excedente para eliminar burbujas de aire que pudiesen haber estado presentes. Es importante desechar cualquier exceso y conservar exactamente 10 ml de la muestra de agua.

Se retiró la tapa de un vial de centelleo (véase la Figura 2.8), se colocó con cuidado la punta de la aguja en el fondo de la solución líquida de centelleo, se vacía lentamente el agua de la jeringa en el vial y una vez finalizado se volvió a colocar la tapa reforzándola con cinta teflón para evitar cualquier tipo de fuga. Las muestras se tomaron por duplicado.



Figura 2.8: Llenado de un vial de vidrio con muestra de agua para su análisis por centelleo líquido.

2.3.4. Metodología de Muestreo para Agua Superficial

Para la toma de muestras en Aguas Superficiales, se utilizó un beaker de plástico. Se introdujo el beaker en el fluido de la fuente superficial evitando burbujeo y turbulencia (véase la Figura I-5 del Anexo I). Se ambientó la aguja tres veces y luego se procedió a la toma de la muestra, para ello 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.

2.3.5. Metodología de Muestreo para Análisis Físicoquímicos en Muestras de Agua Superficial, Subterránea y Vapor Condensado Proveniente de Fumarola

Los análisis para los parámetros físicoquímicos (pH, Cloruros, Sólidos Totales Disueltos, Conductividad, Conductividad Específica) se realizaron en el laboratorio del CIAN-FIA-UES por medio de la sonda *YSI Professional Plus* (medidor portátil multiparamétrico de calidad del agua), el cual se muestra en la Figura 2.9. La medición de los parámetros se realizó un día después de la toma de muestra, recolectadas en recipientes plásticos de 200 ml de capacidad y transportadas a temperatura ambiente. La temperatura de cada muestra corresponde a la de su fuente o matriz de agua, esta medición se realizó en el lugar de muestreo antes de la toma de muestra. El procedimiento para la colección de muestras para analizar los parámetros físicoquímicos se describe a continuación:

- i. Se ambientó el recipiente enjuagándolo por hasta tres veces con agua del punto de muestreo correspondiente.
- ii. En el caso de las fuentes superficiales, se introdujo el recipiente hasta que el nivel del agua alcanzara la boquilla y sin causar burbujeo se prosiguió a llenar el recipiente (véase la Figura I-6 del Anexo I). En el caso del vapor condensado de fumarola se trasvasó directamente de la ampolla de dos salidas.
- iii. Se etiquetó y almacenó para su transporte y posterior análisis.



Figura 2.9: Medidor portátil multiparamétrico *YSI Professional Plus*, del CIAN-FIA, UES.

2.4. METODOLOGÍA PARA EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE GAS RADÓN (^{222}Rn) EN MUESTRAS DE AGUA

Los análisis de las muestras de agua recolectadas en viales de vidrio para la detección de ^{222}Rn se realizaron con un espectrómetro de centelleo líquido Tri-Carb 2100TR que se muestra en la Figura 2.10 perteneciente al Centro de Investigación y Aplicaciones Nucleares de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura en la Universidad de El Salvador.



Figura 2.10: Espectrómetro de centelleo líquido (Tri-Carb 2100TR) del CIAN-FIA-UES.

2.4.1. Método ASTM D5072-09 (2016) Para la Cuantificación de gas Radón (^{222}Rn) en Muestras de Agua

El método estandarizado utilizado para la medición de Radón en muestras de agua es el ASTM D5072-09 (2016) “*Standard Test Method for Radon in Drinking Water*” publicado en 2009 y revisado en 2016. Las ventajas de este método son la sensibilidad, preparación rápida de la muestra, es libre de autoabsorción de partículas α y contaminación interna del equipo de medición (ASTM Standards, 2016).

El método consiste en un procedimiento normalizado para la determinación de Radón (^{222}Rn) en agua de consumo humano, en donde se aprovecha la solubilidad del gas Radón en solvente orgánico (véase la sección 2.3.1) para separarlo de la muestra; agilizando este proceso mediante la agitación del vial de centelleo, el cual contiene la muestra de 10 ml de agua y 10 ml del coctel centellador, posteriormente se analizan en el equipo de centelleo líquido (véase la Figura 2.10).

2.4.1.1. Modificaciones a la metodología ASTM D5072-09 (2016) para la cuantificación de gas Radón (^{222}Rn).

En esta investigación las muestras se realizaron en matrices de agua subterránea y superficial provenientes de pozos domésticos, vapor condensado proveniente de fumarola y fuentes superficiales, es decir, además de realizarse análisis en muestras de agua potable respecto al método estandarizado, se incluyeron técnicas de muestreo de diferentes matrices de agua para su análisis.

Patrones de referencia utilizados en la implementación del método ASTM D5072-09.

- i.** Patrón de Radio (^{226}Ra) del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST-USA), cuya actividad específica es de $2.482 \text{ kBq/g} \pm 1.20\%$, certificado SMR 4967A con fecha de referencia 12-2004. Se pesaron $0.2005 \text{ g} \pm 0.0002 \text{ g}$ de dicho patrón y se colocaron en un balón de 100 ml, se llevó al volumen anterior con HCl 0.1 mol/L, para obtener una disolución patrón de 4.980 Bq/ml la cual se denominó NIST-01.
- ii.** Patrón de Radio (^{226}Ra) del Instituto de Radioprotección y Dosimetría (IRD-Brasil), cuya actividad específica es de $1.541 \text{ kBq/g} \pm 2.72\%$, certificado C/28/A04, con fecha de referencia 18-08-2004. Se pesaron $0.2467 \text{ g} \pm 0.0002 \text{ g}$ de dicho patrón y se colocaron en un balón de 100 ml, se llevó a aforo con HCl 0.1 mol/L, para obtener una disolución patrón de 3.80 Bq/ml, la cual se denominó IRD-01.
- iii.** Patrón de Radio (^{226}Ra) del CIAN-FIA-UES, de acuerdo al reporte del Centro de Investigación en Ciencias Atómicas, Nucleares y Moleculares (CICANUM) en Costa Rica, contiene una actividad de Radio (^{226}Ra) de $9.948 \text{ Bq/ml} \pm 3.77\%$, certificado con fecha de referencia 07-12-2011. Material de referencia denominado CIAN-01.

En la Tabla 2.6 se resumen las actividades específicas y la actividad de la solución patrón en Bq/ml de cada uno de los patrones de referencia utilizados en las secciones de calibración y del control de calidad del método ASTM D5072-09 (2016). Las soluciones de referencia (patrones) han sido proporcionados por el CIAN-FIA-UES.

Tabla 2.6: Patrones de referencia utilizados en la calibración y control de actividad del método ASTM D5072-09 (2016).

Nº	MATERIAL DE REFERENCIA	ACTIVIDAD ESPECIFICA	ACTIVIDAD DE LA SOLUCIÓN PATRÓN
1	NIST-01	2.482 kBq/g \pm 1.20%	4,980 Bq/L
2	IRD-01	1.541 kBq/g \pm 2.72%	3,800 Bq/L
3	CIAN-01	-	9,948 Bq/L

Fuente: Rodríguez, 2013.

2.4.1.2. Calibración y estandarización de la metodología ASTM D5072-09 (2016).

El espectrómetro de centelleo líquido (véase la Figura 2.10) proporciona el promedio de las desintegraciones o eventos radioactivos registrados por minuto durante una hora, que tienen lugar en cada uno de los viales de centelleo contenidos en la cámara portamuestras. Cada cuenta que mide el aparato corresponde a una desintegración radioactiva; sin embargo, el aparato nunca detecta el 100% de las desintegraciones, por lo que el número de conteos por minuto (CPM) medidas será siempre menor que el de desintegraciones por minuto (DPM) reales.

Es posible convertir de CPM a DPM al conocer la eficacia del sistema de detección, o el número de eventos que detecta el instrumento frente al número de eventos reales. Para determinar la eficacia del sistema de detección, una cantidad conocida de radiactividad (en DPM) aparece al detector y la respuesta del mismo se mide (en CPM). Así, la proporción de CPM a DPM se calcula y el resultado corresponde a la eficacia del detector y al tipo de la fuente de radiación. Existen fuentes estandarizadas de referencia (véase la Tabla 2.6) para realizar esta clase de verificaciones de eficacia, la cual recibe el nombre de calibración y estandarización. En la Figura 2.11 se resume el procedimiento para la calibración del método. El procedimiento efectuado según los requerimientos de la norma ASTM D5072-09 se describe a continuación:

- a) Se añadió una cantidad conocida de solución patrón de ^{226}Ra trazable a un volumen conocido de agua.
- b) Tres patrones de calibración de ^{222}Rn se prepararon combinando una alícuota de 10 ml de la solución patrón ^{226}Ra con 10 ml de cóctel de centelleo en un vial de vidrio de 20 ml. Se agitó bien cada frasco para mezclar el contenido.

- c) En viales de centelleo líquido, se prepararon tres muestras de fondo que contenían 10 ml de agua reactiva y 10 ml de solución de centelleo. Se cerraron los viales y agitaron para mezclar el contenido.
- d) Se dejaron aproximadamente 30 días para la acumulación de Radón (es decir, el equilibrio secular con ^{226}Ra).
- e) Luego se agitaron los viales para transferir casi todo el Radón a la fase de mezcla de centelleo (el Radón es altamente soluble en la mezcla de centelleo). El ^{226}Ra permanece en la fase acuosa y, por lo tanto, no contribuye significativamente a la tasa de conteo.
- f) Se esperaron 3 horas antes del conteo para permitir la acumulación de progenie de Radón de vida corta y la adaptación a la oscuridad.
- g) Se contabilizaron las muestras patrón durante un período de recuento suficientemente largo para obtener una incertidumbre relativa de conteo menor a 1% (10 000 recuentos netos como mínimo). Las muestras de fondo se contaron durante el mismo tiempo que las muestras de prueba.

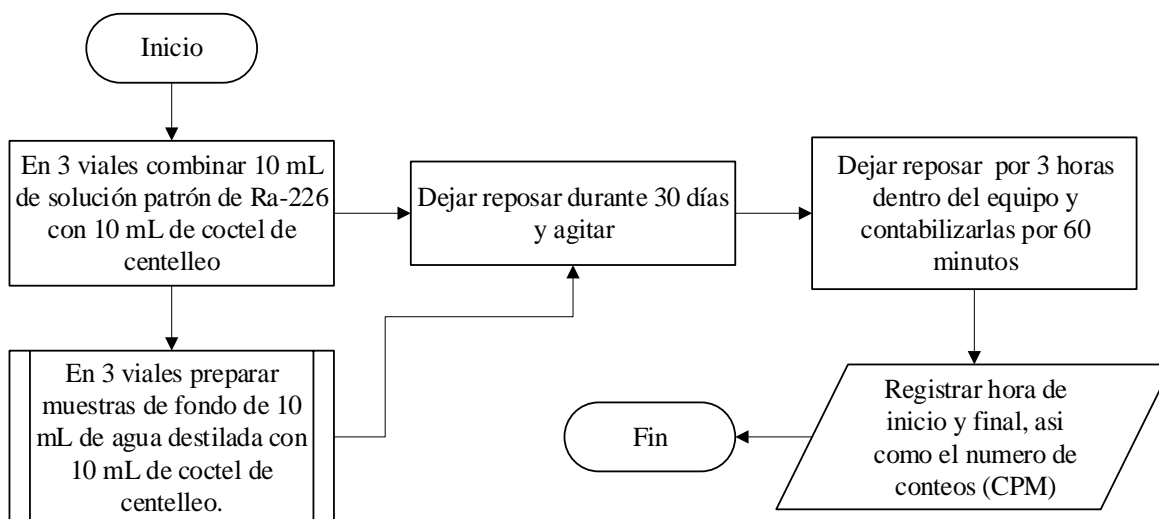


Figura 2.11: Procedimiento para la calibración y estandarización del método ASTM D5072-09 (2016).

El cálculo del factor de calibración CF, viene dado a partir de la ecuación 2.2:

$$CF = \frac{(C_{cs} - C_b)}{A_{cs}} \quad (\text{ec. 2.2})$$

Donde:

Ccs tasa de conteo del estándar de calibración (s^{-1})

Cb tasa de conteo de la muestra blanco (s^{-1})

Acs actividad del estándar de calibración (Bq)

2.4.1.3. Control de calidad del método ASTM D5072-09 (2016).

Con el fin de proporcionar una garantía razonable de que los resultados analíticos obtenidos con este método son válidos dentro de los límites de tolerancia del método, se analizaron muestras de control de calidad (QC). Se siguieron los siguientes procedimientos:

i. Demostración inicial de las capacidades del laboratorio, instrumento y analista.

Se realizó un estudio de precisión y sesgo para demostrar la capacidad del laboratorio, analista o instrumento. Este procedimiento debe realizarse siempre que un laboratorio o analista no ha realizado esta prueba antes o ha habido un cambio importante en el sistema de medición, por ejemplo, un cambio significativo de instrumento, un nuevo instrumento, reparación o alteración de cualquier componente del sistema, que puede afectar a la respuesta del sistema de medición. El procedimiento realizado en el laboratorio se resume en la Figura 2.12 en base a los siguientes pasos:

- a) Se analizaron siete réplicas de una solución patrón preparada a partir de un material de referencia independiente (IRM) que contenga concentraciones exactamente conocidas de ^{226}Ra en concentraciones suficientes para reducir al mínimo la incertidumbre de conteo al 2%. Cada réplica debe prepararse de acuerdo con la sección de Calibración y Estandarización.
- b) Se calculó la media y la desviación estándar de los valores de réplica y se compararon con los rangos aceptables de precisión y sesgo medio del 10% y el $\pm 10\%$ respectivamente.
- c) Se analizaron tres réplicas de una matriz de solución en blanco. La matriz utilizada para la demostración representa una muestra de agua típica para la que se utilizó el método.

- d) Se calculó la actividad del Radón para cada una de estas tres soluciones en blanco. El resultado de cada una de las tres soluciones en blanco debe estar por debajo del nivel crítico.

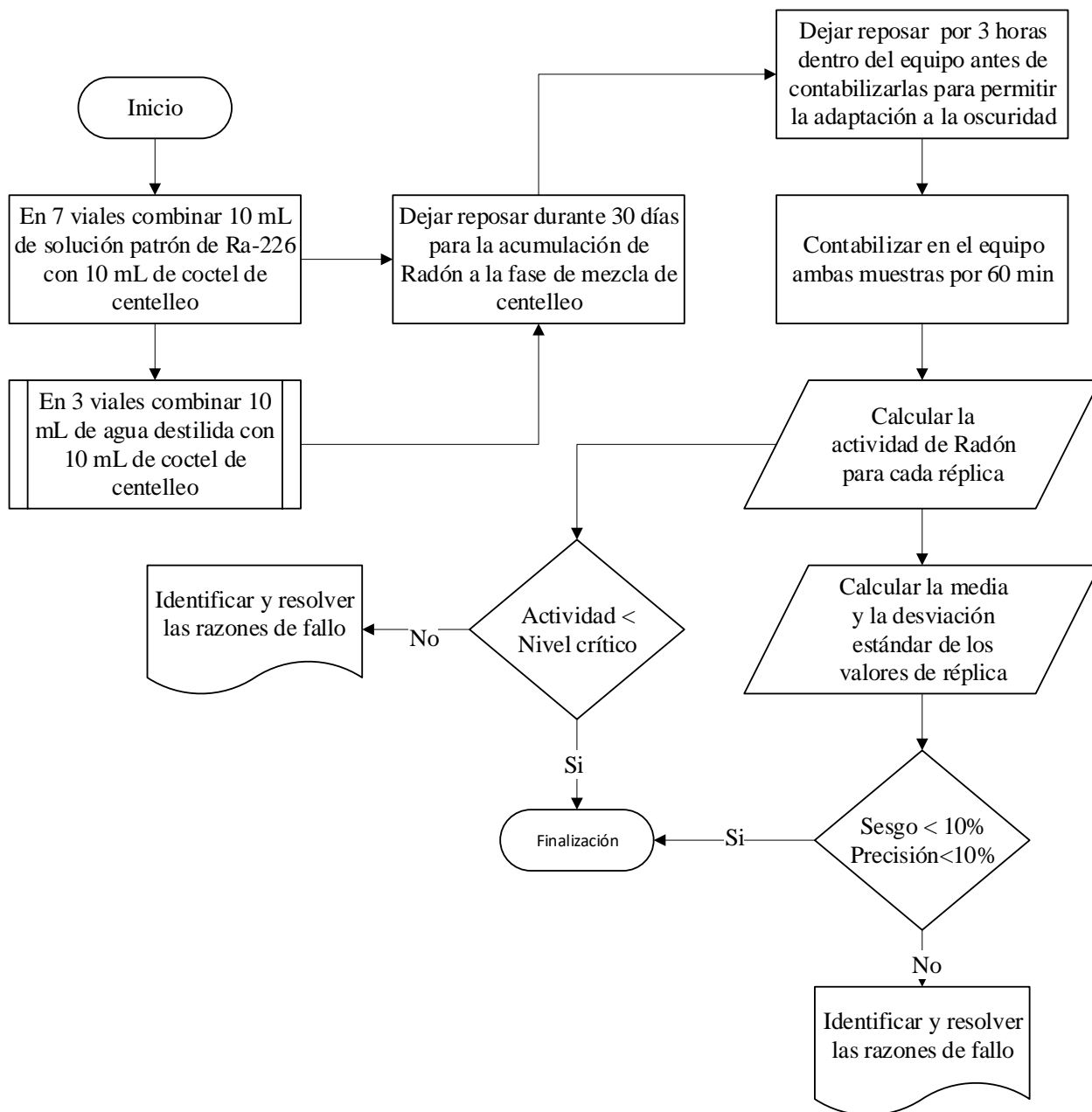


Figura 2.12: Procedimiento en la demostración inicial de las capacidades del laboratorio, instrumento y analista.

El cálculo para determinar la actividad de Radón (AC) en muestras de agua, patrones de referencia y fondos (soluciones en blanco), viene dada por la ecuación 2.3:

$$AC = R_n / (CF)(D)(V_a) \quad (\text{ec. 2.3})$$

Donde:

AC Concentración de la actividad de Radón (^{222}Rn) (Bq/L)

R_n Tasa de conteos netos (s^{-1})

CF Factor de calibración (s^{-1}/Bq)

D Factor de corrección por decaimiento

V_a Volumen de la muestra analizada (L)

La **tasa de conteos netos** (R_n) viene dada por la ecuación 2.4, la cual es la diferencia entre la tasa de conteo de la muestra y la tasa de conteo del blanco, los cuales son proporcionadas por el espectrómetro de centelleo líquido Tri-Carb 2100TR en el laboratorio.

$$R_n = R_a - R_b \quad (\text{ec. 2.4})$$

Donde:

R_a Tasa de conteo de la muestra (s^{-1})

R_b Tasa de conteo del blanco (s^{-1})

El **Factor de corrección por decaimiento** (D) viene dado por la ecuación 2.5, el cual considera el tiempo transcurrido desde la colección de la muestra hasta la mitad del tiempo de medición, con el objeto de realizar un reajuste al cálculo de la actividad de Radón, debido a la pérdida de este radionúclido contenida en la muestra por su decaimiento natural.

$$D = e^{\left(\frac{0.693(T)}{t_{1/2}} \right)} \quad (\text{ec. 2.5})$$

Donde:

T Tiempo transcurrido desde la colección de la muestra (días)

$t_{1/2}$ Tiempo de vida media del Radón (^{222}Rn) (3.82 días)

Para el cálculo de **sesgo medio** se emplea la ecuación 2.6. El sesgo se define como la diferencia entre la expectativa relativa a los resultados de una medición y el valor verdadero. El

sesgo surge de los errores sistemáticos inherentes al método. Cuanto más pequeño es el sesgo, mayor veracidad indica el método (Rodríguez, 2013).

$$s' = \frac{X - X_a}{X_a} \quad (\text{ec. 2.6})$$

Donde:

s' Sesgo

X lectura obtenida o valor promedio de las lecturas obtenida

X_a valor asignado, valor certificado del material de referencia o valor esperado

En la determinación de la **Repetibilidad** de los datos experimentales se deben registrar las mediciones de las siete réplicas de un analito de una solución patrón bajo las mismas condiciones (mismo operador, mismo aparato, mismo laboratorio y en corto intervalo de tiempo), a continuación, calcular la desviación estándar (s) y el porcentaje de coeficiente de variación (%CV) (Rodríguez, 2013).

La desviación estándar se calculó mediante la siguiente ecuación 2.7:

$$s(x_{i,k}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2} \quad (\text{ec. 2.7})$$

El coeficiente de variación viene dado por medio de la ecuación 2.8:

$$\%CV = \frac{s}{\bar{X}} \times 100 \quad (\text{ec. 2.8})$$

El **Nivel crítico** (L_c) para la concentración de la actividad del Radón (Bq/L) viene dado por la ecuación 2.9. Este valor representa la cantidad neta que en caso de superarse da lugar a la decisión de que la concentración o cantidad del analito presente en el material analizado es superior a la contenida en el material testigo (blanco) (Rodríguez, 2013). En cambio, la **Concentración mínima detectable** (MDC) es la concentración más baja del analito que puede ser determinada con un nivel aceptable de precisión de repetibilidad y veracidad.

$$L_c = \frac{2.33 * \sqrt{\frac{Rb}{t}}}{CF * D * Va} \quad (\text{ec. 2.9})$$

$$MDC = \frac{2.71xJ}{t} + 4.65 \sqrt{\frac{R_b}{t}} / (CF * D * Va)$$

ii. Verificación de la calibración del método ASTM D5072-09 (2016).

Para asegurarse de que el método de prueba está dentro de los límites de control, se realizó una prueba estándar de verificación de calibración que se resume en la Figura 2.13 en base al siguiente procedimiento:

- a) Se añadió una cantidad conocida de solución patrón de ^{226}Ra trazable a un volumen conocido de agua. La solución patrón se preparó a partir de un material de referencia independiente (IRM) que la solución de calibración.
- b) Se combinó una alícuota de 10 ml de la solución estándar de ^{226}Ra con 10 ml de mezcla de centelleo en un vial de vidrio para centelleo de 20 ml. La actividad añadida debía ser apropiada para el tipo de muestras analizadas y permitir una precisión suficiente para asegurar una evaluación significativa de la precisión. Se agitó bien la ampolla para mezclar el contenido.
- c) Se permitieron aproximadamente 30 días para la acumulación de Radón (es decir, el equilibrio secular con ^{226}Ra).
- d) Se agitaron los viales durante 1 minuto para transferir el Radón a la fase de mezcla de centelleo.
- e) Se esperaron 3 horas antes del conteo para permitir la acumulación de progenie de Radón de vida corta y la adaptación a la oscuridad.
- f) El resultado obtenido para la prueba de calibración debía de situarse dentro del límite del 15 % del valor esperado.
- g) Si el resultado no hubiese estado dentro del límite, se debían de detener los análisis e identificar y resolver la razón del fallo.

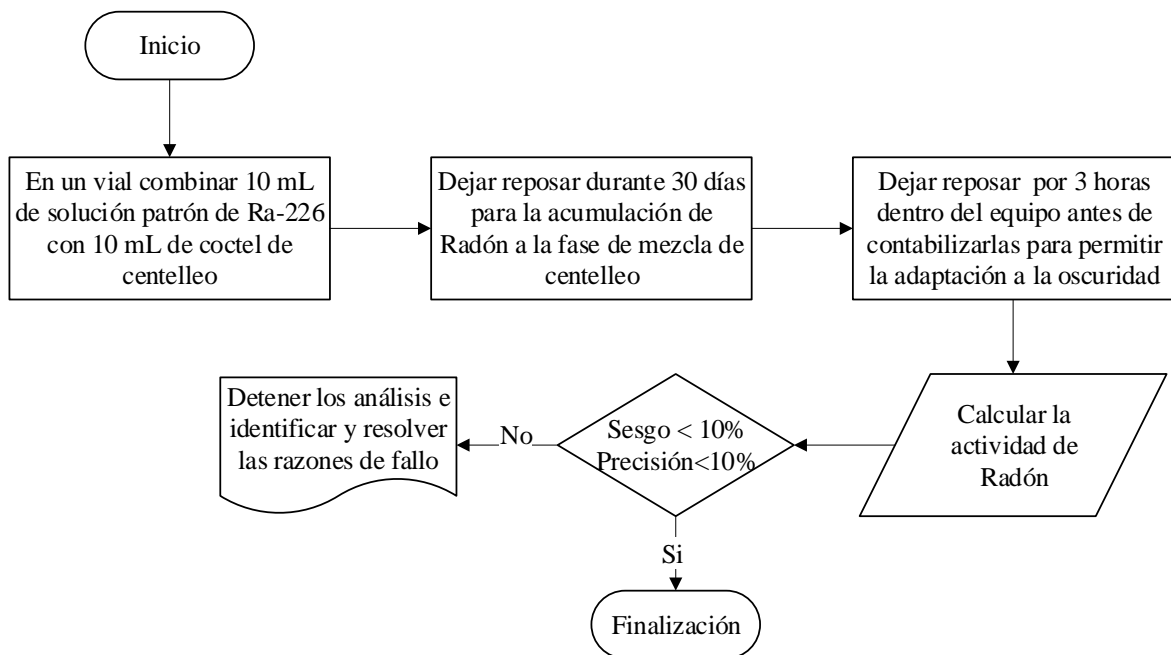


Figura 2.13: Procedimiento para la verificación de la calibración del método ASTM D5072-09 (2016).

iii. Análisis de muestras en blanco del método ASTM D5072-09 (2016).

Se analizó un blanco de prueba de reactivo con agua con cada lote de no más de 20 muestras. Respecto al procedimiento descrito en la Figura 2.14. La concentración de Radón encontrada en el blanco debía ser menor que el nivel crítico. Si la actividad del Radón se encuentra por encima de este nivel, se debía de proporcionar una explicación en la narrativa de un caso.

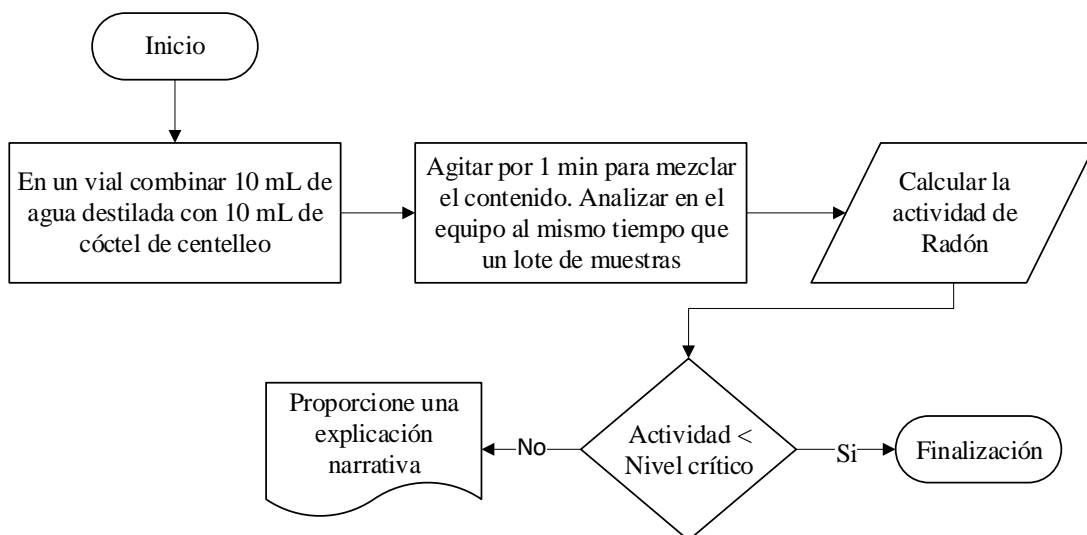


Figura 2.14: Procedimiento para el análisis de muestras en blanco del método ASTM D5072-09 (2016).

iv. Análisis de muestras por duplicado del método ASTM D5072-09 (2016).

En la Figura 2.15 se presenta el procedimiento para verificar la precisión de los análisis de las muestras, se analizó una muestra por duplicado con cada lote de no más de 20 muestras. Se calculó el acuerdo estadístico de duplicación de error (DER) entre los dos resultados. Este cálculo se realizó utilizando la incertidumbre estándar combinada de cada resultado, con la ecuación 2.10 como se muestra a continuación.

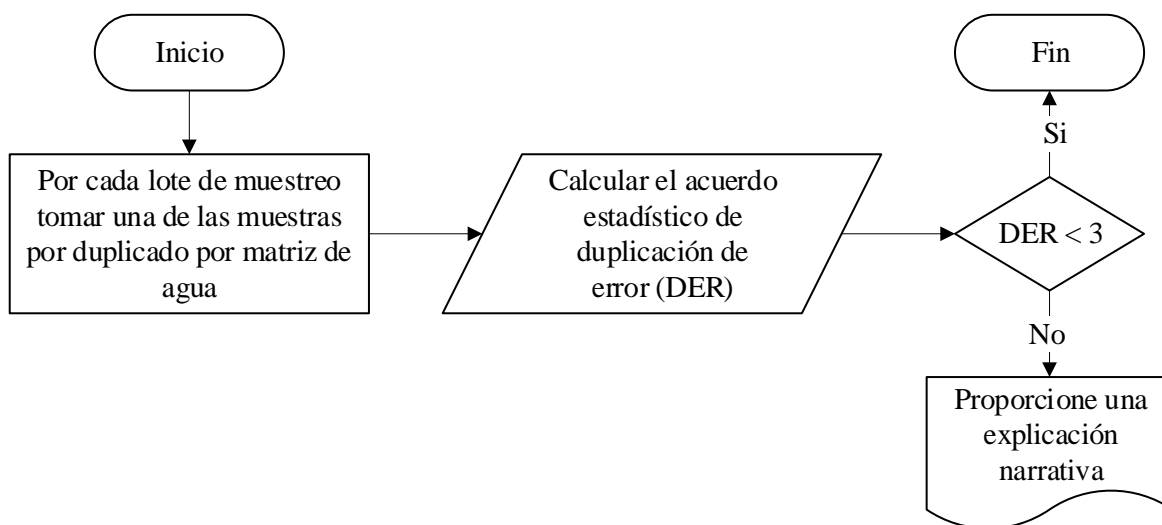


Figura 2.15: Procedimiento para el análisis de muestras por duplicado según el método ASTM D5072-09 (2016).

$$DER = \frac{|AC_S - AC_D|}{\sqrt{u^2(AC_S) + u^2(AC_D)}} \quad (\text{ec. 2.10})$$

Donde:

- AC_S Concentración de la actividad de la muestra original
- AC_D Concentración de la actividad de la muestra duplicada
- $\mu(AC_S)$ Incertidumbre estándar combinada de la muestra original
- $\mu(AC_D)$ Incertidumbre estándar combinada de la muestra duplicada.

La incertidumbre estándar perteneciente a la tasa de conteos proporcionado por cada uno de los analitos analizados en el instrumento Tri-Carb 2100TR se calculó de acuerdo a la ecuación 2.11 proporcionada por el método de prueba estándar ASTM D5072-09:

$$u^2(R_n) = \begin{cases} \frac{J * R_n + 2R_b}{t}, R_n > 0 \\ \frac{R_a + R_b}{t}, R_n \leq 0 \end{cases} \quad (\text{ec. 2. 11})$$

Donde:

t Tiempo de conteo de la muestra y el fondo (s)

J Índice de dispersión para los conteos netos producidos por ^{222}Rn y su progenie.

Para largos tiempos de conteo se calcula el valor de J de acuerdo a la ecuación 2.12, de acuerdo al método de prueba estándar ASTM D5072-09:

$$J = c_5 + \sum_{i=0}^3 (C_i e^{-\lambda_i t}) / (1 - e^{-\lambda_0 t}) \quad (\text{ec. 2.12})$$

Donde las constantes de decaimiento están dadas por la ecuación 2.13:

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 2.098 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \\ \lambda_1 &= 3.727 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \\ \lambda_2 &= 0.431 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \\ \lambda_3 &= 0.581 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \end{aligned} \quad (\text{ec. 2.13})$$

Y donde los coeficientes para instrumentos configurados para contar solamente la radiación alfa vienen dados por (ec. 2.14):

$$\begin{aligned} c_0 &= -5.0106487 \\ c_1 &= 0.00020574781 \\ c_2 &= 0.036387727 \\ c_3 &= -0.015296013 \\ c_4 &= 0 \\ c_5 &= 4.9893513 \end{aligned} \quad (\text{ec. 2.14})$$

La incertidumbre combinada de la actividad de Radón se calculó mediante la ecuación 2.15:

$$\mu_c(AC) = \frac{\sqrt{u^2(R_n) + R_n^2 * (\mu_r^2(CF) + \mu_r^2(V_a) + \mu_r^2(D))}}{(CF)(D)(V_a)} \quad (\text{ec. 2. 15})$$

Donde:

μ_c (AC) Incertidumbre estándar combinada de la concentración de Radón (Bq/L)

μ_r (CF) Incertidumbre estándar relativa del factor de calibración CF

μ_r (V_a) Incertidumbre estándar relativa de la muestra analizada (L)

μ_r (D) Incertidumbre estándar relativa de la corrección del decaimiento

La incertidumbre estándar se define como la desviación experimental de la media.

Desviación estándar experimental (ec. 2.16):

$$s(x_{i,k}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2} \quad (\text{ec. 2.16})$$

Incertidumbre estándar (ec. 2.17):

$$\mu(x_i) = \frac{s(x_{i,k})}{\sqrt{n}} \quad (\text{ec. 2.17})$$

Se denomina incertidumbre estándar relativa de x_i a la relación de $\mu(x_i)$ sobre x_i (ec. 2.18):

$$\mu_r(x_i) = \frac{\mu(x_i)}{|x_i|} \quad (\text{ec. 2.18})$$

Finalmente se obtienen todos los términos para el cálculo del valor de DER (véase la ec.2.10), el cual debe ser menor o igual a 3.0. Si el duplicado de la muestra no se encontraba dentro de estos límites, se debía volver a analizar todas las muestras del lote, o se debía de proporcionar una explicación en una narrativa del caso.

2.5. MODELAMIENTO ESTADÍSTICO Y DISTRIBUCIÓN DE MATRICES PARA EL ANÁLISIS DE RESULTADOS

Un análisis estadístico requiere una agrupación de los datos dependiendo de las características de cada punto de muestreo. La concentración de Radón en aguas subterráneas depende en gran medida de la superficie de las rocas que rodean el acuífero, y es proporcional a la concentración de radio en las rocas adyacentes. Se ha determinado que el Radón es el gas noble de mayor solubilidad en el agua, es 15 veces mayor que el helio o el neón (Lastra, 2015). En aguas superficiales su procedencia puede ser de dos formas:

- a) Aguas superficiales de mezcla: estas aguas son una mezcla entre aguas de origen termal y superficiales, las aguas termales son aguas las cuales tienen gases procedentes de la cámara magmática que circulan por el sistema de fracturas interactuando con los acuíferos y las rocas encajantes, emergiendo a la superficie en forma de fumarolas, emisiones difusas o fuentes termales. Dado que la composición química de los gases presentes en la cámara magmática es un reflejo de su actividad, las variaciones en las tasas de emisión pueden indicarnos una modificación en el orden del sistema.

- b) Aguas superficiales que son efluentes de aguas subterráneas, y como anteriormente se mencionó esta agua subterránea son aguas que tienen una concentración apreciable de Radón el cual es el progenitor del Radón, cabe mencionar que este tipo de fuente tiene temperaturas bajas y concentraciones dependientes de la temperatura, ya que el Radón es más soluble en temperaturas bajas.

En las fumarolas, son manifestaciones hidrotermales indicativas de presencia de fluido geotérmico en la zona, la concentración de gas Radón en el vapor condensado es a partir de la emisión de gases, las cuales son liberadas por medio de las rocas sujetas a procesos relacionados con el ascenso del magma como calentamiento, deformación y fracturamiento. En sistemas volcánicos, las fuentes de Radón incluyen el magma, paredes de rocas y fluidos hidrotermales. Las concentraciones de Radón permiten identificar zonas de alta permeabilidad donde los gases se mueven fácilmente, ya que se debe considerar que el Radón no tiene una movilidad propia y necesita de un gas transportador que le permita moverse con rapidez y a grandes distancias. En los sistemas naturales, el dióxido de carbono (CO₂) y el agua son los principales transportadores de este gas (Gutiérrez, 2008).

La matriz de Agua Superficial se ha dividido en cuatro grupos: Agua Superficial (Río El Playón puntos “A” y “C”), Agua Superficial de Mezcla (Fuente El Cashal Caliente y Río El Playón Punto “B”), Agua Superficial con Influencia Hidrotermal (Agua Shuca) y Agua Superficial para consumo humano (Río Apunia y Fuente El Cashal). El Río El Playón “B” y Fuente El Cashal Caliente son aguas superficiales que están en una zona permeable la cual permite que sean calentadas por agua proveniente de un sistema geotérmico. El Río Apunia y Fuente El Cashal son aguas superficiales utilizadas para consumo humano y presentan

temperaturas similares entre sí. Agua Shuca se clasifica como agua superficial con influencia hidrotermal debido a su alta temperatura, bajo pH y sus valores de Cloruros. Por otra parte, se clasificó las aguas subterráneas con los pozos domésticos investigados (Pozo Mirasol, Pozo Col. San Luis #2 y Pozo Inst. Agrícola) y las fumarolas El Playón y El Sauce forman parte del mismo grupo por sus características similares. En la Tabla 2.7 se resume la clasificación de los puntos de muestreo para su posterior análisis estadístico.

Tabla 2.7: Clasificación de los puntos de muestreo según las características de las muestras de agua.

CARACTERÍSTICAS DE AGUA	PUNTOS DE MUESTREO
Agua superficial	Cashal Fuente y Apunia
Agua superficial calentada por vapor	Río el Playón B y Cashal fuente Caliente
Vapor condensado proveniente de Fumarola	Sauce, Playón
Aguas subterráneas	Pozo Mirasol y pozo San Luis
Manifestación hidrotermal superficial	Agua Shuca

2.5.1. Descripción de la Metodología de Análisis por Componentes Principales

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica multivariada que permite examinar la correlación existente entre diversas variables cuantitativas, y puede ser usada para reducir el número de variables. Las variables pueden tener correlaciones positivas o negativas (Ruales y Perdomo, 2007). El ACP tiene como objetivo principal el de transformar un conjunto de variables (Concentraciones de Radón, Cloruros, Sólidos Totales, Conductividad, Conductancia Específica, pH, Oxígeno Disuelto y Temperatura) en un conjunto nuevo de variables conocidas como “Componentes Principales”, las cuales están correlacionadas entre sí.

El Análisis de Componentes Principales tiene como principios básicos los siguientes (Abdi y Williams, 2010):

- a) Extraer la mayor cantidad de información importante de la tabla de datos.
- b) Comprimir el tamaño del set de datos manteniendo únicamente la información importante.
- c) Simplificar la descripción del set de datos.
- d) Analizar la estructura de las observaciones y las variables.

Pero cabe mencionar que no siempre es adecuado utilizar la técnica ACP para resumir la información de un conjunto grande de indicadores, pero hay medidas y contrastes estadísticos que indican la idoneidad de la técnica, si las variables no están suficientemente interconectadas entre si no tiene sentido aplicar ACP (Sosa, 2018).

Indicadores de la idoneidad del ACP:

- i. Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO): Es un índice no estadístico, que evalúa si las correlaciones parciales entre las variables son suficientemente pequeñas. Los valores varían entre 0 y 1 como se describe en la Tabla 2.8, los valores pequeños indican que el análisis factorial puede no ser una buena idea, dado que las correlaciones entre los pares de variables no pueden ser explicadas por otras variables. Los menores que 0.5 indican que no debe utilizarse el análisis factorial con los datos muestrales que se están analizando. Si el índice es mayor o igual a 0.5 la muestra es adecuada para aplicar el ACP.

Tabla 2.8: Índice de medida de adecuación muestral KMO para análisis por ACP.

ÍNDICE	RESULTADO
0.70 - 0.80	Aceptable adecuación muestral
0.80 - 0.90	Buena adecuación muestral
0.9 a-1.00	Excelente adecuación muestral.

- ii. Prueba de esfericidad de Barlett: Es una prueba de hipótesis, en la cual se contrasta la hipótesis nula de que la matriz de correlaciones es una matriz identidad. Si el “p-valuemuestral” es menor que la significancia, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y tiene sentido aplicar el método de ACP al set de datos. En caso contrario, se acepta la hipótesis nula, lo cual implica que las variables no están incorreladas y no debería aplicarse el ACP.

p-valuemuestral < 0.05 se rechaza Ho (el ACP tiene sentido)

p-valuemuestral > 0.05 se acepta Ho (variables incorreladas ACP no tiene sentido)

El primer paso en el ACP es realizar una matriz de las correlaciones con la significación de cada componente. Para que se pueda realizar el ACP, es necesario que las variables presenten factores comunes. Es decir, que estén muy correlacionadas entre sí. Los coeficientes de la matriz de las correlaciones deben de ser grandes en valor absoluto (mayor que 0.5).

2.5.1.1. Interpretación de comunalidades de la metodología ACP.

La comunalidad de una variable es la proporción de su varianza que puede ser explicada por el modelo factorial obtenido. El valor de las comunalidades extraídas por el método permite observar cuales valores son mejor explicadas por el modelo, la tabla de comunalidades asignadas inicialmente a las variables (inicial) y las comunalidades reproducidas por la solución factorial (extracción) (Pardo y Ruis, 2005).

2.5.1.2. Varianza total explicada de la metodología ACP.

Los autovalores son cantidades que expresan la varianza total que esta explicada por cada factor y los porcentajes de varianza explicada asociadas a cada factor, los cuales se obtienen dividiendo su correspondiente autovalor por la suma de los autovalores la cual coincide con el número de variables.

2.5.1.3. Gráfica de sedimentación de la metodología ACP.

La gráfica de sedimentación muestra el número del factor versus su valor propio correspondiente. La gráfica de sedimentación ordena los valores propios desde el más grande hasta el más pequeño. Los valores propios de la matriz de correlación son iguales a las varianzas de los factores. El patrón ideal de una gráfica de sedimentación es una curva pronunciada, seguida de una inflexión y luego de una línea recta (MINITAB, 2019).

2.5.1.4. Matriz de componentes principales de la metodología ACP.

La matriz de componentes permite expresar cada una de las variables originales mediante los dos factores extraídos. Para ver qué variables se agrupan en cada una de las componentes (factor) hay que observar si sus valores (absolutos) son altos y bajos en las otras componentes (valores menores que 0.25 suelen considerarse bajos) (De La Fuente, 2011).

2.5.2. Descripción de la Metodología de Correlación Lineal de Pearson

Correlación es un término comúnmente utilizado en el contexto de una asociación entre dos variables. Existen dos tipos:

- a) **Correlación:** entre dos variables cuando los valores de una variable están de alguna manera asociados con los valores de la otra variable.

b) Correlación lineal: entre dos variables cuando existe una correlación y los puntos graficados de los datos pareados dan como resultado un patrón que se puede aproximar mediante una línea recta.

En esta investigación se hará énfasis en la correlación lineal, un elemento esencial para este tipo de correlación es el “coeficiente de correlación lineal”, el cual mide la fuerza de la correlación lineal entre los valores cuantitativos pareados “x” e “y” en una muestra, siendo “y” la concentración de Radón y “x” cada uno de los siguientes parámetros: Cloruros, Sólidos Totales, Conductividad, Conductancia Específica, Oxígeno Disuelto, pH y Temperatura en agua superficial. Cabe mencionar que el coeficiente de correlación lineal se conoce en ocasiones como coeficiente de correlación del momento del producto Pearson (Triola, 2018).

El coeficiente de correlación lineal “r” o coeficiente de correlación de Pearson tiene las siguientes propiedades:

i. El coeficiente de correlación lineal “r” está siempre entre:

$$-1 \leq r < 0 \text{ para correlación negativa y}$$

$$0 \leq r \leq 1 \text{ para correlación positiva}$$

- ii. Si todos los valores de cualquiera de las variables se convierten a una escala diferente, el valor de “r” no cambia.
- iii. El valor de “r” no se ve afectado por la elección de “x” o “y”. Si se intercambian todos los valores de “x” e “y”, el valor de “r” no cambiará.
- iv. El coeficiente de correlación lineal “r” mide la fuerza de una relación lineal. No está diseñado para medir la fuerza de una relación que no sea lineal.
- v. El coeficiente de correlación lineal “r” es muy sensible a los valores atípicos en el sentido de que un único valor de este tipo podría afectar dramáticamente su valor.

El coeficiente de correlación de Pearson o coeficiente de correlación lineal “r” es calculado con la ecuación 2.19:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (\text{ec. 2.19})$$

La interpretación de la correlación de Pearson es la clave fundamental de la existencia o no de una correlación, por tal motivo, diversos autores proponen diferentes escalas de interpretación, como se muestra en la Tabla 2.9.

Pero en esta investigación se usará la siguiente interpretación: Si el coeficiente de correlación arrojado va entre 0 y 0.2, entonces la correlación es mínima; si va entre 0.2 y 0.4, es una correlación baja; si va entre 0.4 y 0.6, entonces es una correlación moderada, ya entre 0.6 y 0.8 es una correlación buena; finalmente, entre 0.8 y 1, es una correlación muy buena. Esto mismo aplica en valores negativos (Giorgio y Paulina, 2014).

Tabla 2.9: Interpretación de los coeficientes de la correlación lineal de Pearson.

DE ACUERDO A	INTERPRETACIÓN
Abraira V., Pérez de Vargas A. En Métodos Multivariantes en Bioestadística.	El coeficiente de correlación oscila entre -1 y $+1$, el valor 0 que indica que no existe asociación lineal entre las dos variables en estudio.
Pita Fernández S, Pértega Díaz S. En Métodos paramétricos para la comparación de dos medias t de Student.	Correlación negativa perfecta. -1 Correlación negativa fuerte moderada débil -0.5 Ninguna correlación 0 Correlación positiva moderada Fuerte $+0.5$ Correlación positiva perfecta $+1$
Cabrera E. En El Coeficiente de Correlación de los Rangos De Spearman.	Perfecta $R = 1$ Excelente $R = 0.9 \leq R < 1$ Buena $R = 0.8 \leq R < 0.9$ Regular $R = 0.5 \leq R < 0.8$ Mala $R < 0.5$
Santander Montes AJ, Ruiz Vaquero R. En Relación entre variables cuantitativas.	Rango Relación Escasa o nula: 0 hasta 0.25 Débil: 0.26 hasta 0.50 Entre moderada y fuerte: 0.51 hasta 0.75 Entre fuerte y perfecta: 0.76 hasta 1.00

Luego de estimar el coeficiente de Pearson e interpretar los resultados, se puede realizar una prueba de hipótesis formal, la cual puede determinar 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 valor de “ ρ ” para representar el coeficiente de correlación lineal de las variables. Luego de plantear las hipótesis se selecciona el nivel de significancia “ α ”, para una prueba de hipótesis formal.

La Tabla 2.10 muestra los valores de significancia más comunes y el valor correspondiente de significancia, siendo el valor de significancia más común el de 0.05.

Tabla 2.10: Niveles de significancia para una prueba de hipótesis formal.

NIVELES DE SIGNIFICANCIA MÁS COMUNES	VALORES CORRESPONDIENTES DE α
Nivel de significancia del 90% (o 0.90)	$\alpha = 0.10$
Nivel de significancia del 95% (o 0.95)	$\alpha = 0.05$
Nivel de significancia del 99% (o 0.99)	$\alpha = 0.01$

Luego de seleccionar el nivel de significancia se hace una prueba estadística para determinar el valor de “ P ”, se puede encontrar el dato estadístico utilizando la prueba t (ec. 2.20):

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}} \quad (\text{ec. 2.20})$$

(con $n - 2$ grados de libertad)

Luego de encontrar el valor de “ t ”, se utiliza una tabla de valores “ t ” críticos con los grados de libertad, se observa el valor de P para cada área pudiendo ser de una sola cola o de dos colas esta área, esto permite encontrar el valor P , luego se debe 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 $P \leq \alpha$: Respalda la afirmación de una correlación lineal.

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

Luego de obtener el valor de P , se debe ¿Aceptar o no rechazar la hipótesis nula? se recomienda decir que “no se rechaza la hipótesis nula” en vez de decir que “se acepta la hipótesis nula” (Triola, 2018).

2.5.3. Descripción de la Metodología de 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 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), (Martin, 2019).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \epsilon \quad (\text{ec. 2.21})$$

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).

Descripción de parámetros en una regresión lineal múltiple:

- a) β_j Magnitud del efecto que x_j tienen sobre Y (incremento en la media de Y cuando X_j aumenta una unidad)
- b) β_0 Término constante (promedio de Y cuando las variables explicativas valen 0)
- c) ϵ Residuos (perturbaciones aleatorias, error del modelo).

2.5.3.1. Resumen de modelo para una regresión lineal múltiple.

El coeficiente de correlación R, es el coeficiente de correlación absoluto entre la variable dependiente y las variables independientes, y R^2 es el cuadro del coeficiente de correlación R. El R cuadrado ajustado es una corrección a la baja del cuadro del coeficiente de correlación de R que es basado en el número de casos y de variables independientes, en este caso el valor de R cuadrado ajustado es menor a la de R cuadrado (ec. 2.22).

$$R_{ajustado}^2 = R^2 - \left(\frac{p(1 - R^2)}{n - p - 1} \right) \quad (\text{ec. 2.22})$$

El error estándar de estimación es el error estándar de la regresión, es el valor que muestra la diferencia entre los valores reales y los estimados de una regresión.

2.5.3.2. Prueba de análisis de la varianza en una regresión lineal múltiple.

La prueba de análisis de la varianza, muestra si las variaciones entre la varianza explicada y varianza no explicada es significativamente distinta. 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 $\beta_p \neq 0$, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

2.5.3.3. Pruebas de significación para una regresión lineal múltiple.

Las pruebas t sirve para 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 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.

Los coeficientes no estandarizados son coeficientes que no son independientes entre sí, los coeficientes no estandarizados reciben el nombre de coeficientes de regresión parcial porque el valor concreto estimado para cada coeficiente se ajusta teniendo en cuenta la presencia del resto de variables independientes, por tanto, conviene interpretarlos con cautela. El signo del coeficiente de regresión parcial de una variable puede no ser el mismo que el del coeficiente de correlación simple (entre esa variable y la dependiente) (Pardo y Ruis, 2005).

2.5.3.4. Los coeficientes de regresión estandarizados en una regresión lineal múltiple.

Los coeficientes Beta (coeficientes de regresión parcial estandarizados) son los coeficientes que definen la ecuación de regresión cuando ésta se obtiene tras estandarizar las variables originales, es decir, tras convertir las puntuaciones directas en típicas. Indican la cantidad de cambio, en puntuaciones típicas, que se producirá en la variable dependiente por cada cambio de una unidad en la correspondiente variable independiente (manteniendo constantes el resto de variables independientes). Estos coeficientes 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 y Ruis, 2005).

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se describe el comportamiento observado con los resultados obtenidos empleando las metodologías anteriormente mencionadas. Utilizando el método ASTM-D 5072-09 (2016) para análisis de muestras de Radón (^{222}Rn) se detectó y cuantificó la actividad de gas Radón (^{222}Rn) presente.

Además, se realizó un análisis estadístico con el fin de encontrar la existencia de una correlación entre la concentración de gas Radón (^{222}Rn) respecto a los parámetros fisicoquímicos analizados. Estos análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando diferentes técnicas estadísticas (Análisis por componentes principales, Correlación Lineal de Pearson y Pruebas de Hipótesis Formal) y en aquellos puntos donde no se encontraron correlaciones estadísticas, se utilizaron análisis descriptivos con el fin de observar el comportamiento del gas Radón (^{222}Rn) y los parámetros fisicoquímicos de forma respecto al tiempo.

Se presentan los resultados obtenidos del Control de Calidad del Método ASTM-D5072-09 (2016) para análisis de muestras de Radón (^{222}Rn) en las muestras provenientes de las distintas matrices de agua.

3.1. CALIBRACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA ASTM D5072-09 (2016)

Para obtener datos de concentración de gas ^{222}Rn en las muestras analizadas se debe realizar previamente el cálculo del Factor de Calibración (CF) (sección 2.4.1.2). Se utilizaron 200 μL del patrón estandarizado de ^{226}Ra denominado NIST-01, con el cual se enriquecieron 10 ml de agua destilada para obtener una solución estándar de calibración a una actividad (ecuaciones 3.1 y 3.2) que pueda registrar un mínimo de 10,000 conteos netos por el espectrómetro de centelleo líquido, lo que contribuya a una incertidumbre de conteo menor al 1%.

$$C_2 = \frac{V_1 * C_1}{V_2} = \frac{200 \times 10^{-6} \text{ L} * 4,980 \text{ Bq/L}}{0.01 \text{ L}} = 99.60 \text{ Bq/L} \quad (\text{ec. 3.1})$$

$$A_{cs} = 99.60 \text{ Bq/L} * 0.01 \text{ L} = 0.996 \text{ Bq} \quad (\text{ec. 3.2})$$

En la Tabla 3.1 se registran los conteos (CPM) de tres réplicas de la solución patrón NIST-01, y los conteos de tres réplicas de muestras libres de radionúclidos de ^{226}Ra (denominados fondos o blancos), obtenidas en un tiempo de análisis total de 60 minutos en el equipo de centelleo líquido TRI-CARB 2100TR. En las Figuras C-1 y C-2 del Anexo C se presentan los espectros de ^{222}Rn y su progenie obtenidos por medio del software *SpectraView*.

Tabla 3.1: *Conteos por segundo registrados en el centellador líquido para el estándar NIST-01 y el Fondo.*

Nº DE RÉPLICA	NIST-01		FONDO	
	CPM (min ⁻¹)	CPS (s ⁻¹)	CPM (min ⁻¹)	CPS (s ⁻¹)
1	266.19	4.44	51.64	0.86
2	261.07	4.35	50.43	0.84
3	264.69	4.41	50.44	0.84
Promedio	263.98	4.40	50.84	0.85

Sustituyendo los valores de la Tabla 3.1 en la ecuación 2.2 se obtiene un valor promedio para el Factor de Calibración (CF) de 3.57 como puede observarse en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: *Cálculo de Factor de Calibración a partir de tres réplicas del patrón NIST-01.*

RÉPLICA	NIST-01		FONDO		C _{cs} -C _b	CF
	CPM (min ⁻¹)	CPS (s ⁻¹)	CPM (min ⁻¹)	CPS (s ⁻¹)		
1	269.23	4.49	51.30	0.86	3.63	3.65
	263.15	4.39	51.98	0.87	3.52	3.53
2	258.90	4.32	50.45	0.84	3.47	3.49
	263.23	4.39	50.40	0.84	3.55	3.56
3	266.88	4.45	50.33	0.84	3.61	3.62
	262.50	4.38	50.55	0.84	3.53	3.55
Promedio	263.98	4.40	50.84	0.85	3.55	3.57

3.1.1. Cálculo de la Actividad de gas Radón (^{222}Rn) en el Patrón de Referencia NIST-01 y en Muestras de Agua

La actividad de ^{222}Rn por cada réplica de solución patrón y el sesgo de la medición se calculan por medio de las ecuaciones 2.3 y 2.6 respectivamente, utilizando las Tasas de Conteo de la solución patrón y del fondo (véase la Tabla 3.2). Los resultados se expresan en la Tabla 3.3 en donde se puede observar que los valores de sesgo de la medición se encuentran dentro de los requerimientos del método estandarizado para Radón en agua ASTM D5072-09 (Sesgo < 10%).

En el Anexo B se detalla un ejemplo de cálculo de la actividad de gas ^{222}Rn del primer duplicado de réplica del patrón NIST-01.

Tabla 3.3: Actividad y sesgo de gas Radón en el patrón de referencia NIST-01.

Réplicas NIST-01	Rn	T (días)	D	AC (Bq/L)		Sesgo (%)
1	3.64	0.15	0.97	104.79	103.72	4.12
	3.54	0.19	0.97	102.64		
2	3.47	0.23	0.96	101.35	102.80	3.20
	3.54	0.27	0.95	104.25		
3	3.60	0.31	0.94	106.84	106.16	6.56
	3.53	0.35	0.94	105.47		

En el caso de la cuantificación de la actividad de gas ^{222}Rn de cada una de las muestras tomadas por duplicado de las diferentes matrices de agua (agua subterránea, superficial y vapor condensado de fumarolas), se analiza cada muestra por un tiempo de 60 minutos en el equipo de centelleo líquido TRI-CARB 2100TR para obtener su respectiva Tasa de Conteo (Ra); estas se encuentran registradas de la Tabla A-1 a la Tabla A-8 del Anexo A, junto con la fecha y hora de muestreo y medición de las ocho campañas de muestreo para los doce puntos seleccionados. Con los datos de Ra se prosigue a calcular la Tasa de Conteo Neto (Rn) según la ecuación 2.4, el Factor de Corrección por Decaimiento (D) según la ecuación 2.5 y finalmente la ecuación 2.3 para la cuantificación de la actividad de gas Radón en muestras de 10 ml de agua. En el Anexo B se detalla un ejemplo de cálculo para la cuantificación de gas Radón concerniente al quinto muestreo del punto El Cashal.

3.1.2. Cálculo de la Incertidumbre de la Cuantificación de Gas Radón (^{222}Rn) en Muestras de Agua

Para calcular la incertidumbre combinada de la actividad de Radón $\mu(AC)$ se utiliza la ecuación 2.15, la cual requiere un cálculo previo de la incertidumbre estándar relativa del factor de calibración $\mu_r(CF)$, de la incertidumbre estándar relativa del volumen de la muestra analizada $\mu_r(Va)$ y de la incertidumbre estándar relativa de la corrección debido al decaimiento radioactivo $\mu_r(D)$, así como también, se calcula el cuadrado de la incertidumbre estándar de la tasa de conteos netos $\mu^2(Rn)$ que viene dada por la ecuación 2.11, la cual para el caso de $Rn > 0$ queda de acuerdo a la ecuación 3.3:

$$u^2(R_n) = \frac{J * R_n + 2R_b}{t}, R_n > 0 \quad (\text{ec. 3.3})$$

En la ecuación 3.3 se requiere el cálculo previo del índice de dispersión para los conteos netos producidos por ^{222}Rn y su progenie (J), ya que el tiempo de conteo neto alcanza los 60 minutos se debe llevar a cabo el cálculo de “ J ” de acuerdo a la ecuación 2.12, utilizando los valores de las constantes y coeficientes pertinentes a los equipos de centelleo líquido que solamente están configurados para conteos de radiación α ; los cuales se encuentran en el método estandarizado para Radón en agua ASTM D5072-09.

$$J = c_5 + \sum_{i=0}^3 (C_i e^{-\lambda_i t}) / (1 - e^{-\lambda_0 t}) \quad (\text{ec. 3.4})$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^3 (C_i e^{-\lambda_i t}) = \sum_{i=0}^3 [& -5.0106487 e^{-2.098 \times 10^{-6} \times 3600} \\ & + 0.00020574781 e^{-3.727 \times 10^{-3} \times 3600} \\ & + 0.036387727 e^{-0.431 \times 10^{-3} \times 3600} \\ & - 0.015296013 e^{-0.581 \times 10^{-3} \times 3600}] = -4.967 \end{aligned} \quad (\text{ec. 3.5})$$

$$J = \frac{4.9893513 - 4.967}{1 - e^{-2.098 \times 10^{-6} \times 3600}} = 2.95$$

Con el objetivo de dar a conocer un ejemplo de cómo se calculó la incertidumbre combinada de la actividad de gas Radón $\mu(AC)$ en todas las muestras, patrones y blancos analizados, se han utilizado los datos del promedio de conteos de 3 réplicas del patrón estándar NIST-01 (registrados en la Tabla 3.2).

El cuadrado de la incertidumbre estándar de la tasa de conteos netos $\mu^2(R_n)$ del patrón estándar NIST-01 viene dado por la ecuación 3.6:

$$u^2(R_n) = \frac{J * R_n + 2R_b}{t} = \frac{2.95 * 3.55 \text{ s}^{-1} + 2 * 0.85}{3600 \text{ s}} = 3.39 \times 10^{-3} (\text{s}^{-1})^2 \quad (\text{ec. 3.6})$$

Para realizar el cálculo de la incertidumbre estándar relativa del volumen de la muestra analizada $\mu_r(V_a)$, se realizaron 10 mediciones del volumen de muestra: con una jeringa de muestreo se depositaron 10 ml de agua destilada en un beaker colocado sobre una balanza analítica, se midió la temperatura a la que se encontraba el agua (27°C) con el objetivo de conocer su

densidad y así conocer el volumen exacto colectado por medio de la jeringa con graduación máxima de 10 ml.

En la Tabla 3.4 se presentan los valores de volumen y los datos requeridos para calcular la desviación estándar experimental $s(V_a)$ y la desviación estándar relativa $\mu(V_a)$, según la ecuación 2.16 y 2.17 respectivamente. La incertidumbre estándar relativa del volumen de la muestra analizada $\mu_r(V_a)$ se calculó según la ecuación 2.18 y su valor se presenta en la ecuación 3.7.

Tabla 3.4: Datos para la desviación estándar relativa del volumen de muestra.

No	PESO ACUMULADO (g)	PESO (g)	VOLUMEN (ml)	$(x_{i,k} - \bar{x}_i)^2$
1	10.11	10.11	10.15	2.01E-03
2	20.18	10.06	10.10	5.59E-05
3	30.18	10.01	10.04	3.81E-03
4	40.22	10.03	10.07	1.38E-03
5	50.26	10.05	10.08	6.12E-04
6	60.37	10.11	10.15	1.78E-03
7	70.59	10.22	10.25	2.14E-02
8	80.51	9.93	9.96	2.07E-02
9	90.59	10.07	10.11	2.57E-05
10	100.69	10.11	10.14	1.34E-03
Promedio		10.07	10.07	

$$\begin{aligned}
 s(V_a) &= 76.83 \times 10^{-3} \text{ mL} \\
 \mu(V_a) &= 24.29 \times 10^{-3} \text{ mL} \\
 \mu_r(V_a) &= \frac{24.29 \times 10^{-3}}{10.07} = 2.41 \times 10^{-3}
 \end{aligned}
 \tag{ec. 3.7}$$

En el caso de la incertidumbre estándar relativa de la corrección por decaimiento $\mu_r(D)$ a partir de los estudios realizados anteriormente, la incertidumbre del factor de decaimiento puede despreciarse por ser un valor muy cercano al cero de acuerdo a lo reportado por Rodríguez, 2013.

La incertidumbre estándar relativa del factor de calibración $\mu_r(CF)$ se ha calculado utilizando la desviación estándar experimental $s(CF)$ y la incertidumbre estándar $\mu(CF)$ del análisis de tres réplicas de la solución patrón NIS-01 analizadas por duplicado. Los datos se resumen en la Tabla 3.5:

Tabla 3.5: Datos para el cálculo de la incertidumbre estándar relativa del Factor de Calibración $\mu_r(CF)$.

REPLICA NIST-01	CF	$(x_{i,k} - \bar{x}_i)^2$
1	3.65	6.41E-03
	3.53	1.09E-03
2	3.49	6.18E-03
	3.56	2.81E-05
3	3.62	3.24E-03
	3.55	4.01E-04
	3.57	Σ 1.73E-02

$$\begin{aligned}
 s(CF) &= 2.86 \times 10^{-3} \text{ mL} \\
 \mu(CF) &= 1.17 \times 10^{-3} \text{ mL} \\
 \mu_r(CF) &= \frac{1.17 \times 10^{-3}}{3.57} = 3.27 \times 10^{-4}
 \end{aligned}
 \tag{ec. 3.8}$$

A continuación, en la Tabla 3.6 se presenta un resumen de todos los parámetros necesarios para calcular la incertidumbre estándar combinada de la concentración de actividad del Radón $\mu_c(AC)$ para la solución patrón NIST-01:

Tabla 3.6: Datos para el cálculo de la incertidumbre estándar combinada en la cuantificación de gas Radón (^{222}Rn).

PARÁMETRO	VALOR
$u^2(R_n)$	$3.39 \times 10^{-3} (s^{-1})^2$
R_n	3.55 s^{-1}
$\mu_r(CF)$	3.27×10^{-4}
$\mu_r(V_a)$	2.41×10^{-3}
$\mu_r(D)$	-
CF	$3.57 \text{ s}^{-1} / \text{Bq}$
D	0.96
V_a	0.01 L

$$\begin{aligned}
 \mu_c(AC) &= \frac{\sqrt{3.39 \times 10^{-3} (s^{-1})^2 + (3.55 \text{ s}^{-1})^2 * [(3.27 \times 10^{-4})^2 + (2.41 \times 10^{-3})^2]}}{(3.57 \frac{\text{s}^{-1}}{\text{Bq}})(0.96)(0.01 \text{ L})}
 \end{aligned}
 \tag{ec. 3.9}$$

$$\mu_c(AC) = 1.71 \text{ Bq/L}$$

Por lo tanto, el promedio de la actividad del patrón NIST-01 (véase Tabla 3.3) se expresa correctamente de acuerdo a la ecuación 3.10. En la sección 3.3 se presentan los resultados obtenidos de la concentración de gas Radón de cada una de las muestras analizadas con su respectivo valor de la incertidumbre de medición.

$$AC = 104.22 \pm 1.71 \text{ Bq/L} \quad (\text{ec. 3.10})$$

3.1.3. Nivel Crítico y Concentración Mínima Detectable de gas Radón en Agua por el Método ASTM D5072-09 (2016)

El nivel crítico (L_c , véase la sección 2.4.1.3) para la concentración de la actividad de gas Radón viene dado por la ecuación 2.9, sustituyendo los datos correspondientes a la solución patrón NIST-01 (véase la Tabla 3.2): la tasa de recuento del blanco (R_b), el factor de calibración (CF) y del factor de corrección por decaimiento (D, véase la Tabla 3.3), para un volumen de 10 ml analizados por 60 minutos, se ha obtenido un L_c de 1.04 Bq/L.

$$L_c = \frac{2.33 * \sqrt{\frac{0.85 \text{ s}^{-1}}{3600 \text{ s}}}}{3.57 \frac{\text{ s}^{-1}}{\text{ Bq}} * 0.96 * 0.01 \text{ L}} = 1.04 \frac{\text{ Bq}}{\text{ L}} \quad (\text{ec. 3.11})$$

Para el cálculo de la concentración mínima detectable (MDC) de actividad de Radón se utilizan los datos empleados en el cálculo del L_c , concernientes a la solución patrón NIST-01. La MDC se calculó de acuerdo a la ecuación 3.12:

$$\begin{aligned} MDC &= \frac{2.71xJ}{t} + 4.65 \sqrt{\frac{R_b}{t}} / (CF * D * Va) \\ MDC &= \frac{2.71x2.95393649}{3600 \text{ s}} + 4.65 \sqrt{\frac{0.85 \text{ s}^{-1}}{3600 \text{ s}}} / (3.57 \frac{\text{ s}^{-1}}{\text{ Bq}} * 0.97 * 0.01 \text{ L}) \\ &= 2.14 \frac{\text{ Bq}}{\text{ L}} \end{aligned} \quad (\text{ec. 3.12})$$

3.2. CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS DEL CONTROL DE CALIDAD SEGÚN LA METODOLOGÍA ASTM D5072-09 (2016)

Con el fin de implementar adecuadamente el método estandarizado ASTM D5072-09 se realizan pruebas de control de calidad (QC), las cuales consisten en llevar a cabo mediciones rutinarias para demostrar las capacidades de los instrumentos y analistas, verificar la calibración y precisión de los análisis de las muestras y el estado de los equipos (véase la sección 2.4.1.3).

3.2.1. Demostración Inicial de las Capacidades del Laboratorio, Instrumento y Analista

Para este apartado se utilizó un patrón de Radio (^{226}Ra) de concentración 3.80 Bq/ml (véase la Tabla 2.6), la cual se denominó IRD-01, de donde se extrajeron 200 μl para llevar a un volumen final de 10 ml y a una concentración teórica de 76 Bq/L.

$$C_2 = \frac{V_1 * C_1}{V_2} = \frac{200 \times 10^{-6} \text{ L} * 3,800 \text{ Bq/L}}{0.01 \text{ L}} = 76 \text{ Bq/L} \quad (\text{ec. 3.13})$$

A continuación, en la Tabla 3.7 se presentan los datos experimentales obtenidos en el laboratorio concernientes al patrón IRD-01, con el objetivo de calcular su actividad para contrastar el valor experimental con el valor teórico para fines de control de calidad.

Tabla 3.7: Actividad de siete réplicas del patrón de referencia independiente IRD-01.

No	CPS (s ⁻¹)	T (días)	R _n (s ⁻¹)	D	AC (Bq/L)	AC (Bq/L)	(x _{i,k} - x̄ _i) ²
1	5.45	0.24	4.61	0.96	79.44	79.74	0.88
	5.35	0.29	4.50	0.95	80.04		
2	5.35	0.33	4.50	0.94	80.65	80.95	0.07
	5.16	0.37	4.32	0.94	81.26		
3	5.20	0.41	4.35	0.93	81.86	82.17	2.22
	5.20	0.45	4.36	0.92	82.49		
4	5.40	0.23	4.55	0.96	79.18	79.48	1.44
	5.26	0.27	4.42	0.95	79.78		
5	5.42	0.31	4.58	0.95	80.38	80.69	0.00
	5.30	0.35	4.45	0.94	80.99		
6	5.32	0.39	4.48	0.93	81.60	81.91	1.51
	5.43	0.43	4.59	0.92	82.22		
7	5.40	0.25	4.55	0.96	79.52	79.82	0.74
	5.21	0.29	4.36	0.95	80.12		
						ȳ: 80.68	Σ6.87

La desviación estándar experimental de la actividad de siete réplicas del patrón de referencia independiente IRD-01 viene dado por la ecuación 2.7, el resultado se muestra a continuación:

$$s(x_{i,k}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2} = \sqrt{\frac{6.87}{7-1}} = 1.07 \quad (\text{ec. 3.14})$$

El coeficiente de variación para las siete réplicas del patrón NIST-01 se calculó según la ecuación 2.8, el resultado se muestra en la ecuación 3.15:

$$\%CV = \frac{s}{\bar{X}} \times 100 = \frac{1.07}{80.68} \times 100 = 1.33\% \quad (\text{ec. 3.15})$$

Cálculo del porcentaje de error con respecto al valor teórico (76 Bq/L):

$$Sesgo = \frac{80.68 - 76}{76} \times 100 = 6.15\% \quad (\text{ec. 3.16})$$

El rango aceptable para la precisión y sesgo según el método estandarizado ASTM D5072-09 es del 10% y $\pm 10\%$, respectivamente. Los valores calculados son de un 1.33% para la precisión y de 6.15 % para el sesgo. Los cuales se encuentran dentro del límite de aceptación.

Posteriormente, de acuerdo al procedimiento descrito en la Figura 2.12 se analizaron tres réplicas de una matriz de solución en blanco con el equipo de centelleo líquido, obteniendo los datos presentados en la Tabla 3.8, con el objetivo de calcular la actividad de gas Radón para cada una de estas tres soluciones, los datos y resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.9. El resultado de la actividad de cada una de las tres soluciones en blanco debe estar por debajo del nivel crítico para que cumpla el criterio de aceptación del método ASTM D5072-09.

Tabla 3.8: CPM para las soluciones en blanco para la demostración inicial del laboratorio, instrumento y analista.

No	FECHA Y HORA DE EXTRACCIÓN	FECHA Y HORA DE MEDICIÓN	CPM (m ⁻¹)
1	19/7/2019 11:05	19/7/2019 18:34	49.17
	19/7/2019 11:05	19/7/2019 19:34	49.50
2	19/7/2019 11:05	19/7/2019 20:34	49.27
	19/7/2019 11:05	19/7/2019 21:34	49.76
3	19/7/2019 11:05	19/7/2019 22:34	50.07
	19/7/2019 11:05	19/7/2019 23:34	50.73

Tabla 3.9: Actividad de tres soluciones en blanco para la demostración inicial del laboratorio, instrumento y analista.

No	CPS (s ⁻¹)	T (días)	R _n (s ⁻¹)	D	AC (Bq/L)
1	0.82	0.33	-0.03	0.94	-0.83
	0.83	0.37	-0.02	0.93	-0.67
2	0.82	0.42	-0.03	0.93	-0.79
	0.83	0.46	-0.02	0.92	-0.55
3	0.84	0.50	-0.01	0.91	-0.39
	0.85	0.54	0.00	0.91	-0.06

$$AC < Lc = 1.04 \frac{Bq}{L} \quad (\text{ec. 3.17})$$

Como se presenta en la Tabla 3.9 la actividad de cada una de las soluciones en blanco es menor al límite crítico (véase la sección 3.1.3), cumpliendo con los requerimientos que establece la norma ASTM D5072-09.

3.2.2. Verificación de la Calibración del Método ASTM D5072-09 (2016)

Para asegurarse que el método de prueba está dentro de los límites de control del método ASTM D5072-09, se debe realizar una prueba estándar de verificación de la calibración (véase la Figura 2.13). Para este apartado se utilizó un tercer patrón de referencia denominado CIAN-01 con una actividad radiológica de 9,948 Bq/L, de donde se extrajeron 200 µl para llevar a un aforo de 10 ml con una concentración de 198.96 Bq/L.

$$C_2 = \frac{V_1 * C_1}{V_2} = \frac{200 \times 10^{-6} L * 9,948 \text{ Bq/L}}{0.01 L} = 198.96 \text{ Bq/L} \quad (\text{ec. 3.18})$$

En la Tabla 3.10 se presenta la actividad experimental del patrón de referencia independiente CIAN-01 para un volumen final de 10 ml.

Tabla 3.10: Actividad del patrón de referencia CIAN-01.

No	CPS (s ⁻¹)	T (días)	R _n (s ⁻¹)	D	AC (Bq/L)	AC (Bq/L)
1	13.14	0.34	12.29	0.94	211.42	212.22
	12.78	0.38	11.93	0.93	213.02	
2	13.13	0.42	12.28	0.93	214.64	215.45
	13.12	0.46	12.28	0.92	216.26	
					Promedio	213.83

$$\%error = \frac{213.83 - 198.96}{198.96} \times 100 = 7.474 \% \quad (\text{ec. 3.19})$$

El rango aceptable para el valor obtenido según el método estandarizado ASTM D5072-09 debe situarse dentro del límite del 15% del valor esperado. El porcentaje de error de 7.47% se encuentra por debajo del 15%, por lo tanto, los datos se encuentran dentro del límite de aceptación.

3.2.3. Cálculo de la Actividad de las Muestras en Blanco por Cada Lote de Medición

Se llevó a cabo el análisis de un blanco de prueba de reactivo con cada lote de muestreo por campaña (véase la Figura 2.14). La concentración de gas Radón encontrada en el blanco por cada lote de análisis es menor que el nivel crítico de 1.04 Bq/L como puede observarse en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11: Actividad de un blanco de prueba por cada lote de medición.

BLANCO	CPM	FECHA Y HORA DE EXTRACCIÓN	FECHA Y HORA DE MEDICIÓN	CPS (Ra)	Rn	T (días)	D	AC (Bq/L)
1	47.43	5/4/2019 10:00	6/4/2019 12:00	0.79	-0.06	1.09	0.82	-1.94
2	52.73	25/4/2019 10:45	26/4/2019 1:45	0.88	0.03	0.64	0.89	0.99
3	47.43	8/5/2019 11:47	9/5/2019 2:47	0.79	-0.06	0.64	0.89	-1.79
4	47.98	15/5/2019 12:15	16/5/2019 13:15	0.80	-0.05	1.06	0.83	-1.62
5	47.1	23/5/2019 11:51	24/5/2019 16:51	0.79	-0.06	1.23	0.80	-2.18
6	46.25	29/5/2019 11:59	30/5/2019 18:59	0.77	-0.08	1.31	0.79	-2.72
7	46.98	5/6/2019 11:22	6/6/2019 16:22	0.78	-0.06	1.23	0.80	-2.25
8	47.63	20/6/2019 10:08	22/6/2019 7:53	0.79	-0.05	1.93	0.71	-2.13

3.2.4. Cálculo de las Pruebas por Duplicado por Cada Muestra de Agua

Para verificar la precisión del duplicado de los análisis de las muestras, se analizaron todas las muestras por duplicado en todas las campañas de muestreo por medio de la prueba DER (véase la Figura 2.15). Se calculó el acuerdo estadístico de duplicación de error (DER) entre los dos resultados de actividad de gas Radón según la ecuación 3.20, los resultados se presentan de la Tabla A-1 a la Tabla A-8 del Anexo A.

$$DER = \frac{|AC_S - AC_D|}{\sqrt{u^2(AC_S) + u^2(AC_D)}} \quad (\text{ec. 3.20})$$

En la matriz de vapor condensado proveniente de fumarola se encontraron valores de DER por encima del límite expuesto (véase el Anexo A), posiblemente este sobresalto se deba al hecho que los duplicados de las muestras de condensado se tomaron en tiempos distintos, debido a que la ampolla de doble salida se llenaba hasta tres veces para llegar a obtener el volumen de muestra que los análisis fisicoquímicos requerían, la condensación de vapor en este proceso puede alterar las concentraciones de ^{222}Rn , debido a que el tiempo para condensar una muestra no era el mismo ya que el flujo de vapor es variable en una fumarola. Por consiguiente, debe valorarse si las pruebas DER para el duplicado de muestras deben realizarse sobre la base del proceso experimental en el muestreo de fumarolas o en el análisis experimental para una sola muestra de vapor condensado recolectado en una sola ampolla de condensación de doble salida.

3.3. RESULTADOS DE LA CUANTIFICACIÓN DE GAS RADÓN EN LOS SITIOS DE MUESTREO

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la cuantificación de la actividad de gas Radón en muestras de agua para cada uno de los puntos muestreados.

3.3.1. Cuantificación de Gas Radón en Muestras de Agua Subterránea: Pozos Mirasol, Instituto Agrícola y San Luis

La Tabla 3.12 se presentan los valores calculados de concentraciones de gas Radón (^{222}Rn) en las muestras de agua colectadas de los pozos de uso doméstico utilizados para el consumo humano: Pozo Mirasol, Instituto Agrícola y Col. San Luis #2.

Tabla 3.12: Concentraciones de gas Radón en muestras de agua de pozos.

FECHA	POZO MIRASOL	POZO INST. AGRÍCOLA	POZO SAN LUIS
04-04-19	No se realizó	<MDC	<MDC
24-04-19	<MDC	<MDC	<MDC
07-05-19	<MDC	<MDC	2.31 ± 1.15 Bq/L
14-05-19	No se realizó	<MDC	<MDC
22-05-19	2.17 ± 0.79 Bq/L	<MDC	2.76 ± 0.82 Bq/L
28-05-19	<MDC	<MDC	<MDC
04-06-19	2.37 ± 0.83 Bq/L	<MDC	2.72 ± 0.83 Bq/L
19-06-19	<MDC	<MDC	2.39 ± 0.79 Bq/L

MDC: Concentración mínima detectable (2.14 Bq/L)

Todos presentaron valores menores a la concentración mínima detectable (MDC) en al menos tres muestreos realizados a largo de las ocho campañas de muestreo; en el caso del pozo Mirasol hubo dos muestreos que no pudieron realizarse debido a dificultades para la entrada al sitio de muestreo.

3.3.2. Cuantificación de Gas Radón en Muestras de Agua Superficial: Río Apunia, Río Cashalate, Fuente El Cashal, Agua Shuca y Fuente El Cashal Caliente

La Tabla 3.13 muestra la actividad de gas Radón (^{222}Rn) de las fuentes de agua superficial. La Fuente El Cashal y Agua Shuca poseen los valores más altos, seguidos por Apunia, el punto “B” en el Río El Playón y Fuente El Cashal Caliente. El punto “A” en el Río El Playón presentó concentraciones menores a la concentración mínima detectable (véase la sección 3.1.3) y en Agua Shuca hubo dos muestreos que no pudieron realizarse por temas de permisos de entrada al lugar.

Tabla 3.13: Concentración de gas Radón (Bq/L) en muestras de agua de fuentes superficiales: Río Apunia, Río Cashalate, Fuente El Cashal, Agua Shuca y Fuente El Cashal Caliente.

FECHA (AÑO 2019)	FUENTE EL CASHAL	RÍO APUNIA	FUENTE EL CASHAL CALIENTE	AGUA SHUCA	RÍO CASHALATE		
					"A"	"B"	"C"
04-04	15.37±1.41	5.84±1.22	3.65 ± 1.16	No se realizó	<MDC	6.22±1.22	<MDC
24-04	14.39±1.45	5.61±1.26	4.77±1.24	6.19±1.28	<MDC	<MDC	<MDC
07-05	15.95±1.44	8.43±1.39	5.30±1.21	18.32±1.49	<MDC	5.69±1.24	<MDC
14-05	14.57±1.12	5.55±0.88	4.86±0.84	21.85±1.18	<MDC	8.72±0.94	<MDC
22-05	16.90±1.10	6.32±0.91	5.43±0.90	15.48±1.13	<MDC	10.03±1.00	<MDC
28-05	15.93±1.13	5.91±0.96	4.47±0.96	10.89±1.09	<MDC	5.51±0.92	<MDC
04-06	12.98±1.03	5.31±0.90	3.99±0.91	No se realizó	<MDC	7.16±0.98	<MDC
19-06	14.20±1.21	4.91±1.06	3.58±1.06	18.24±1.23	<MDC	7.51±1.05	<MDC

3.3.3. Cuantificación de Gas Radón en Muestras de Vapor Condensado Proveniente de Fumarola El Sauce y Fumarola El Playón

Las actividades de gas Radón (^{222}Rn) en muestras de vapor condensado provenientes de fumarolas se muestran en la Tabla 3.14, se observan valores altos en todos los puntos y esto se debe a que las fumarolas son manifestaciones hidrotermales con conexión directa a la actividad geotérmica en la zona (véase la sección 2.2.3). En el muestreo del 22-05-19 se obtuvo

un valor menor al MDC, esto se debió a un cambio en la metodología de muestreo que dejó como consecuencia la pérdida del gas al recolectar la muestra.

Tabla 3.14: Concentración de gas Radón en muestras de vapor condensado de fumarola.

FECHA	FUMAROLA EL SAUCE	FUMAROLA EL PLAYÓN
04-04-19	19.74 ± 1.50	9.94 ± 1.31
24-04-19	15.58 ± 1.47	36.11 ± 1.75
07-05-19	12.02 ± 1.36	7.09 ± 1.28
14-05-19	29.60 ± 1.32	49.45 ± 1.49
22-05-19	<MDC	21.01 ± 1.20
28-05-19	10.87 ± 1.09	45.48 ± 1.54
04-06-19	21.70 ± 1.24	28.25 ± 1.31
19-06-19	28.88 ± 1.35	26.03 ± 1.29

3.3.4. Mapa de Concentraciones de Radón en el Área de Estudio, Ahuachapán

La Figura 3.1 muestra un mapa de contornos junto con los distintos puntos de muestreo, para este análisis no se tomaron en cuenta los pozos ya que sus concentraciones se encuentran por debajo del MDC. Se observa que la mayor concentración de gas Radón (^{222}Rn) está en la zona de El Playón y El Sauce, disminuyendo hacia las fuentes ubicadas en El Cashal y Agua Shuca.

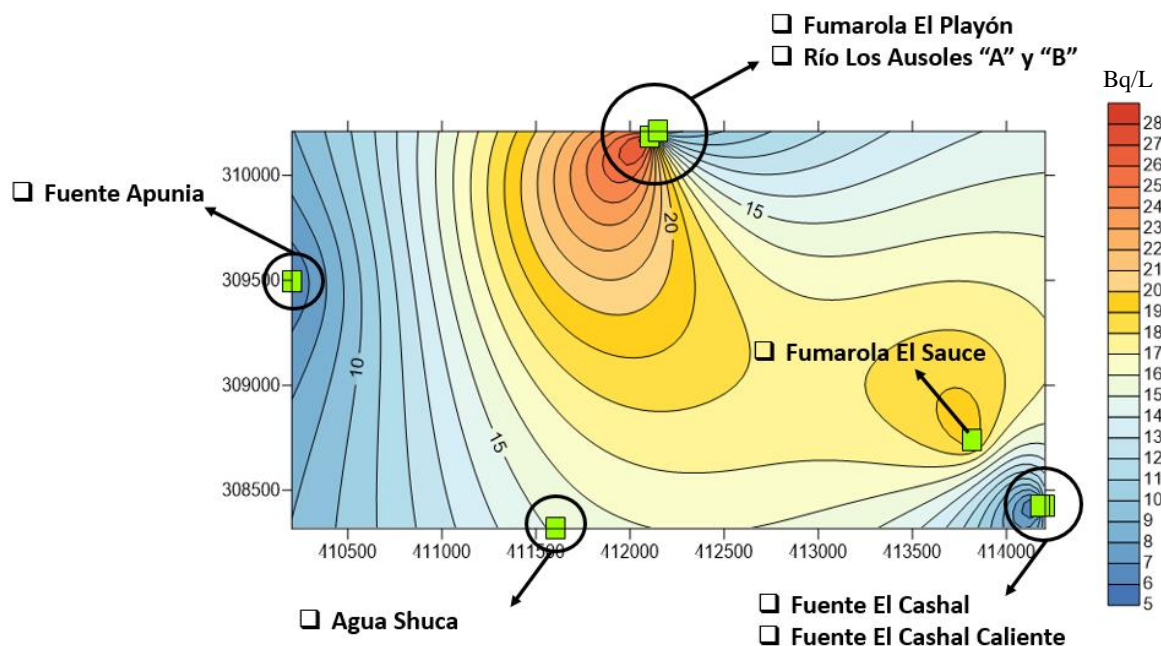


Figura 3.1: Mapa de contornos para las concentraciones de gas Radón en agua del área de estudio, Ahuachapán.

3.3.5. Mapa de Concentraciones de Radón y Fallas Geológicas en la Zona de Estudio, Ahuachapán

Las mayores concentraciones de gas Radón se observan en la zona de El Playón y El Sauce, seguidas por Agua Shuca (véase la sección 3.3.4), en la Figura 3.2 se observa que estos sitios son atravesados por fallas geológicas permitiendo una mayor permeabilidad y ascenso de fluidos, entre ellos fluido geotérmico y gases provenientes del Reservorio, incluido el gas Radón (^{222}Rn).

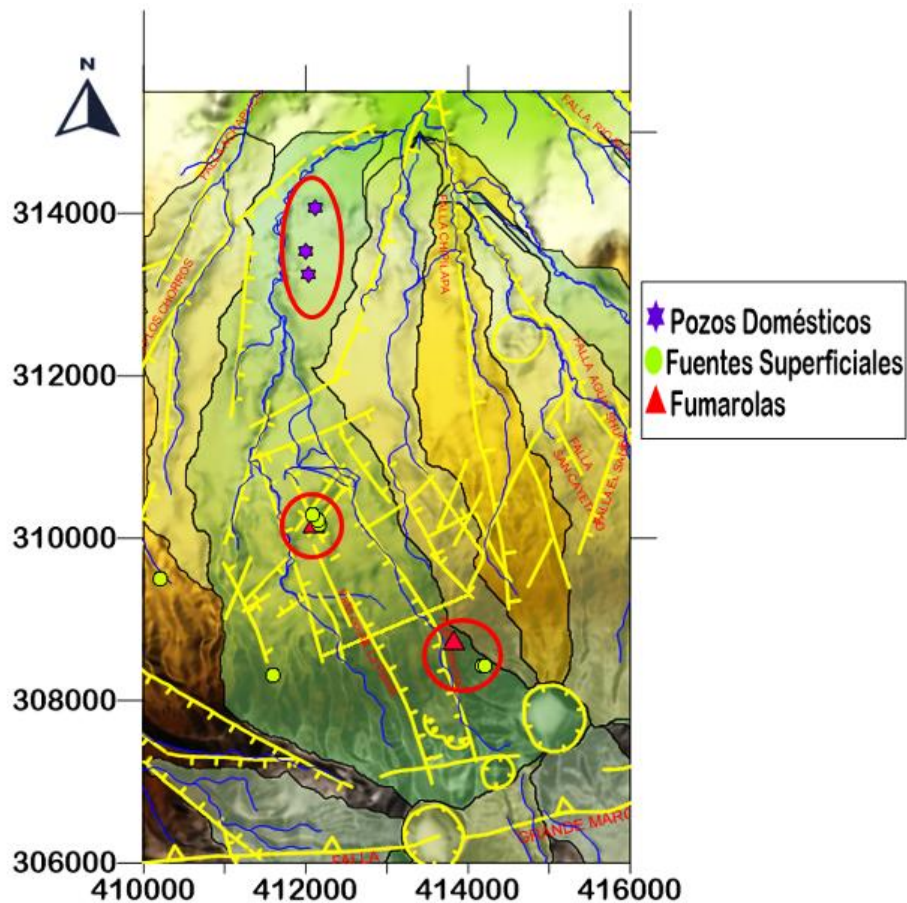


Figura 3.2: Fallas geológicas dentro del área de estudio, Ahuachapán (Matus, 2019).

3.4. MEDICIÓN DE PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS EN MUESTRAS DE AGUA SUPERFICIAL, SUBTERRÁNEA Y DE VAPOR CONDENSADO

Los parámetros fisicoquímicos resultan muy útiles al momento de la caracterización de las aguas, a continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada punto de muestreo en cada campaña de medición.

3.4.1. Parámetros Fisicoquímicos en Muestras de Agua Subterránea: Pozos Mirasol, Instituto Agrícola y San Luis

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en los pozos cuya agua es destinada al consumo humano, la Tabla 3.15 muestra cada uno de los parámetros medidos durante las distintas campañas de muestreo realizadas. Es importante mencionar que estos pozos poseen temperaturas cercanas a la ambiente, pH neutros y valores de Cloruros menores a 100 ppm lo cual indica que son aguas frescas.

Tabla 3.15: Parámetros fisicoquímicos en muestras de agua subterránea: pozos Mirasol, Instituto Agrícola y San Luis.

AGUA SUBTERRÁNEA (POZOS DESTINADOS A CONSUMO HUMANO)									
Pozo	N° de Muestreo	Temp	pH	σ^*	SPC**	TDS	DO	DO	Cloruros
		°C		$\mu\text{s/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	ppm	%	mg/L	ppm
Pozo Mirasol	2	27.7	6.27	500	485.0	464.62	57.5	4.63	48.61
	3	30.5	6.17	520	509.0	500.00	57.2	4.60	62.17
	5	26.2	6.57	520	504.0	500.00	59.3	4.79	62.59
	6	28.5	6.26	520	521.0	510.77	55.7	4.57	60.70
	7	29.2	6.63	498	503.8	446.15	73.2	6.12	63.36
	8	26.8	6.48	520	500.0	500.00	86.4	7.01	61.50
Pozo	N° de Muestreo	Temp	pH	σ	SPC	TDS	DO	DO	Cloruros
Instituto Agrícola		27.0		6.63	$\mu\text{s/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	ppm	%	mg/L
	2	30.3	6.55	332	344.4	330.77	54.8	4.69	84.64
	3	29.9	6.54	358	350.2	350.77	60.8	4.87	62.96
	4	27.0	6.46	341	331.0	333.85	63.2	5.12	97.75
	5	27.0	6.46	307	340.2	290.77	73.2	6.25	75.70
	6	26.5	6.75	338	330.0	329.23	57.7	4.68	88.60
	7	27.3	6.57	339	336.3	332.31	56.0	4.61	76.95
	8	26.8	6.64	333	330.0	336.92	120.1	9.87	67.87
Col. San Luis 2		26.7	6.56	342	341.9	335.38	129.8	10.31	61.23
	1	29.0	6.54	350	359.1	355.38	71.4	6.00	76.24
	2	31.4	6.58	364	370.3	361.54	59.1	4.69	65.20
	3	30.2	6.62	368	385.3	356.92	60.7	4.96	111.91
	4	29.4	6.34	340	361.4	360.00	59.5	5.06	92.36
	5	26.5	6.75	338	330.0	329.23	57.7	4.68	88.60
	6	29.3	6.53	348	341.6	321.54	61.3	5.03	94.13
	7	29.4	6.68	354	352.8	350.77	70.9	5.85	87.17
8	29.4	6.65	367	360.1	363.08	89.4	7.29	70.81	

* Conductividad

** Conductancia específica

3.4.2. Parámetros Físicoquímicos en Muestras de Agua Superficial: Río Apunia, Río Cashalate, Fuente El Cashal, Agua Shuca y Fuente El Cashal Caliente

Los resultados de los análisis físicoquímicos para muestras de agua superficial se han dividido en: agua para el consumo humano, agua superficial (no utilizada para el consumo humano) y agua superficial de mezcla.

3.4.2.1. Parámetros físicoquímicos en muestras de agua superficial de consumo humano: río Apunia, fuente El Cashal.

Dentro de esta clasificación aparecen aquellas aguas que se encuentran en la superficie y están destinadas al consumo humano, las fuentes Apunia y El Cashal abastecen gran parte de la población del municipio de Ahuachapán (véase la Tabla 2.3). Los resultados de los parámetros físicoquímicos para estas fuentes se presentan a continuación en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16: Parámetros físicoquímicos en muestras de agua superficial de consumo humano.

AGUA SUPERFICIAL DE CONSUMO HUMANO									
Punto de Muestreo	N°	Temp	pH	σ	SPC	TDS	DO	DO	Cloruros
		°C		$\mu\text{S}/\text{cm}$	$\mu\text{S}/\text{cm}$	ppm	%	mg/L	ppm
Fuente El Cashal	1	22.50	6.20	220	213.30	215.38	61.10	5.10	12.14
	2	22.50	6.14	217	210.50	215.38	55.80	4.44	12.33
	3	24.10	6.16	200	258.00	246.15	65.40	4.79	18.75
	4	23.20	5.98	185	189.60	184.62	50.10	4.26	16.87
	5	22.00	6.24	201	197.10	200.00	67.30	5.43	15.37
	6	21.60	6.25	190	18.87	184.62	66.90	4.67	14.96
	7	21.80	6.21	184	186.90	184.62	74.00	6.20	10.13
	8	22.00	6.19	197	198.90	200.00	63.40	5.15	8.07
Punto de Muestreo	N°	Temp	pH	σ	SPC	TDS	DO	DO	Cloruros
		°C		$\mu\text{S}/\text{cm}$	$\mu\text{S}/\text{cm}$	ppm	%	mg/L	ppm
Río Apunia	1	26.80	6.17	170	170.00	169.23	53.70	4.47	16.62
	2	26.80	6.14	300	340.50	369.23	55.50	4.45	37.17
	3	27.90	5.86	313	300.50	292.31	76.00	6.21	58.61
	4	27.30	6.09	300	310.00	292.31	44.20	3.76	53.80
	5	26.90	6.10	312	300.40	307.69	65.30	5.25	67.07
	6	26.90	6.18	303	302.10	307.69	70.80	5.80	53.88
	7	26.70	6.64	303	311.10	307.69	75.50	6.40	42.14
	8	26.80	6.08	318	308.60	307.69	76.80	6.22	34.94

3.4.2.2. Parámetros físicoquímicos en muestras de agua superficial: río Cashalate.

Son aquellas aguas que se encuentran en superficie y están orientadas a otros usos (excepto para consumo humano), en el Anexo H se muestran los puntos de muestreo a lo largo del río

El Playón en las cercanías de la zona hidrotermal El Playón. Como puede observarse en la Tabla 3.17, estos puntos mostraron temperaturas alrededor de los 30°C, pH neutros y valores de Cloruros que indican que son aguas frescas.

Tabla 3.17: *Parámetros fisicoquímicos en muestras de agua superficial en el río Cashalate.*

AGUA SUPERFICIAL									
Punto de Muestreo	N°	Temp	pH	σ	SPC	TDS	DO	DO	Cloruros
		°C		$\mu\text{s/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	ppm	%	mg/L	ppm
Río El Playón "A"	1	27.9	6.90	412	415.0	418.00	60.50	5.10	71.28
	2	25.7	6.92	425	408.1	413.08	67.00	5.30	76.42
	3	28.6	6.13	520	508.0	510.00	46.30	3.78	115.60
	4	27.4	6.19	418	430.9	432.00	61.60	5.26	93.25
	5	27.0	6.52	425	421.6	421.08	53.00	4.30	116.94
	6	27.0	5.40	485	476.4	479.08	51.60	4.23	118.13
	7	27.6	6.43	447	454.0	433.08	67.90	5.69	87.81
	8	29.7	6.87	372	370.1	372.00	73.10	6.00	58.29
Punto de Muestreo	N°	Temp	pH	σ	SPC	TDS	DO	DO	Cloruros
		°C		$\mu\text{s/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	ppm	%	mg/L	ppm
Río El Playón "C"	1	32.5	7.00	410	416.7	418.46	54.90	4.61	74.50
	2	31.2	6.98	421	410.5	407.08	57.10	4.54	65.36
	3	32.1	6.13	520	507.0	510.00	56.20	4.55	106.94
	4	35.6	6.44	415	439.7	440.00	53.10	4.57	92.96
	5	29.6	6.76	431	170.0	263.08	53.50	4.34	118.68
	6	28.7	4.91	484	481.0	479.08	53.90	4.41	112.78
	7	28.5	6.44	439	433.8	434.92	70.20	5.83	85.13
	8	32.5	7.07	373	374.3	365.08	69.50	5.64	57.47

3.4.2.3. Parámetros fisicoquímicos en muestras de agua superficial de mezcla: fuente El Cashal Caliente, río El Playón "B", Agua Shuca.

La zona de estudio tiene potencial geotérmico y por lo tanto algunas aguas dentro de la micro-cuenca se ven influenciadas por esta actividad hidrotermal, de acuerdo a los datos presentados en la Tabla 3.18 la fuente El Cashal Caliente y el Río El Playón "B" mostraron temperaturas entre los 30 y 40°C, pH neutros y sus cloruros indican que pueden ser aguas frescas; sin embargo, su temperatura no corresponde a la de un agua fresca y por ello se intuye que pueden estar siendo influenciadas por una cantidad apreciable de agua geotérmica convirtiéndose así en aguas superficiales de mezcla.

En el caso de Agua Shuca, sus parámetros fisicoquímicos resultaron ser bastante diferentes a los de El Cashal Caliente y Río El Playón “B”, se observan valores de temperatura mínima de 44.2°C y máxima de 66.7°C, pH ácidos y Cloruros más altos que en las otras dos fuentes. Por lo tanto, estas aguas a pesar de ser superficiales poseen una influencia de vapor y de agua geotérmica (véase la Tabla 3.18).

Tabla 3.18: Parámetros fisicoquímicos en muestras de agua superficial de mezcla: fuente El Cashal Caliente, río El Playón “B”, Agua Shuca.

AGUA SUPERFICIAL DE MEZCLA									
Punto de Muestreo	N°	Temp	pH	σ	SPC	TDS	DO	DO	Cloruros
		°C		$\mu\text{s/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	ppm	%	mg/L	ppm
Fuente El Cashal Caliente	1	38.2	6.04	340.00	324.1	338.46	56.80	4.79	66.19
	2	37.9	5.93	550.00	520.0	553.85	48.90	3.90	77.50
	3	40.1	5.95	560.00	526.0	538.46	82.60	6.68	114.36
	4	38.7	5.90	590.00	575.0	569.23	71.80	6.08	124.46
	5	38.5	6.01	540.00	539.0	538.46	71.00	5.75	117.82
	6	37.4	5.97	550.00	538.0	538.46	56.40	4.63	109.20
	7	38.4	5.96	540.00	527.0	538.46	62.20	5.12	92.76
	8	38.0	6.01	520.00	529.0	523.08	109.40	8.86	86.03
Punto de Muestreo	N°	Temp	pH	σ	SPC	TDS	DO	DO	Cloruros
		°C		$\mu\text{s/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	ppm	%	mg/L	ppm
Río El Playón "B"	1	30.80	6.85	376.00	61.79	384.62	57.00	4.78	59.12
	2	27.20	6.38	423.00	409.00	415.38	54.70	4.36	66.28
	3	35.50	5.91	510.00	506.00	507.69	55.90	4.73	113.91
	4	30.60	6.13	417.00	439.90	430.77	42.70	3.66	87.18
	5	38.50	6.37	418.00	389.00	338.46	54.20	4.40	109.50
	6	40.50	4.97	483.00	479.00	476.92	51.70	4.24	109.14
	7	40.20	6.10	434.00	439.50	430.77	63.00	5.27	83.34
	8	34.00	6.50	374.00	370.20	369.23	82.10	6.70	58.96
Punto de Muestreo	N°	Temp	pH	σ	SPC	TDS	DO	DO	Cloruros
		°C		$\mu\text{s/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	ppm	%	mg/L	ppm
Agua Shuca	2	65.2	3.92	1540	1480	1480.00	521	4.15	222.90
	3	49.9	4.09	1520	1445	1470.77	64.6	5.20	299.61
	4	44.2	4.07	1170	1236	1230.77	64.7	5.47	354.69
	5	49.9	4.11	1290	1256	1250.77	68.3	5.49	374.84
	6	65.5	3.97	1450	1442	1450.77	65.4	5.37	347.73
	8	66.7	4.38	950	909	920.00	66.5	5.34	194.03

3.4.2.4. Parámetros fisicoquímicos para muestras de vapor condensado proveniente de fumarola El Playón y El Sauce.

Son manifestaciones hidrotermales con características apreciablemente diferentes a las de las otras matrices, poseen temperaturas arriba de los 95°C, pH oscilantes entre 5 y 6 y cloruros

bajos. Sin embargo, se puede observar que los valores de los parámetros fisicoquímicos de ambas fumarolas son bastante similares entre sí. La Tabla 3.19 muestra los resultados de esta matriz.

Tabla 3.19: Parámetros fisicoquímicos en muestras de vapor condensado de fumarola El Playón y El Sauce.

VAPOR CONDESADO PROVENIENTE DE FUMAROLAS									
Punto de Muestreo	N°	Temp	pH	σ	SPC	TDS	DO	DO	Cloruros
		°C		$\mu\text{s/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	ppm	%	mg/L	ppm
Fumarola El Sauce	1	97.1	5.38	18.0	17.6	18.46	53.5	4.43	13.26
	2	97.1	6.20	20.0	19.3	20.00	43.9	3.53	9.30
	3	97.3	6.43	13.0	12.9	12.31	77.8	6.36	5.45
	4	96.3	5.12	34.0	139.0	138.46	64.2	5.55	82.40
	5	96.3	5.90	20.0	20.0	20.00	69.5	5.63	6.67
	6	96.0	5.98	28.0	27.6	27.69	69.8	5.71	13.49
	7	96.7	5.85	22.0	22.0	21.54	94.5	7.80	10.52
	8	96.3	5.25	21.0	20.4	20.00	63.1	5.14	9.82
Punto de Muestreo	N°	Temp	pH	σ	SPC	TDS	DO	DO	Cloruros
		°C		$\mu\text{s/cm}$	$\mu\text{S/cm}$	ppm	%	mg/L	ppm
Fumarola El Playón	1	97.6	4.90	5.0	4.8	50.77	52.2	4.33	3.02
	2	97.6	5.90	12.0	12.0	10.77	55.1	4.46	9.03
	3	98.8	5.81	16.0	15.4	15.38	59.5	4.82	12.28
	4	98.3	5.30	20.0	20.3	20.00	69.1	5.88	32.88
	5	98.3	6.16	11.0	10.8	10.77	57.3	4.66	6.22
	6	97.3	4.91	17.0	17.0	16.92	53.0	4.35	27.00
	7	98.6	5.77	11.0	11.0	10.77	117.9	10.12	8.83
	8	97.6	5.80	16.0	15.9	15.38	54.3	4.28	9.17

3.4.3. Comparación de los Parámetros Fisicoquímicos en las Matrices de Agua Subterránea, Superficial y Vapor Condensado de Fumarola, Ahuachapán

Los parámetros fisicoquímicos resultan muy útiles al momento de la caracterización de las aguas. Considerando la poca variabilidad observada en los parámetros fisicoquímicos en cada uno de los puntos de muestreo, se determinaron los valores medios para los diferentes parámetros analizados, cuyos resultados se describen en la Tabla 3.20, con el propósito de realizar una comparación gráfica entre cada uno de los puntos de muestreo de las diferentes matrices de agua seleccionadas. Se obviaron los puntos “A” y “C” del río El Playón debido a que no presentaron niveles de concentración de gas Radón por arriba del valor del límite crítico (1.04 Bq/L)

Tabla 3.20: Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos en muestras de agua subterránea, superficial y vapor condensado de fumarola, Ahuachapán.

VALORES PROMEDIO POR CADA PUNTO DE MUESTREO						
Punto de Muestreo	Temp	pH	σ^*	TDS	DO	Cloruros
	°C		$\mu\text{s/cm}$	ppm	mg/L	ppm
Pozo Mirasol	28.15	6.40	513.00	486.92	5.29	59.82
Pozo San Luis	29.33	6.59	353.63	349.81	5.45	85.80
Pozo Inst. Agrícola	27.69	6.59	336.25	330.00	6.30	76.96
Río Apunia	27.01	6.16	289.88	294.23	5.32	45.53
Fuente El Cashal	22.46	6.17	199.25	203.85	5.01	13.58
El Cashal Caliente	38.40	5.97	523.75	517.31	5.73	98.54
Río El Playón "B"	34.66	6.15	429.38	419.23	4.77	85.93
Fumarola El Sauce	96.64	5.76	22.00	34.81	5.52	18.86
Fumarola El Playón	98.01	5.57	13.50	18.85	5.36	13.55
Agua Shuca	56.90	4.09	1320.00	1300.51	5.17	298.97

* Conductividad

i. Temperatura

De acuerdo a la gráfica en la Figura 3.3 la temperatura del agua en las fuentes de consumo humano (pozos Mirasol, San Luis, Instituto Agrícola fuente El Cashal y Apunia) se comportó en un rango de 22-29 °C en correspondencia a la época del año y las características climatológicas de los sitios de muestro.

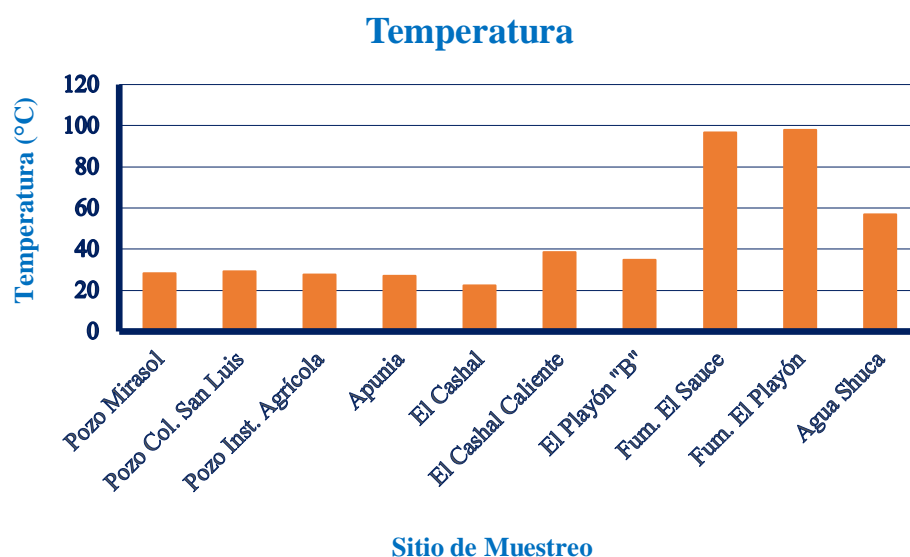


Figura 3.3: Valores promedio de temperatura en muestras de agua subterránea, superficial y vapor condensado de fumarola, Ahuachapán.

Algunas aguas dentro de la microcuenca se ven influenciadas por actividad hidrotermal; como consecuencia del potencial geotérmico en la zona, de acuerdo a los datos presentados en la Figura 3.3 los puntos denominados fuente El Cashal Caliente y el Río El Playón “B” mostraron temperaturas entre los 34 y 38 °C.

Las fumarolas, al ser manifestaciones hidrotermales, poseen características apreciablemente diferentes a las de las otras matrices con temperaturas arriba de los 95 °C.

ii. Unidades de pH

Los valores promedios de pH para las aguas de consumo humano (6.2 – 6.6 unidades) graficados en la Figura 3.4 están dentro del Límite Máximo Permisible establecidos por el RTS 12.02.01:14 (6,0 - 8,5 unidades), por lo que se consideran aguas neutras.

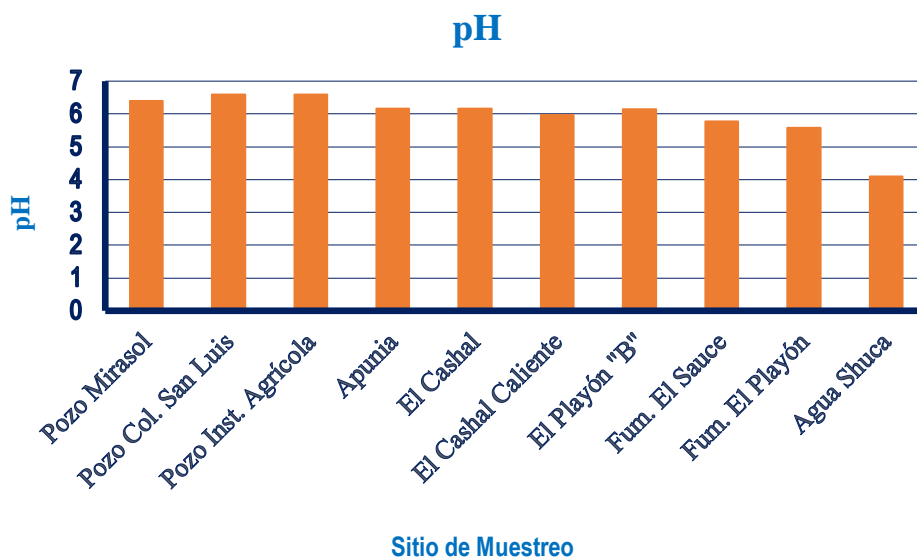


Figura 3.4: Valores promedio de unidades de pH en muestras de agua subterránea, superficial y vapor condensado de fumarola, Ahuachapán.

iii. Conductividad

La conductividad eléctrica refleja la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, se determina con el objetivo de relacionarlo con el contenido de sales disueltas en estas muestras de agua, los valores promedio en cada punto de muestreo se han graficado en la Figura 3.5.

La conductividad media en los pozos es de 336-513 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando que estas aguas presentan un riesgo de salinidad bajo.

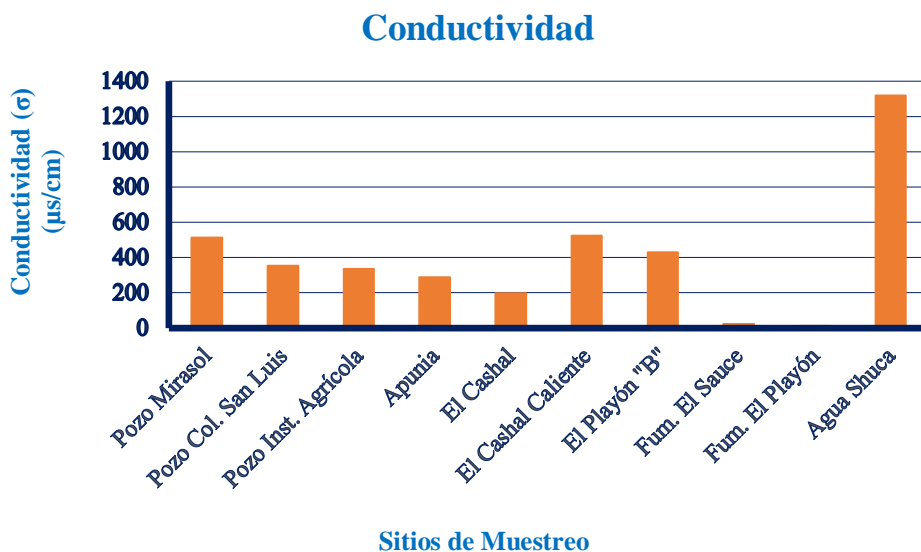


Figura 3.5: Valores promedio de conductividad en muestras de agua subterránea, superficial y vapor condensado de fumarola, Ahuachapán.

iv. Sólidos Totales Disueltos (TDS)

Este valor representa la concentración total de sustancias disueltas en el agua. Los Sólidos Totales Disueltos (TDS) para cada punto de muestreo se presenta en la Figura 3.6. Los TDS se componen de sales inorgánicas, así como una pequeña cantidad de materia orgánica.

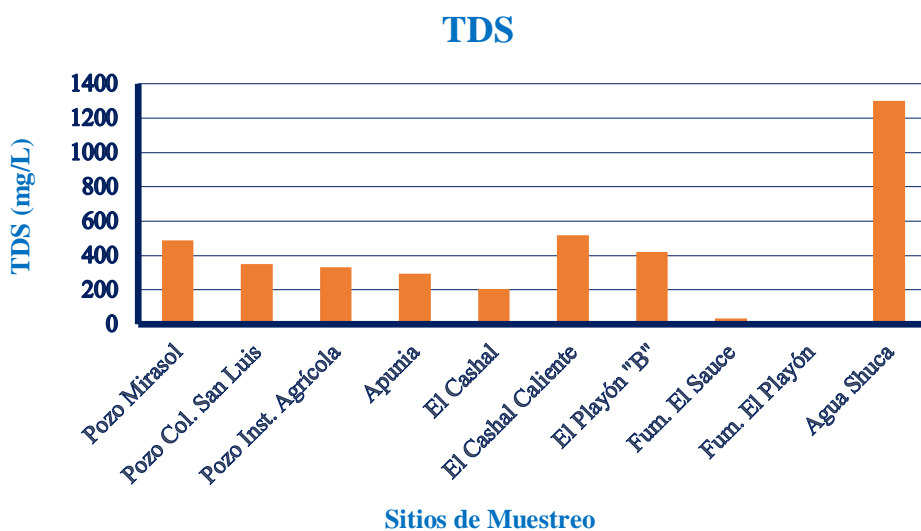


Figura 3.6: Valores promedio de TDS en muestras de agua subterránea, superficial y vapor condensado de fumarola, Ahuachapán.

Las sales inorgánicas comunes que se pueden encontrar en el agua incluyen calcio, magnesio, potasio y sodio, que son todos cationes, y carbonatos, nitratos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos, que son todos aniones. Por lo tanto, la conductividad eléctrica está relacionada con TDS.

De acuerdo a la Figura 3.6 los valores promedio de TDS en las aguas de consumo humano (pozos Mirasol, San Luis, Instituto Agrícola fuente El Cashal y Apunia) se encuentran por debajo del Límite Máximo Permisible de acuerdo al RTS 13.02.01:14 TDS: 1000 mg/L.

v. Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto (DO) se considera un indicador de contaminación por materia orgánica. Las concentraciones bajas de oxígeno disuelto pueden localizarse donde la materia orgánica está en descomposición, lo que significa que las bacterias utilizan el oxígeno para descomponer el desecho.

Generalmente las aguas con concentraciones de DO por encima de 4.0 mg/L son consideradas de buena calidad. Los valores promedio de DO correspondientes a las muestras de agua de consumo humano (pozos Mirasol, San Luis, Instituto Agrícola fuente El Cashal y Apunia) se encuentran por arriba de los 4 mg/L, como se observa en la Figura 3.7.

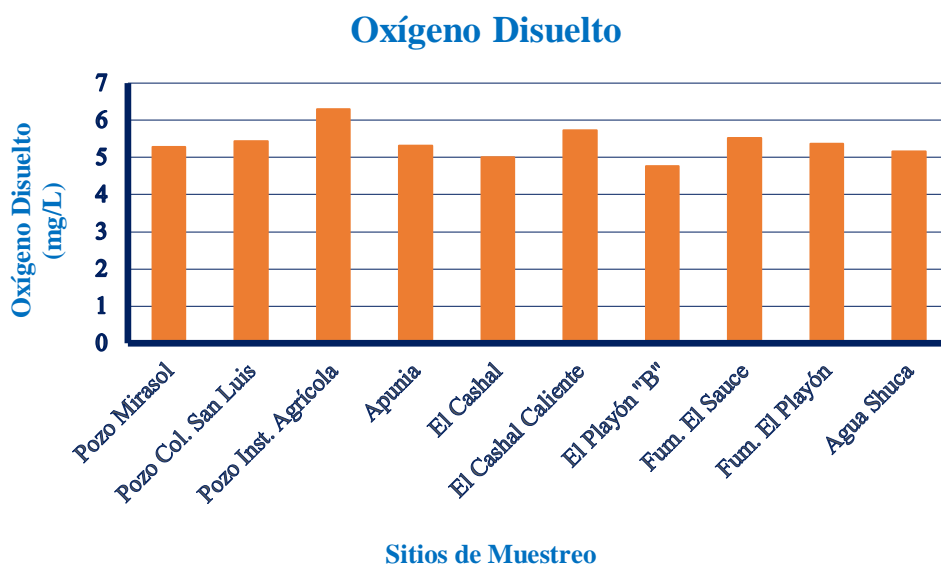


Figura 3.7: Valores promedio de DO en muestras de agua subterránea, superficial y vapor condensado de fumarola, Ahuachapán.

vi. *Cloruros (Cl⁻)*

Una concentración de cloruros máxima permisible recomendada para aguas de consumo humano es de 250 mg/L. las muestras de las fuentes de agua para consumo humano presentaron concentraciones menores a 100 mg/L. En el caso de las fuentes de agua que no son utilizadas para consumo humano sobresale el punto de muestreo denominado Agua Shuca, con concentraciones cerca de los 300 mg/L; el agua de lluvia y la influencia geotérmica de la zona puede ser una fuente importante de ion cloruro en este punto. Los valores promedios de las muestras colectadas se encuentran graficados en la Figura 3.8.

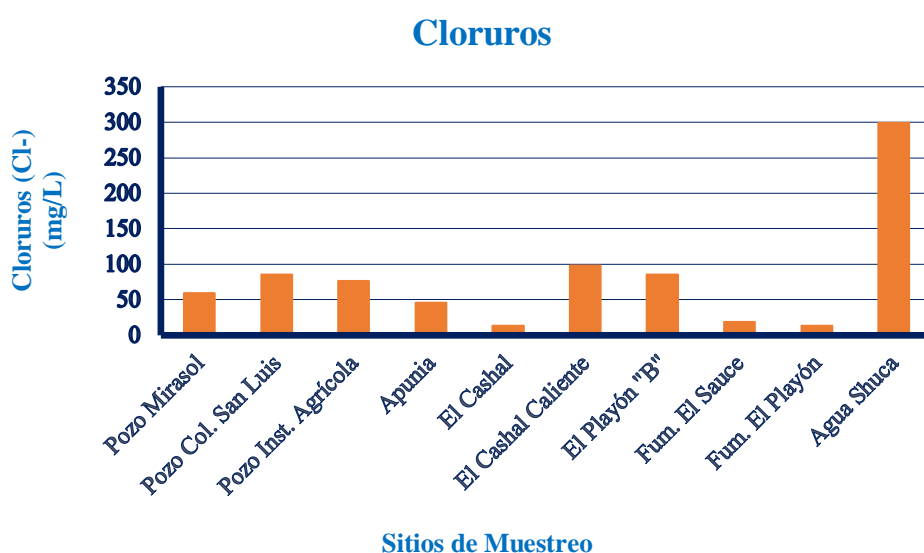


Figura 3.8: Valores promedio de Cloruros en muestras de agua subterránea, superficial y vapor condensado de fumarola, Ahuachapán.

3.5. COMPARACIÓN DE LA ACTIVIDAD DE GAS RADÓN (²²²Rn) CON EL RTS 13.02.01:14

Se realizó una comparación entre los valores promedio de la actividad de gas Radón (²²²Rn), obtenida para cada una de las fuentes destinadas al consumo humano y el límite máximo permisible por el Reglamento Técnico Salvadoreño (RTS 13.02.01:14) para agua de consumo humano, el cual es de 11.1 Bq/L. La Tabla 3.21 presenta los puntos de muestreo con sus respectivas concentraciones promedio, cabe mencionar que los pozos Mirasol y San Luis presentan concentraciones de gas Radón no constantes (véase la Tabla 3.12).

La mayoría de los muestreos presentaron concentraciones menores al límite detectable de 1.04 Bq/L (véase la sección 3.1.3). La fuente Apunia presenta concentraciones menores al límite máximo permitido por el Reglamento Técnico Salvadoreño y finalmente la fuente El Cashal excede los 11.1 Bq/L (Límite Máximo Permisible por el RTS 13.02.01:14).

Tabla 3.21: Comparación entre las concentraciones de gas ^{222}Rn obtenidas en muestras de agua para el consumo humano y el LMP según el RTS 13.02.01:14.

FUENTE	PUNTO DE MUESTREO	PROMEDIO DE CONCENTRACIONES DE ^{222}Rn (Bq/L)	LMP POR EL RTS 13.02.01:14 (Bq/L)
Superficial	Fuente El Cashal	15.04	11.1
Superficial	Río Apunia	5.98	11.1
Subterránea	Pozo Mirasol	2.27	11.1
Subterránea	Pozo Inst. Agrícola	<MDC*	11.1
Subterránea	Pozo San Luis	2.55	11.1

*Menor a la concentración mínima detectable.

La Figura 3.9 muestra gráficamente las comparaciones entre los valores promedio y el Límite Máximo Permisible por el RTS 13.02.01:14, donde como anteriormente se ha mencionado solo la fuente El Cashal está arriba del Límite Máximo Permisible de 11.1 Bq/L.

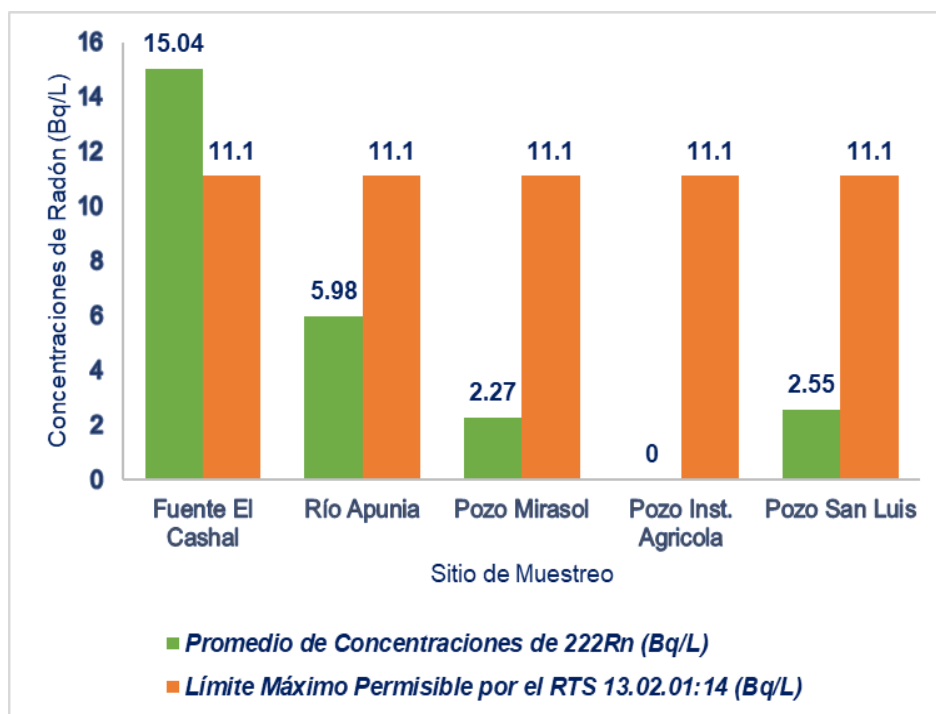


Figura 3.9: Comparación entre las concentraciones de gas Radón en muestras de agua para consumo humano y el LMP según el RTS 13.02.01:14.

3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO ENTRA LA CONCENTRACIÓN DE GAS RADÓN Y LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

Se ha realizado un análisis estadístico entre los datos obtenido de concentración de gas Radón y los parámetros fisicoquímicos analizados en muestras de agua superficial, subterránea y de vapor condensado de fumarola utilizando el programa *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS). La metodología en el uso de IBM SPSS para el análisis estadístico de los datos se resume en el Anexo D.

3.6.1. Análisis Estadísticos para Fuentes de Agua Superficial: Cashal y Apunia

A continuación, se detalla el análisis por componentes principales (ACP) y correlación de Pearson para los datos concernientes a las muestras de agua superficial.

3.6.1.1. Análisis de componentes principales para fuentes de agua superficial.

En la Tabla 3.22 se obtienen las componentes principales a partir de la matriz de correlaciones para emplear las mismas escalas en todas las variables. El primer elemento que se observa en la matriz de correlaciones es el determinante el cual, para este análisis es de 9.86×10^{-5} , al ser pequeño indica que el grado de intercorrelación entre las variables es alto; esta es la condición inicial que debía cumplir el análisis en componentes principales.

Tabla 3.22: Matriz de correlación lineal de Pearson para agua superficial.

		Rn	Conductividad	Cl	pH	Temp	TDS	DO	SPC
Correlación	Rn	1.00	-0.77	-0.75	-0.02	-0.92	-0.72	-0.19	-0.68
	Conductividad	-0.77	1.00	0.89	-0.07	0.80	0.94	0.34	0.82
	Cloruros	-0.75	0.89	1.00	-0.19	0.85	0.80	0.22	0.71
	pH	-0.02	-0.07	-0.19	1.00	-0.16	-0.01	0.26	-0.09
	Temperatura	-0.92	0.80	0.85	-0.16	1.00	0.77	0.14	0.75
	TDS	-0.72	0.94	0.80	-0.01	0.77	1.00	0.24	0.86
	DO	-0.19	0.34	0.22	0.26	0.14	0.24	1.00	0.25
	SPC	-0.68	0.82	0.71	-0.09	0.75	0.86	0.25	1.00
Sig. (unilateral)	Rn	-	0.00	0.00	0.47	0.00	0.00	0.24	0.00
	Conductividad	0.00	-	0.00	0.40	0.00	0.00	0.10	0.00
	Cloruros	0.00	0.00	-	0.25	0.00	0.00	0.21	0.00
	pH	0.47	0.40	0.25	-	0.27	0.49	0.17	0.37
	Temperatura	0.00	0.00	0.00	0.27	-	0.00	0.30	0.00
	TDS	0.00	0.00	0.00	0.49	0.00	-	0.18	0.00
	DO	0.24	0.10	0.21	0.17	0.30	0.18	-	0.17
	SPC	0.00	0.00	0.00	0.37	0.00	0.00	0.17	-

Luego en la Tabla 3.23 se han aplicado las medidas o contrastes estadísticos que indican la adecuación de la técnica al conjunto de datos, estas medidas son: Adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin y prueba de esfericidad de Bartlett.

Tabla 3.23: Prueba de KMO y Bartlett para Análisis de Componentes Principales.

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		0.74
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado	106.08
	Gl	28.00
	Sig.	0.00

La medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreos es de 0.738 (véase la Tabla 3.23), este valor indica una aceptable adecuación muestral del set de datos, por tal motivo el ACP tiene sentido. Además, la prueba de esfericidad de Bartlett es de 0.000, el cual es menor a la significancia (0.05), por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula H_0 (variables no correlacionadas, por lo cual el ACP no tiene sentido) y se acepta la hipótesis alternativa (el ACP tiene sentido), lo que indica que las variables están suficientemente correlacionadas y que tiene sentido realizar el análisis de componentes principales a los datos.

i. Interpretación de comunalidades para Análisis de Componentes Principales.

En la Tabla 3.24 se presentan las comunalidades obtenidas para cada una de las variables, las cuales indican el porcentaje de información que se conserva luego de realizar la extracción de componentes principales.

Tabla 3.24: Método de extracción de comunalidades para ACP de agua superficial.

COMUNALIDADES		
	Inicial	Extracción
Rn	1	0.77
Conductividad	1	0.92
Cloruros	1	0.85
pH	1	0.71
Temperatura	1	0.87
TDS	1	0.86
DO	1	0.62
SPC	1	0.77

Las propiedades que están excelentemente representados con la solución del ACP son: la Conductividad (^{222}Rn) con una extracción del 92.00%, la temperatura con una extracción del

87.00%, los Sólidos Totales Disueltos (TDS) y los Cloruros con una estación del 86.90% y 85.00% respectivamente. Esto indica que explican en mayor proporción la varianza según su participación en los factores o componentes resultantes en el análisis. El Oxígeno Disuelto (DO) presenta el menor porcentaje de extracción con un valor de 62.00% en la explicación de la varianza.

ii. Varianza total explicada para Análisis de Componentes Principales.

En la Tabla 3.25 hay dos autovalores mayores que 1, los cuales son la componente 1 el cual explica el 63.39% de la variabilidad y la componente 2 explica el 16.26% de la variabilidad de los datos. Por lo que el procedimiento extrae dos componentes que logran explicar un 79.66% de la varianza del set de datos. El resto de componentes tiene autovalores menores a uno por lo tanto las sumas de extracción de cargas al cuadrado y las sumas de rotación de cargas al cuadrado no se estiman.

Tabla 3.25: Varianza total explicada para Análisis de Componentes Principales.

COMPONENTE	AUTOVALORES INICIALES			SUMAS DE EXTRACCIÓN DE CARGAS AL CUADRADO			SUMAS DE ROTACIÓN DE CARGAS AL CUADRADO		
	Total	% de varianza	% Acum.	Total	% de varianza	% Acum.	Total	% de varianza	% Acum.
1	5.09	63.68	63.68	5.09	63.68	63.68	5.07	63.39	63.39
2	1.28	15.98	79.66	1.28	15.98	79.66	1.30	16.26	79.66
3	0.71	8.92	88.58						
4	0.44	5.44	94.02						
5	0.28	3.43	97.45						
6	0.12	1.51	98.97						
7	0.06	0.71	99.68						
8	0.03	0.32	100.00						

iii. Gráfica de sedimentación para Análisis de Componentes Principales.

En la Figura 3.10 se muestra la gráfica de sedimentación la cual permite observar el número de factores que explican la mayor parte de variabilidad total en los datos (dada por los valores propios). Los dos primeros factores son todos mayores que 1 por tal motivo explican la mayor parte de variabilidad de los datos. Los factores restantes explican una proporción muy pequeña de la variabilidad por lo cual no son significativos.

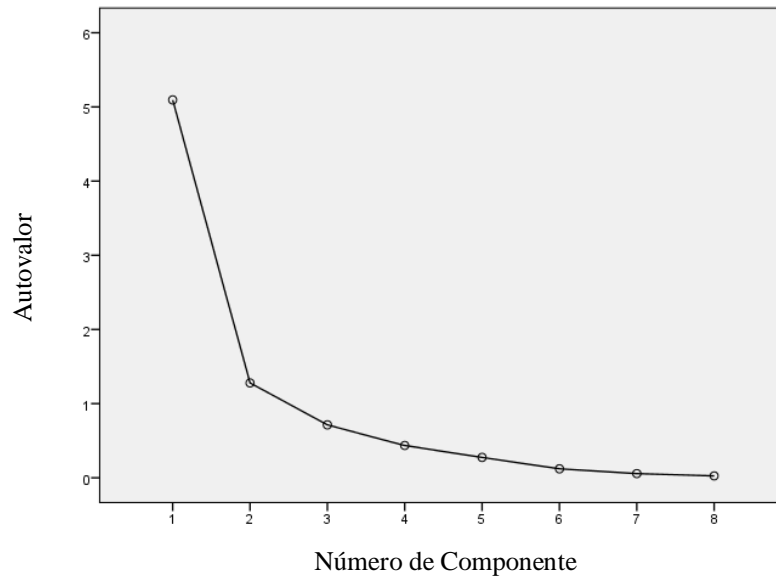


Figura 3.10: Gráfico de sedimentación.

iv. Matriz de componentes extraídos para Análisis de Componentes Principales.

En la Tabla 3.26 se muestra los valores obtenidos para cada parámetro fisicoquímico en cada componente principal. En la primera componente se obtienen valores absolutos altos en seis variables las cuales son: la Concentración de Radón (-0.877) con signo negativo, y la Conductividad (0.956), Cloruros (0.913), Temperatura (0.920), TDS (0.926) y SPC (0.879) con signo positivo. Por lo cual se puede concluir que estas variables están correlacionadas entre sí, ya que pertenece a la misma componente, pero cabe mencionar que la concentración de Radón está correlacionada inversamente (correlación negativa) con las otras variables. En la segunda componente pesan las variables de DO (0.729) y pH (0.838) lo que significa que estos parámetros no se correlacionan con la concentración de Radón si no que solo entre ellos.

Tabla 3.26: Matriz de componentes extraídos para Análisis de Componentes Principales.

COMPONENTES EXTRAÍDOS		
	1	2
Rn	-0.88	-0.01
Conductividad	0.96	0.06
Cloruros	0.91	-0.12
pH	-0.09	0.84
Temperatura	0.92	-0.16
TDS	0.93	0.05
DO	0.30	0.73
SPC	0.88	0.00

Pero además de Análisis de Componentes Principales se hará uso de otras técnicas estadísticas para poder estimar la existencia de una correlación entre las concentraciones de Radón (^{222}Rn) con respecto a cada uno de los siguientes parámetros: Cloruros, Sólidos Totales, Conductividad, Conductancia Específica, Oxígeno Disuelto, pH y Temperatura del agua superficial.

3.6.1.2. Correlación lineal de Pearson para fuentes de agua superficial.

La Tabla 3.27 de correlaciones muestra valores de Correlación de Pearson y el valor de “P”, el valor de nivel significancia utilizado es 0.01, si el valor de “P” es menor o igual a 0.01 se acepta la hipótesis alternativa lo cual significa que existe correlación entre las variables observadas, cuando el valor de “P” es mayor a 0.01 no se rechaza la hipótesis nula por lo cual no existe correlación entre las variables observadas. Además, cabe mencionar que valores de correlación de Pearson mayores o igual a 0.5 afirman la existencia de una correlación positiva y valores de correlación de Pearson menor o igual a -0.5 afirma la existencia de una correlación negativa.

Tabla 3.27: Prueba de hipótesis formal para fuentes de agua superficial.

Variable	Nivel de significancia α	Correlación de Pearson	Hipótesis nula	Hipótesis alternativa	Conclusión
Conductividad	0.001	-0.766	$H_{o1}: \rho_1 = 0$	$H_{a1}: \rho_1 \neq 0$	Se rechaza la hipótesis nula
Cloruros	0.001	-0.751	$H_{o2}: \rho_2 = 0$	$H_{a2}: \rho_2 \neq 0$	Se rechaza la hipótesis nula
pH	0.938	-0.21	$H_{o3}: \rho_3 = 0$	$H_{a3}: \rho_3 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Temperatura	0.000	-0.917	$H_{o4}: \rho_4 = 0$	$H_{a4}: \rho_4 \neq 0$	Se rechaza la hipótesis nula
Sólidos Totales Disueltos	0.002	-0.723	$H_{o5}: \rho_5 = 0$	$H_{a5}: \rho_5 \neq 0$	Se rechaza la hipótesis nula
Oxígeno Disuelto	0.472	-0.194	$H_{o6}: \rho_6 = 0$	$H_{a6}: \rho_6 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Conductancia Específica	0.003	-0.684	$H_{o7}: \rho_7 = 0$	$H_{a7}: \rho_7 \neq 0$	Se rechaza la hipótesis nula

Los datos presentados en la Tabla 3.26 se observa que la concentración de Radón está correlacionada linealmente, pero de manera inversa con respecto a los siguientes parámetros: Con-

ductividad, Cloruros, Temperatura, TDS y SPC. Lo que significa que a mayor concentración de Radón menor concentración de cloruros, menor conductividad, menor Temperatura, menor concentración de Sólidos Disueltos y menor Conductancia Específica.

La mayor correlación que tiene la concentración de Radón es como se esperaría, con la Temperatura, ya que el valor de correlación de Pearson es de -0.917, es un valor excelente ya que está entre el intervalo de 0.9 y 1 si tomamos como referencia valores absolutos (véase la Tabla 3.27). Cabe mencionar que los parámetros de DO y pH no tienen una correlación lineal con la concentración de Radón.

3.6.2. Análisis Estadísticos para Aguas Superficiales Mezcladas con Agua Geotérmica: Río El Playón “B” y Cashal Fuente Caliente

A continuación, se detalla el análisis por componentes principales (ACP) y correlación de Pearson para los datos concernientes a las muestras de agua superficial mezclada con agua geotérmica (véase la sección 3.4.2.3).

3.6.2.1. Análisis de componentes principales para fuentes de agua superficial mezclada con agua geotérmica: Río El Playón “B” y Cashal Fuente Caliente.

En el análisis ACP para las aguas superficiales con influencia de agua geotérmica la medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo es de 0.623, como se muestra en la Tabla 3.28, el valor indica una regular adecuación muestral del set de datos, por lo cual tiene sentido el análisis de componentes principales. La prueba de esfericidad de Bartlett es de 0.000, el cual es menor a la significancia (0.05), por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (variables no correlacionadas por lo cual el ACP no tiene sentido) y se acepta la hipótesis alternativa (el ACP tiene sentido), lo que indica que las variables están suficientemente correlacionadas y que tiene sentido realizar el análisis de componentes principales a los datos.

Tabla 3.28: Prueba de KMO y Bartlett para aguas superficiales mezcladas con agua geotérmica: Río El Playón “B” y Cashal Fuente Caliente.

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		0.62
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado	86.41
	G1	28.00
	Sig.	0.00

Utilizando el Análisis de Componentes Principales, en la Tabla 3.29 la matriz de componente muestra dos componentes principales, la componente dos muestra el valor de concentración de Radón más alto en valores absolutos, por lo cual se puede correlacionar con esta componente principal, además de la concentración de Radón hay otro parámetro correlacionada con la componente dos que es el Oxígeno Disuelto, pero debido a que la concentración de Radón posee un valor pequeño en esta componente, se puede interpretar que no está correlacionada con el Oxígeno Disuelto.

Tabla 3.29: Matriz de componentes para aguas superficiales mezcladas con agua geotérmica: Río El Playón “B” y Cashal Fuente Caliente.

COMPONENTES EXTRAÍDOS		
	1	2
Rn	-0.54	-0.60
Conductividad	0.92	0.05
Cloruros	0.76	-0.42
pH	-0.72	0.33
Temperatura	0.70	-0.05
TDS	0.89	0.15
DO	0.25	0.79
SPC	0.90	-0.11

3.6.2.2. Correlación lineal de Pearson para aguas superficiales mezcladas con agua geotérmica: Río El Playón “B” y Cashal Fuente Caliente.

En la Tabla 3.30 se tienen valores de correlación de Pearson bajos y valores de “P” mayores que la significancia por tal motivo no se encuentra una correlación lineal, por tanto, las concentraciones de Radón en el Río El Playón punto “B” y Fuente El Cashal Caliente no están correlacionadas con los parámetros fisicoquímicos (Cloruros, Sólidos Totales Disueltos, Conductividad, Conductancia Específica, pH, Oxígeno Disuelto y Temperatura).

La concentración de Radón y los parámetros fisicoquímicos pueden estar ligados y no de una forma lineal, por tal motivo se hará un análisis gráfico para poder observar las tendencias de los datos. Se hará análisis descriptivos del comportamiento temporal, este análisis consiste en ver las variaciones de las componentes dependientes (concentración de Radón vs pH, Cloruros, Temperatura, Sólidos Totales Disueltos) causadas por la componente independiente (tiempo).

Tabla 3.30: Prueba de hipótesis formal para aguas superficiales mezcladas con agua geotérmica: Río El Playón “B” y Cashal Fuente Caliente.

Variable	Nivel de significancia α	Correlación de Pearson	Hipótesis nula	Hipótesis alternativa	Conclusión
Conductividad	0.082	-0.464	$H_{01}: \rho_1 = 0$	$H_{a1}: \rho_1 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Cloruros	0.896	-0.037	$H_{02}: \rho_2 = 0$	$H_{a2}: \rho_2 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
pH	0.179	0.367	$H_{03}: \rho_3 = 0$	$H_{a3}: \rho_3 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Temperatura	0.189	-0.359	$H_{04}: \rho_4 = 0$	$H_{a4}: \rho_4 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Sólidos Totales Disueltos	0.025	-0.574	$H_{05}: \rho_5 = 0$	$H_{a5}: \rho_5 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Oxígeno Disuelto	0.217	-0.339	$H_{06}: \rho_6 = 0$	$H_{a6}: \rho_6 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Conductancia Específica	0.264	-0.308	$H_{07}: \rho_7 = 0$	$H_{a7}: \rho_7 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula

En la Figura 3.11 se presenta el comportamiento de las variables a través del tiempo en ocho jornadas de muestreo realizadas de abril a julio del año 2019, para el punto de muestreo denominado “El Cashal Fuente Caliente”.

Este comportamiento estimulado a lo largo del tiempo, provoca una respuesta en las variables dependientes, las cuales pueden mostrar una relación directa o una relación inversa entre ellas, o también puede haber la posibilidad que no muestran ninguna relación gráfica entre ellas. La figura 3.11 muestra las gráficas obtenidas para las relaciones entre la concentración de Radón y Cloruros, concentración de Radón y Sólidos Totales Disueltos, concentración de Radón y pH, concentración de Radón y Temperatura.

La relación entre la concentración de Radón y Cloruros es una relación directa entre ambos, excepto en el cuarto muestreo, esto puede deberse a que hubo un estímulo externo que causó esta variación, la concentración de Radón y Sólidos Totales Disueltos muestran una relación directa en casi todos los puntos excepto en el tercer y cuarto muestreo, como anteriormente se mencionó pueden haber estímulos externos que causen anomalías, la concentración de Radón y pH no muestran una tendencia, hay muchas variaciones por lo cual no se observa una relación entre estas dos variables, este mismo caso sucede con la concentración de Radón y

Temperatura; tampoco muestran una relación entre ellas. Cabe mencionar que el gas Radón, Cloruros y Solidos Totales Disueltos (una medida de la concentración total de iones en solución) muestran una relación ya que que estos pueden provenir del sistema geotérmico y al aumentar la permeabilidad del suelo permite un mayor ascenso de ellos.

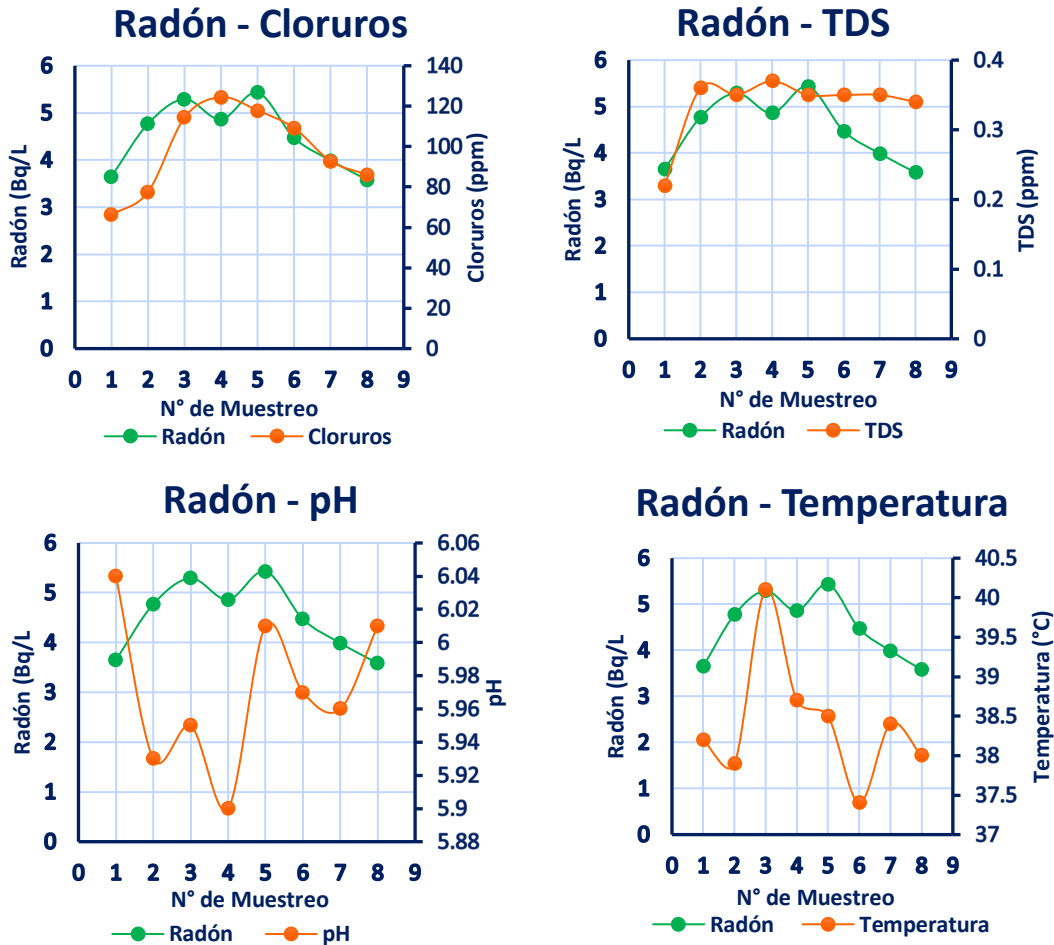


Figura 3.11: Parámetros fisicoquímicos y concentraciones de Rn en Fuente El Cashal Caliente.

En la Figura 3.12 se observan las relaciones de concentración de Rn versus Cloruros, TDS, pH y temperatura en el punto de muestreo “B” del Río Cashalate, la concentración de Radón y Cloruros muestran una relación inversa excepto en el quinto muestreo, este mismo comportamiento (inverso) se observa en la relación entre la concentración de Radón y Sólidos Totales Disueltos ya que al aumentar la Concentración de Rn disminuye los TDS; este comportamiento se ve en todos los puntos de muestreo.

En el caso del pH y la concentración de Radón se observa una relación directa ya que ambas aumentan con el tiempo y disminuyen de la misma forma, y finalmente la concentración de Radón y la Temperatura muestran una relación inversa en casi todos los casos excepto en el quinto muestreo.

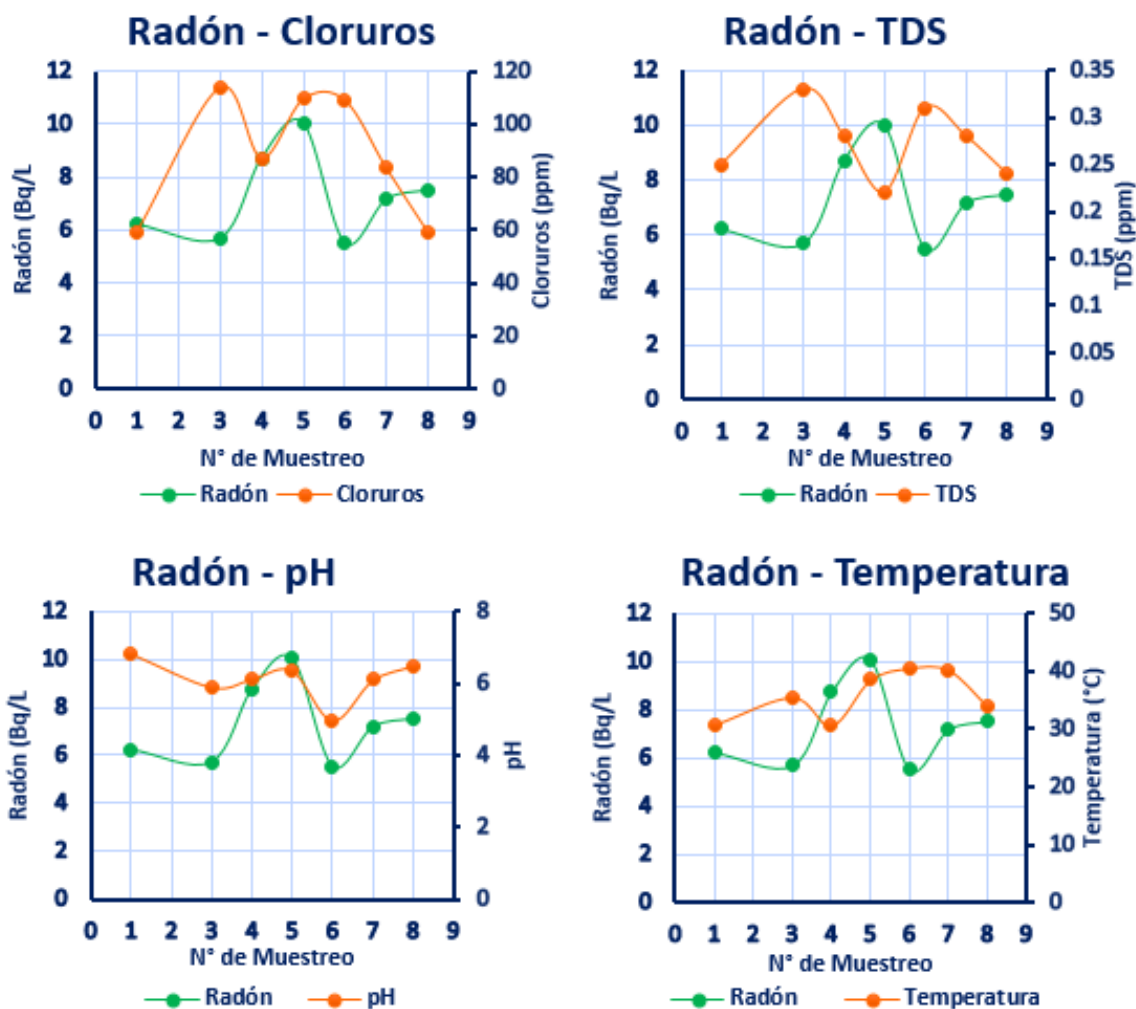


Figura 3.12: Parámetros fisicoquímicos y Concentraciones de Rn en el Río El Playón Punto "B".

3.6.3. Análisis Estadístico para Vapor Condensado Proveniente de Fumarolas El Sauce y El Playón

A continuación, se detalla el análisis por componentes principales (ACP) y correlación de Pearson para los datos concernientes a las muestras de agua de vapor condensado proveniente de fumarola.

3.6.3.1. Análisis de componentes principales para vapor condensado proveniente de fumarolas El Sauce y El Playón.

El análisis estadístico para los valores de vapor condensado de fumarolas comienza con la medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo, la cual de acuerdo a la Tabla 3.31 es de 0.494, es un valor inaceptable de adecuación muestral del set de datos, pero la prueba de esfericidad de Bartlett (véase la Tabla 3.30) es menor a la significancia (0.05), por lo tanto, aunque solo se cumple uno de los indicadores estadísticos para la implementación del método ACP, se realizará el análisis tomando en cuenta los resultados arrojados por la prueba de esfericidad de Bartlett.

Tabla 3.31: Prueba de KMO y Bartlett para vapor condensado proveniente de fumarolas El Sauce y El Playón.

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		0.49
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado	99.30
	gl	28.00
	Sig.	0.00

En la Tabla 3.32 se presentan los resultados del análisis ACP, el cual presenta 3 componentes principales, el valor de la concentración de Radón tiene un valor alto en la segunda componente por lo cual está correlacionada con esta componente, otro parámetro que está correlacionada con la componente 2 es el pH, pero tiene un valor no tan alto por lo cual se puede interpretar que utilizando la técnica de Análisis de Componentes Principales en vapor condensado provenientes de las Fumarolas El Playón y El Sauce no existe correlación entre la concentración de Radón con ningún otro parámetro medido.

Tabla 3.32: Matriz de componente para vapor condensado proveniente de fumarolas El Sauce y El Playón.

	COMPONENTES EXTRAÍDOS		
	1	2	3
Rn	0.27	0.80	0.09
Conductividad	0.82	-0.31	0.11
Cloruros	0.94	0.20	0.12
pH	-0.48	-0.63	0.35
Temperatura	-0.58	0.50	0.23
TDS	0.90	-0.06	-0.01
DO	-0.05	0.06	0.94
SPC	0.95	-0.10	0.14

3.6.3.2. Correlación lineal de Pearson para vapor condensado proveniente de fumarolas El Sauce y El Playón.

En la Tabla 3.33 se muestran los resultados obtenidos para los análisis de prueba de hipótesis formal; los valores de correlación de Pearson son bajos en todas las variables y el valor de “P” es mayor que la significancia (0.01) por tal motivo se estima que no existe una correlación lineal entre la concentración de Radón y los otros parámetros medidos: Cloruros, Sólidos Totales, Conductividad, Conductancia Específica, pH, Oxígeno Disuelto y Temperatura.

Tabla 3.33: Prueba de hipótesis formal para vapor condensado proveniente de fumarolas El Sauce y El Playón.

Variable	Nivel de significancia α	Correlación de Pearson	Hipótesis nula	Hipótesis alternativa	Conclusión
Conductividad	0.645	0.130	$H_{01}: \rho_1 = 0$	$H_{a1}: \rho_1 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Cloruros	0.141	0.399	$H_{02}: \rho_2 = 0$	$H_{a2}: \rho_2 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
pH	0.100	-0.441	$H_{03}: \rho_3 = 0$	$H_{a3}: \rho_3 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Temperatura	0.753	0.089	$H_{04}: \rho_4 = 0$	$H_{a4}: \rho_4 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Sólidos Totales Disueltos	0.949	0.018	$H_{05}: \rho_5 = 0$	$H_{a5}: \rho_5 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Oxígeno Disuelto	0.811	0.067	$H_{06}: \rho_6 = 0$	$H_{a6}: \rho_6 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Conductancia Específica	0.628	0.136	$H_{07}: \rho_7 = 0$	$H_{a7}: \rho_7 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula

En la fumarola El Sauce se observan los siguientes comportamientos de acuerdo a la Figura 3.13, la concentración de Radón y Cloruros tiene una relación directa en los muestreos uno, dos y tres, en el cuarto muestreo se observó una anomalía la cual puede estar asociada a otro factor externo, dos días después del muestreo número cuatro se registró un sismo con magnitud de 5.9 grados (véase la Tabla G-1 del Anexo G). Los sismos pueden influir en la permeabilidad del suelo por lo cual puede aumentar o disminuir el flujo de vapor proveniente del reservorio.

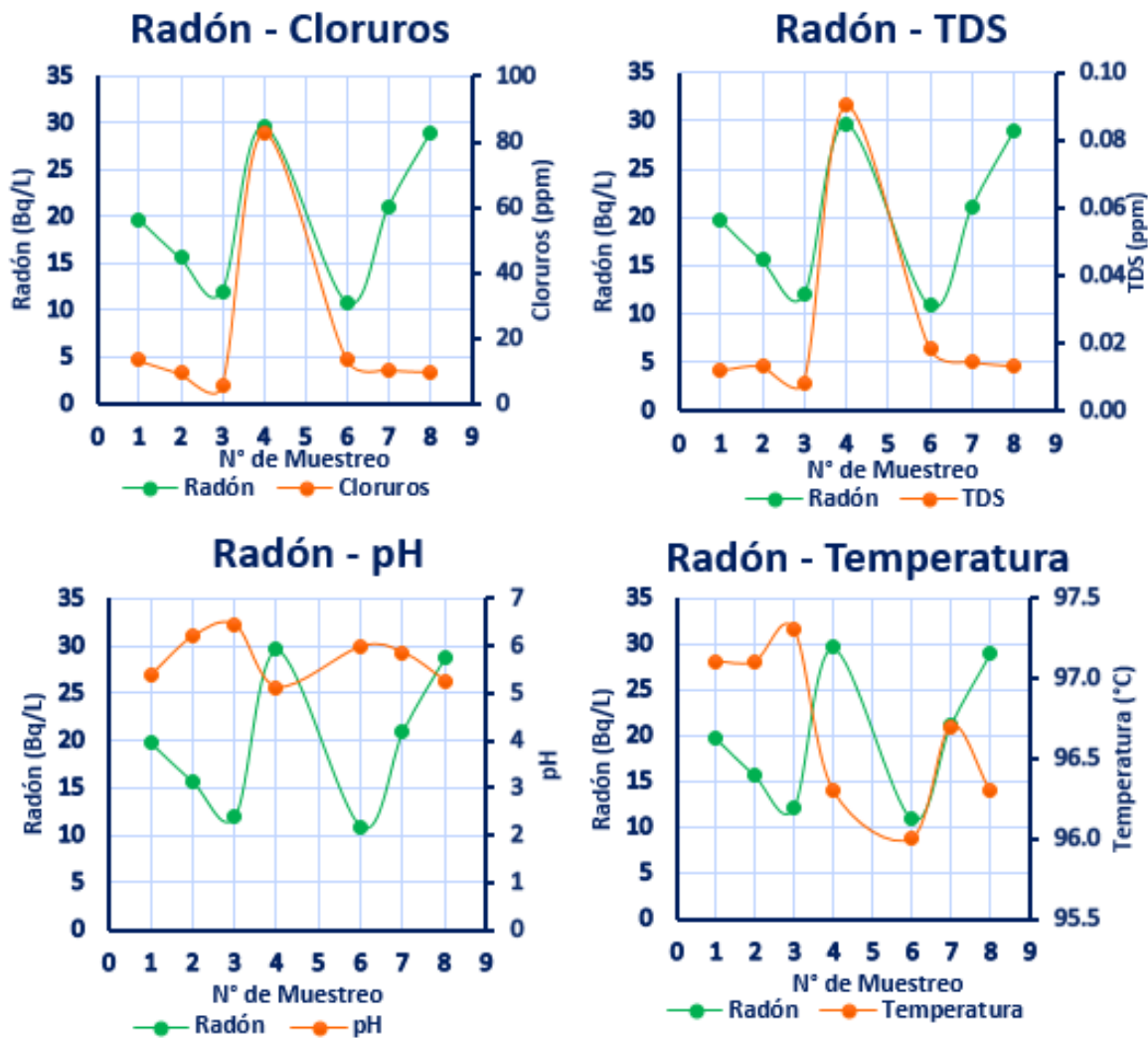


Figura 3.13: Parámetros fisicoquímicos y concentraciones de Rn en Fumarola El Sauce.

La anomalía en el cuarto muestreo es muy evidente ya que hubo un aumento muy claro en los Cloruros y los Sólidos Totales Disueltos, ambos tuvieron el mismo comportamiento, luego en ambos casos se observaron que la relación entre la concentración de Radón y los Cloruros o Sólidos Totales Disueltos cambió el comportamiento a uno de forma inversa, lo que significa que a mayor concentración de Radón menor concentración de Cloruros y el mismo caso para la relación concentración de Radón y Sólidos Totales Disueltos, con respecto al pH y la concentración de Radón se observa una relación inversa en todos los puntos de muestreos, y finalmente la concentración de Radón y Temperatura no muestran una tendencia por lo cual se puede observar una relación entre ellas.

En la Figura 3.14 se presentan las variaciones entre las variables fisicoquímicas (Temperatura, unidades de pH, Cloruros y Sólidos Totales Disueltos) con respecto al tiempo en las muestras de vapor condensado de la Fumarola “El Playón”.

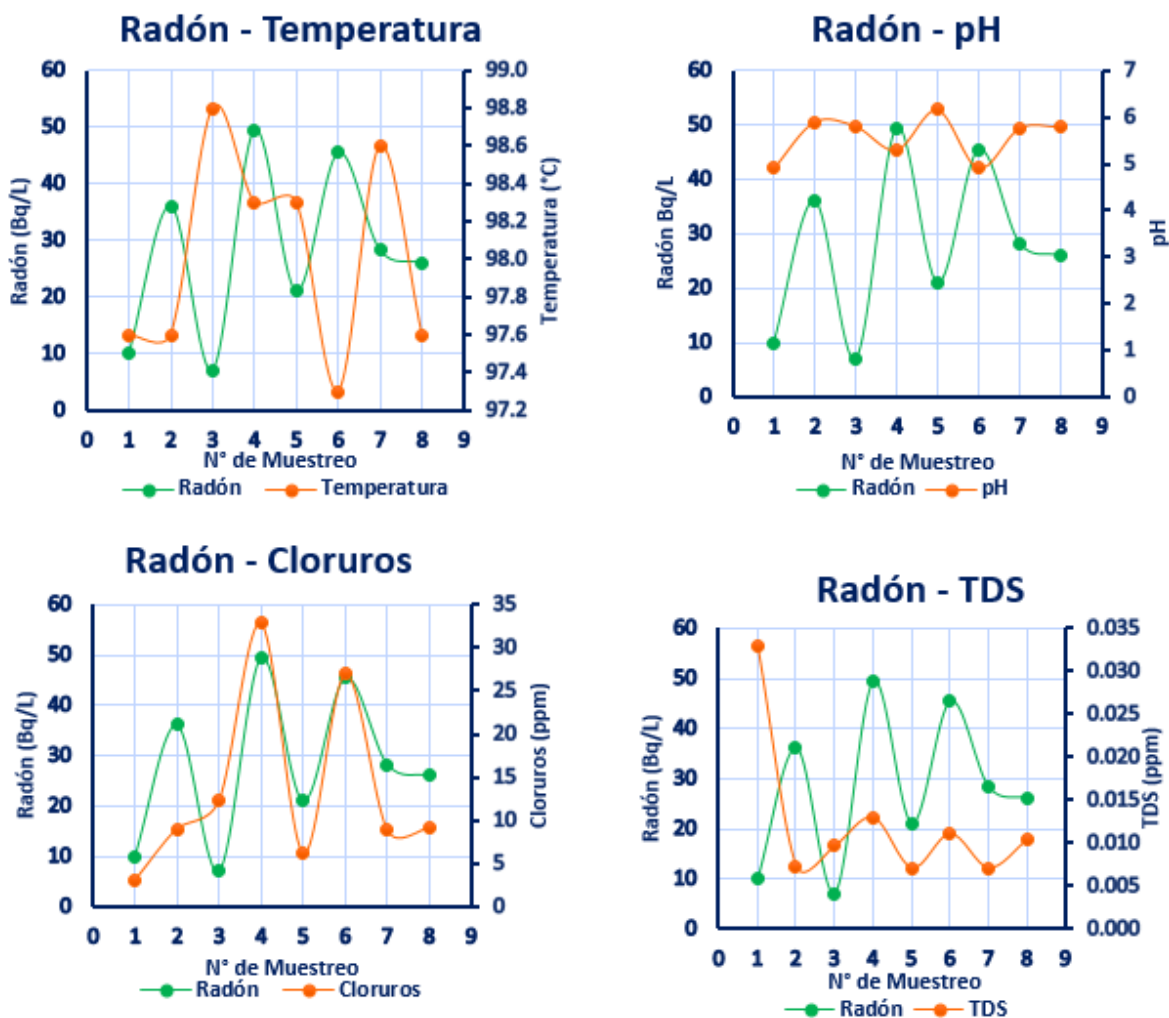


Figura 3.14: Parámetros fisicoquímicos y concentraciones de Rn en Fumarola El Playón.

Se observa una relación directa entre los cloruros y la concentración de Radón excepto en el segundo muestreo, solamente ese punto mostró una anomalía, entre los Sólidos Disueltos Totales, pH y la temperatura no muestran relación con la concentración de Radón, esto puede ser debido a un factor externo muy importante el cual es que la fumarola El Playón está muy relacionada al reservorio geotérmico en explotación, lo cual influye de gran manera en los parámetros fisicoquímicos y las concentraciones de las especies que se encuentran en él.

3.6.4. Análisis Estadístico para Datos Obtenidos de Agua Subterráneas (Pozos)

A continuación, se detalla el análisis por componentes principales (ACP) y correlación de Pearson para los datos concernientes a las muestras de agua subterránea (pozos).

3.6.4.1. Análisis de componentes principales para fuentes de agua subterránea.

No se puede realizar el Análisis de Componentes Principales por que varias de las concentraciones de Radón estuvieron por debajo del límite detectable (véase la Tabla 3.12).

3.6.4.2. Correlación de Pearson para fuentes de agua subterránea.

Los resultados de prueba de hipótesis formal para agua subterránea se presentan en la Tabla 3.34, puede observarse que el pH es la única variable que tiene un valor de correlación de Pearson alto con respecto a la concentración de Radón, pero para la prueba de hipótesis formal su P -valor es menor que la significación 0.01 pero si la significancia fuera de 0.05 si tiene una correlación lineal con respecto a la concentración de Radón, por tal motivo se deben realizar más análisis en aguas subterráneas para poder confirmar si existe o no una correlación lineal. Pero para esta investigación no se acepta que existe una correlación lineal entre la concentración de Radón y pH.

Tabla 3.34: Prueba de hipótesis formal para fuentes de agua subterránea.

Variable	Nivel de significancia α	Correlación de Pearson	Hipótesis nula	Hipótesis alternativa	Conclusión
Conductividad	0.25	-0.63	$H_{01}: \rho_1 = 0$	$H_{a1}: \rho_1 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Cloruros	0.70	0.24	$H_{02}: \rho_2 = 0$	$H_{a2}: \rho_2 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
pH	0.02	0.93	$H_{03}: \rho_3 = 0$	$H_{a3}: \rho_3 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Temperatura	0.37	0.52	$H_{04}: \rho_4 = 0$	$H_{a4}: \rho_4 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Sólidos Totales Disueltos	0.22	-0.67	$H_{05}: \rho_5 = 0$	$H_{a5}: \rho_5 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Oxígeno Disuelto	0.54	0.37	$H_{06}: \rho_6 = 0$	$H_{a6}: \rho_6 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Conductancia Específica	0.25	-0.64	$H_{07}: \rho_7 = 0$	$H_{a7}: \rho_7 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula

3.6.5. Análisis Estadístico para Datos Obtenidos de “Agua Shuca”

A continuación, se detalla por separado el análisis por componentes principales (ACP) y correlación de Pearson para los datos concernientes a las muestras de agua del punto agua Shuca, debido a las características del agua en este punto (véase la Tabla 2.7).

3.6.5.1. Análisis de componentes principales de los datos del punto Agua Shuca.

No se puede realizar el Análisis de Componentes Principales porque el número de datos obtenidos es insuficiente, debido a que en algunas de las jornadas de muestreo no se pudo acceder al punto de muestreo.

3.6.5.2. Correlación lineal y prueba de hipótesis formal de los datos del punto Agua Shuca.

Los resultados de prueba de hipótesis formal se presentan en la Tabla 3.35, se pueden observar que los valores de correlación de Pearson para los parámetros de Conductividad y Temperatura tienen valores altos de correlación inversa, el pH y Oxígeno Disuelto tiene valores altos de correlación directa con respecto a la concentración de Radón, pero para la prueba de hipótesis formal su *P*-valor en los cuatro parámetros medidos es mayor que la significancia por tal motivo se rechaza la existencia de una correlación lineal.

Tabla 3.35: Prueba de hipótesis formal para los datos del punto Agua Shuca.

Variable	Nivel de significancia α	Correlación de Pearson	Hipótesis nula	Hipótesis alternativa	Conclusión
Conductividad	0.19	-0.65	$H_{01}: \rho_1 = 0$	$H_{a1}: \rho_1 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Cloruros	0.62	0.26	$H_{02}: \rho_2 = 0$	$H_{a2}: \rho_2 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
pH	0.20	0.61	$H_{03}: \rho_3 = 0$	$H_{a3}: \rho_3 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Temperatura	0.15	-0.67	$H_{04}: \rho_4 = 0$	$H_{a4}: \rho_4 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Sólidos Totales Disueltos	0.26	-0.54	$H_{05}: \rho_5 = 0$	$H_{a5}: \rho_5 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Oxígeno Disuelto	0.08	0.76	$H_{06}: \rho_6 = 0$	$H_{a6}: \rho_6 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula
Conductancia Específica	0.11	-0.71	$H_{07}: \rho_7 = 0$	$H_{a7}: \rho_7 \neq 0$	No se rechaza la hipótesis nula

Estas contradicciones se deben al total de parámetros analizados al ser un conjunto pequeño de datos se obtienen diferentes resultados por ende se debe realizar otros conjuntos de campañas de muestreos para observar si se acepta o se rechaza la existencia de correlación lineal, pero en esta investigación se rechaza la existencia de correlación lineal entre la concentración de Radón y los demás parámetros analizados.

En la Figura 3.15 se presenta el comportamiento de las variables fisicoquímicas con respecto al tiempo para el punto de muestreo denominado “Agua Shuca”.

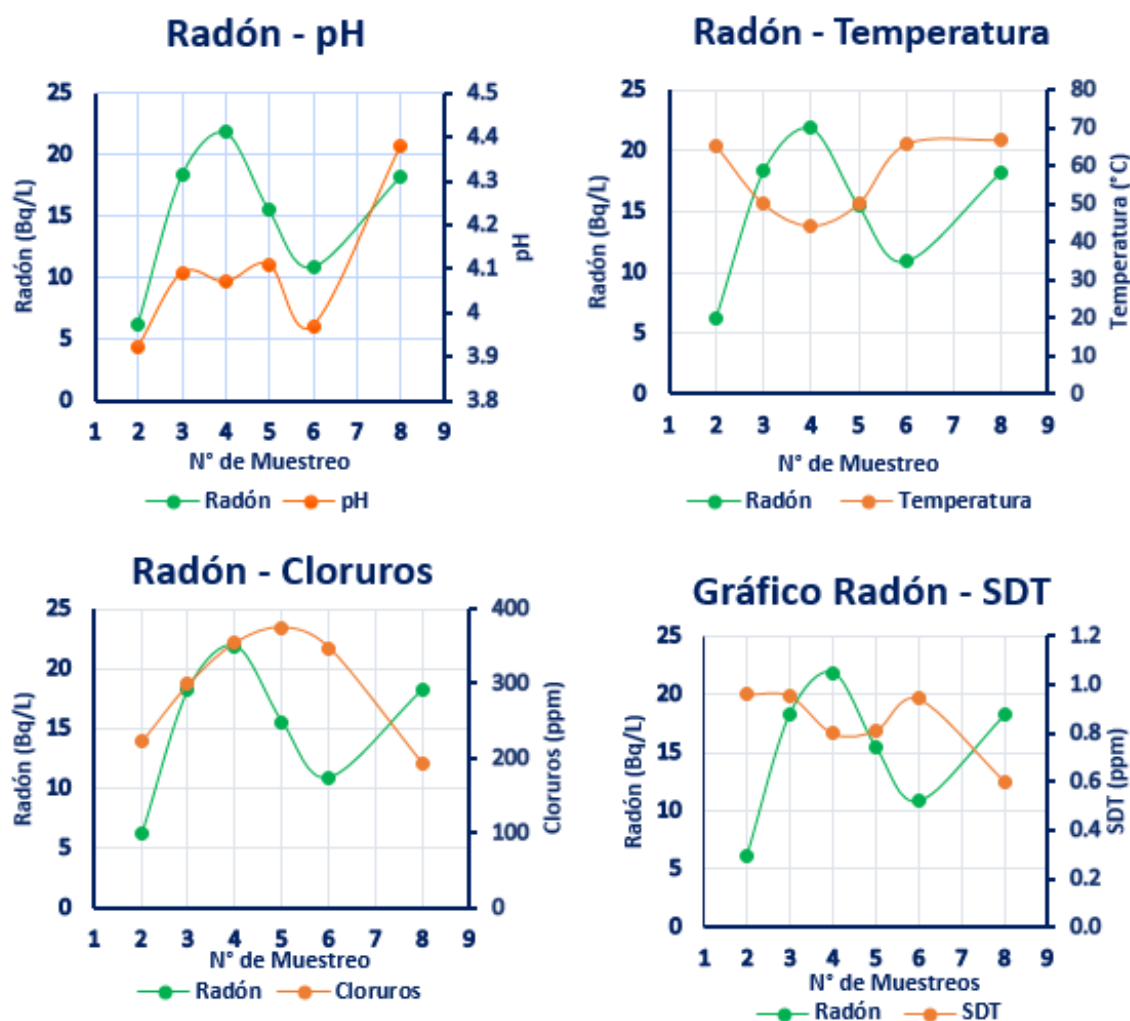


Figura 3.15: Parámetros fisicoquímicos y concentraciones de Rn en el punto de Agua Shuca.

De acuerdo a lo observado en las gráficas este punto es posiblemente un punto de mezcla, de agua superficial, agua geotérmica y vapor geotérmico, por tanto, en el gráfico de concentración de Radón y pH puede observarse que cuando domina el agua geotérmica aumenta la

concentración de Radón y disminuye la acidez, y cuando domina el vapor geotérmico aumenta la acidez, pero no aporta al aumento de la concentración de Radón. Al ver el gráfico de temperatura y concentración de Radón se observa el mismo fenómeno que al predominar el agua geotérmica la cual es un poco más fría, disminuye la temperatura, y al aumentar la temperatura predomina el vapor geotérmico.

3.7. MÉTODO DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Se ha realizado un análisis de regresión lineal múltiple para las *Fuente Cashal* y *Apunia*, ya que las fuentes de aguas superficiales de consumo humano, son las que muestran estadísticamente que existe correlación lineal entre la concentración de Radón y las variables de: Conductividad, Cloruros, Temperatura, Sólidos totales Disueltos y Conductancia Especifica. Pero se agregará además las variables de Oxígeno Disuelto y pH ya que ellas también pueden aportar significancia a la predicción estadística.

3.7.1. Resumen del Modelo de Regresión Lineal Múltiple

El coeficiente de determinación obtenido en el modelo según lo muestra la Tabla 3.36 es de $R^2 = 0.891$, este valor indica que la proporción variabilidad de la concentración de Radón (^{222}Rn) explicado por el modelo de las siete variables independientes Cloruros, Sólidos Totales, Conductividad, Conductancia Específica, pH, Oxígeno Disuelto y Temperatura, explica el 89.10%

Tabla 3.36: Resumen del modelo regresión lineal múltiple.

MODELO	R	R CUADRADO	R CUADRADO AJUSTADO	ERROR ESTÁNDAR DE LA ESTIMACIÓN
1.00	0.944 ^a	0.89	0.80	217.099

^a Predictores: (Constante), SPC, pH, DO, Cloruros, Temperatura, TDS, Conductividad.

3.7.2. Prueba de Análisis de la Varianza del Modelo de Regresión Lineal Múltiple

Para la prueba de análisis de la varianza el modelo presenta los datos según la Tabla 3.37. Los resultados obtenidos muestran un valor de 0.003 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 (^{222}Rn) y las variables independientes es significativa. Por lo cual sí existe una correlación lineal significativa.

Tabla 3.37: Prueba de análisis de la varianza del modelo de Regresión Lineal Múltiple.

MODELO		SUMA DE CUADRADOS	gl	MEDIA CUADRÁTICA	F	SIG.
1	Regresión	308.83	7.00	44.12	9.36	.003 ^b
	Residuo	37.71	8.00	4.71		
	Total	346.54	15.00			

a. Variable dependiente: Rn

b. Predictores: (Constante), SPC, pH, DO, Cloruros, Temperatura, TDS, Conductividad

3.7.3. Ecuación del Modelo de Regresión Lineal Múltiple

La ecuación del modelo cuantifica la relación entre la concentración de gas Radón como variable dependiente y las propiedades fisicoquímicas como variables independientes.

3.7.3.1. Pruebas de significación del modelo de regresión lineal múltiple.

Observando en la Tabla 3.38 el nivel de significancia asociado a cada prueba *T*, solo la Temperatura posee coeficientes significativamente distintos de cero. Por lo tanto, contribuyen de forma significativa a explicar lo que ocurre con la variable dependiente.

Tabla 3.38: Coeficientes de prueba de significación en una regresión lineal múltiple.

MODELO		COEFICIENTES NO ESTANDARIZADOS		COEFICIENTES ESTANDARIZADOS	T	SIG.
		B	Error estándar	Beta		
1	(Constante)	93.49	25.12		3.72	0.01
	Conductividad	-0.05	0.04	-0.54	-1.10	0.31
	Cloruros	0.08	0.08	0.32	0.99	0.35
	pH	-4.94	3,903.00	-0.17	-1.27	0.24
	Temperatura	-2.05	0.48	-1.04	-4.24	0.00
	TDS	27.68	47.55	0.24	0.58	0.58
	DO	0.19	0.83	0.03	0.23	0.83
	SPC	0.01	0.01	0.09	0.36	0.73

Variable dependiente: Rn

A partir de los coeficientes obtenidos en los resultados de regresión lineal múltiple (véase Tabla 3.38), se establece en la ecuación 3.21 la regresión lineal múltiple para describir la concentración del gas Radón (^{222}Rn) en función de Cloruros, Sólidos Totales, Conductividad, Conductancia Específica, pH, Oxígeno Disuelto y Temperatura.

$$y = 93.488 - 0.045x_1 + 0.077x_2 - 4.936x_3 - 2.046x_4 + 27.682x_5 + 0.191x_6 + 0.005x_7 \quad (\text{ec. 3.21})$$

Donde:

- y: Concentración del gas Radón (^{222}Rn), en Bq/L
- x1: Conductividad, en mS/cm
- x2: Cloruros, en ppm
- x3: Ph
- x4: Temperatura, en Celsius.
- x5: Solidos Totales Disueltos, en ppm
- x6: Oxígeno Disuelto, en ppm
- x7: Conductancia Especifica, en

3.7.4. Comparación de Valores Pronosticados con Valores Medidos de Concentración de Gas Radón

Se evaluará los valores de concentración de gas Radón obtenido en cada uno de los muestreos realizados en aguas superficiales de consumo humano con los valores de concentración de Radón pronosticados, los cuales se presentan en la Tabla 3.39.

Tabla 3.39: Valores de concentración de Radón pronosticados y su porcentaje de error.

CONCENTRACIÓN RADÓN	CONCENTRACIÓN TEÓRICA RADÓN	PORCENTAJE DE ERROR
Bq/L	Bq/L	%
15.37	13.78	10.37
14.39	14.03	2.53
15.95	12.92	18.99
14.57	14.67	0.72
16.90	15.38	8.98
15.93	15.43	3.13
12.98	16.22	24.94
14.20	15.31	7.80
5.84	6.54	11.94
5.61	6.92	23.36
8.43	5.97	29.12
5.55	5.77	4.01
6.32	7.48	18.29
5.91	6.66	12.62
5.31	4.14	22.05
4.91	5.37	9.36

Los porcentajes de error entre las variables reales y las variables predictivas se encuentran en el rango de 0.72% y 29.12%, en la Figuras 3.16 y Figura 3.17 se evidencia que los valores pronosticados se ajustan en gran porcentaje a los valores reales obtenidos, debido a que el modelo de predicción tiene un poder de descripción de 89.10%.

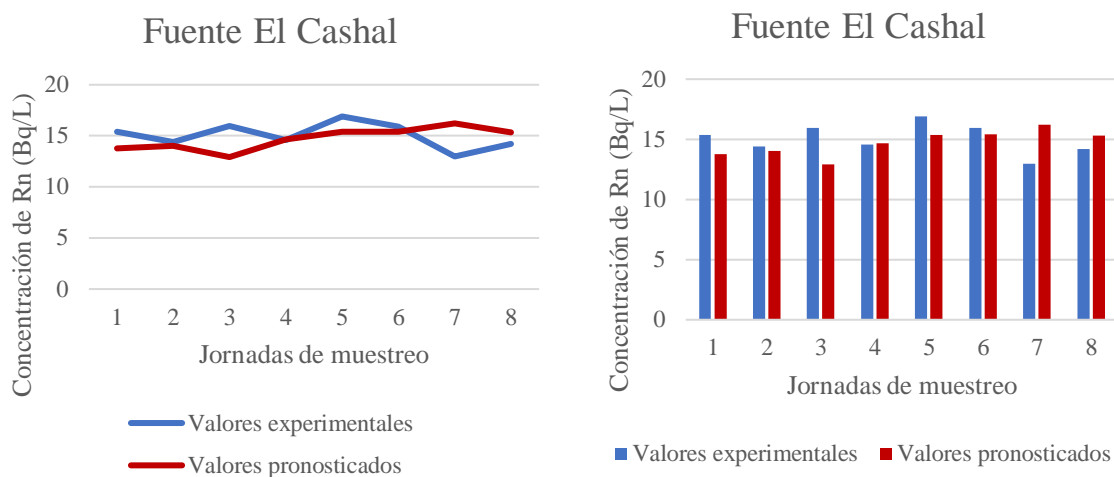


Figura 3.164: Valores de Concentración de Rn experimentales y pronosticados del punto de muestreo Fuente el Cashal.

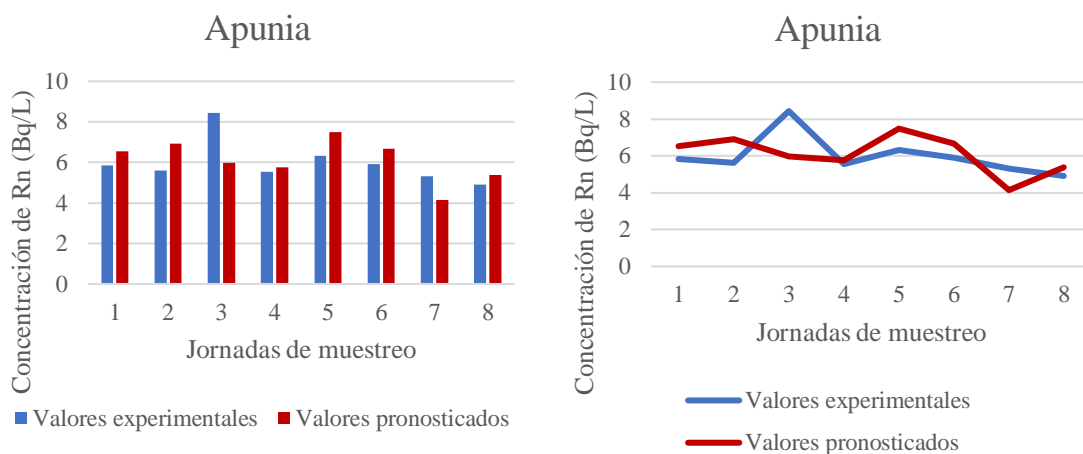


Figura 3.175: Valores de Concentración de Rn experimentales y pronosticados del punto de muestreo Fuente Apunia.

3.8. PROPUESTAS DE MITIGACIÓN DEL GAS RADÓN EN AGUA DE CONSUMO HUMANO

El punto de muestreo denominado El Cashal Fuente Fría ha presentado valores por arriba del límite permisible por la Norma Salvadoreña, por lo tanto, se abordan y analizan cual sería el método más conveniente para su remisión de Radón presente en esta fuente.

Varios estudios han evaluado las tecnologías de tratamiento de agua por su capacidad para reducir la concentración de Radón en el agua. La Tabla 3.40 contiene información acerca de la eficiencia de eliminación, el rango de flujo y el costo de construcción de 6 sistemas de mitigación que se utilizan en comunidades pequeñas y grandes de los Estados Unidos para eliminar el Radón del agua potable. El propósito de esta sección es presentar una visión general de las tecnologías existentes para eliminar el Radón del agua potable.

Tabla 3.40: Eficiencia, flujo y costos de construcción para sistemas de mitigación de gas Radón en agua de consumo humano.

METODO DE TRATAMIENTO	EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN (%)	RANGO DE FLUJO (m³/d)	COSTO UNITARIO DE CONSTRUCCIÓN (\$/m³.d)
Torre empacada (PTA)	79 a 99	49 a 102,740	18 a 481
Aireación por asperción	88 estimado	1,025	5.4
Bandeja de lamas	86 a 94	1,989 a 2,453	5.3 a 124
Aireación en cascada	88 estimado	5.45	7.9
Aireación superficial	83 a 92	54,504	42
Carbón Activado Granular	20 a 99	11 a 981	77 a 365

Fuente: USEPA, 1999

3.8.1. Sistemas de Aireación para la Reducción de Gas Radón en Agua

La aireación es considerada por la US EPA como la mejor tecnología disponible para cumplir con el nivel máximo de contaminante propuesto (MCL). La elección de la agencia se basó en las grandes eficiencias de remoción alcanzables (más del 99.9%), la compatibilidad de la aireación con otros procesos de tratamiento de agua y la disponibilidad de tecnologías de aireación en los suministros públicos de agua. Entre los tipos particulares de aireación más convenientes se encuentran: aireación de torre compacta (PTA) y las tecnologías de burbuja difusa y torre de rociado.

Todos los métodos de aireación explotan el principio de que el Radón es un gas altamente volátil y se moverá fácilmente del agua al aire. La tasa de extracción del agua potable se rige por la relación del volumen de aire suministrado por unidad de volumen de agua tratada (A/W), el tiempo de contacto, el área disponible para la transferencia de masa, la temperatura del agua y el aire, y la propiedades físicas y químicas del Radón (USEPA, 1999).

Estos métodos son prácticos para las comunidades que deben tratar grandes volúmenes de agua; en este sentido, un estudio realizado por Kinner, Schell, Quern, y Lessard se centra en la eliminación de Radón para suministros de aguas públicas de menos de 20,000 gpd en condiciones de cargas fluctuantes por medio de sistemas de aireación de torre empacada y de burbuja difusa, con el objetivo de evaluar la capacidad de cada sistema para la remoción de Radón.

3.8.1.1. Sistema de torre empacada para la reducción de gas Radón en agua.

El sistema de torre empacada probado fue instalado en el sitio de Mont Vernon. La torre de 5.5 metros de altura tenía 30 cm de diámetro y estaba construida de acero inoxidable (Kinner, et al., 1998). Los medios de empaque probados fueron mini anillos y sillines *Glitsch* y anillos *Pall Koch*. La altura total de empaque fue de 3.75 metros para los medios *Glitsch* y 3.60 metros para los medios de *Koch*. Se realizaron varias corridas de 3 horas a relaciones aire/agua (A/W) de 20:1, 10:1 y 5:1 en condiciones de caudal alto (4.25-17 gpm) y bajo (0-7 gpm).

Los datos de los porcentajes de remisión de gas Radón de la Figura 3.18 sugieren que las proporciones aire/agua (A/W) de 5:1, 10:1 y 20:1 lograron eficiencias máximas de eliminación de Radón. Hubo una ligera disminución en la eliminación en una relación A/W de 2:1 (97%), mientras que A/W de 1:1 rindió significativamente menor (87%). Los datos implican que aumentar las proporciones aire/agua (A/W) por encima del nivel de 2:1 a 5:1 en la torre empacada tuvo poco impacto en la eficiencia de la extracción, al tiempo que aumenta significativamente los costos operativos y de capital.

Los principales problemas operativos con la torre compacta parecen ser los potenciales peligros para la salud por el gas de escape, ensuciamiento de los medios de embalaje por Fe, Mn o bacterias (Kinner, et al., 1998).

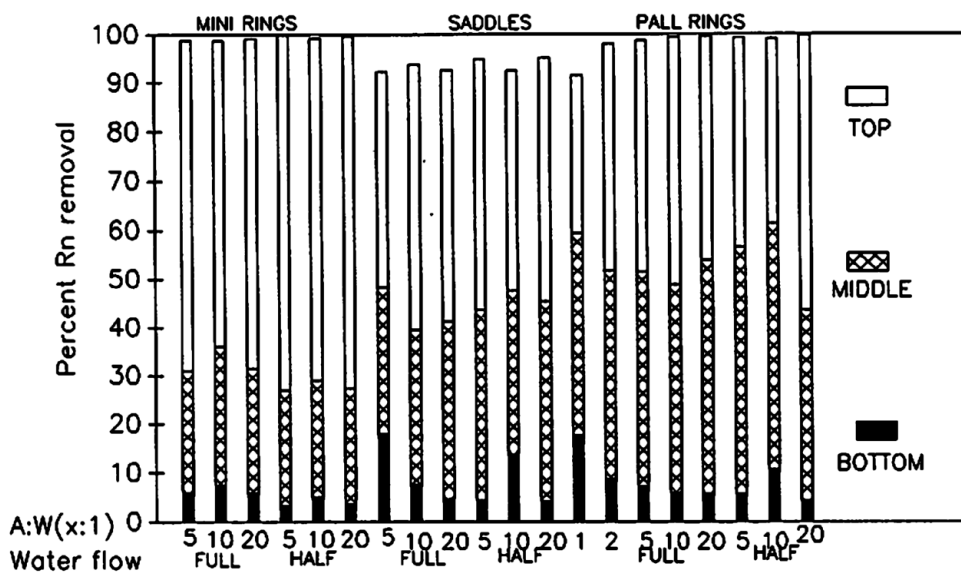


Figura 3.186: Porcentaje de eliminación de Rn para diferentes empaquetaduras. (Kinner, et al., 1998).

3.8.1.2. Sistema de burbuja difusa para la reducción de gas Radón en agua.

El sistema de burbujas difusas probado consistió en 3 tanques de polietileno con capacidad de 270 galones cada uno, operando en serie. La aireación fue proporcionada por un soplador que suministró aire a los difusores de tubo de plástico en espiral (1.9 cm de diámetro) que contienen numerosos orificios de 38/1000 cm de diámetro y ubicado a 35 cm por encima del fondo del tanque. El agua fue bombeada directamente de los pozos a una estación de bombeo ubicada en *Scobie Pond*, en el estado estadounidense de Nuevo Hampshire, con un caudal promedio en el suministro de agua de $Q = 9,965 \pm 346$ gpd y un promedio en la concentración de ^{222}Rn de $2,866 \pm 241$ Bq/L.

El agua fluyó a través de cada tanque y finalmente en un tanque de almacenamiento atmosférico. Los experimentos consistieron en una serie de corridas en varias relaciones aire/agua (A/W) de 2:1, 3:1, 5:1, 7:1, 10.5:1 y 15:1 y dos caudales de agua (12 y 27-33 gpm). Durante cada ejecución (Kinner, et al., 1998). La Figura 3.19 muestra las eliminaciones de Radón obtenidas en cada relación aire/agua (A/W) y caudal de agua probado para el sistema de burbujas difusas. Para la mayoría de las condiciones se alcanzó un estado estable después de 30 a 60 minutos de operación.

A medida que aumentaron las relaciones A/W, hubo un aumento estadísticamente significativo en el porcentaje de eliminación de Radón alcanzado (véase la Figura 3.19). Las extracciones obtenidas con un caudal bajo (para una relación A/W dada) siempre fueron significativamente mejores que las obtenidas con un caudal elevado, excepto en A/W de 2:1 y 3:1. Mayores relaciones A/W mostraron cada vez menos diferencia entre la eliminación obtenida con los dos caudales de aguas.

Cuando se opera a relaciones A/W de 5:1 y mayores (para ambos caudales) la eliminación general de Radón del sistema de burbujas difusas varió de 90.6 a 99.0% con actividades de efluentes en el rango de 25.9-241 Bq/L. Los resultados obtenidos en la unidad de flujo continuo *Scobie Pond* en períodos de aireación de 22 a 68 minutos indican que la aireación de burbujas difusa puede ser una técnica de tratamiento adecuada siempre que la actividad del Radón influyente no sea excesiva.

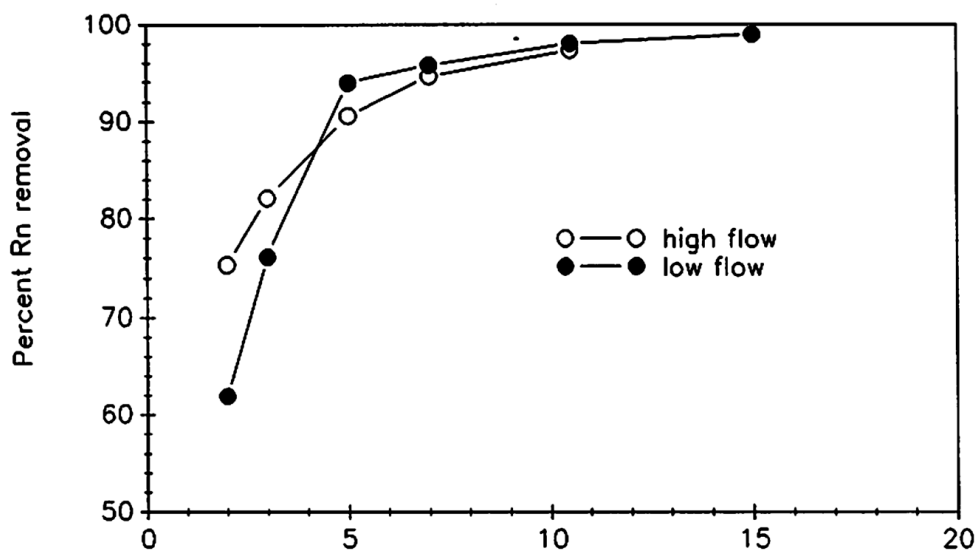


Figura 3.79: Porcentaje de eliminación de Rn para flujos altos y bajos en la estación de bombeo de *Scobie Pond* (Kinner, et al., 1998).

Estas tecnologías, aunque son eficientes para remover ^{222}Rn del agua, presentan un impedimento técnico y presupuestario demasiado desafiante para el país, en el caso de encontrar alguna fuente con niveles altos en las concentraciones de Radón. En esta investigación, en el punto de muestreo el Cashal, los niveles de concentración de Radón sobrepasan el Límite Máximo Permisible de 11.1 Bq/L por lo que se detallan a continuación tecnologías más viables para ser implementadas en este punto con el objetivo de disminuir los niveles de Radón.

3.8.1.3. Aireación simple durante el almacenamiento para la reducción de gas Radón en agua para consumo.

Las pérdidas observadas después de que el agua pasa a través de un tanque de almacenamiento son a menudo más altas que las medidas cuando el agua reside en el tanque sin ser molestada. La mayor pérdida se ha atribuido a la aireación que ocurre cuando el agua salpica en los tanques. De hecho, el modo de entrada es muy importante. La entrada inferior debajo de la línea de agua produce eliminaciones similares a la pérdida debido al solo almacenamiento. La caída libre o la entrada a través de la boquilla de pulverización o la caja de salpicaduras pueden aumentar las remociones al rango de 50 a 70% (USEPA, 1999).

3.8.1.4. Pérdida de gas Radón en agua por los sistemas de distribución de agua.

Se han realizado varios estudios sobre este método de eliminación de Radón del agua potable. La mayor parte de la disminución en el Radón resulta de la descomposición durante el tránsito o el almacenamiento en la red de tuberías cerrada. La mayoría de los estudios han documentado pérdidas en el rango de 10 a 20% (USEPA, 1999).

La EPA requiere que el agua cumpla con el MCL cuando ingresa al sistema de distribución, este método de tratamiento no sería aceptable. Este método probablemente se usaría solo donde los niveles de Radón que ingresan a la red de distribución son relativamente bajos.

Otros han demostrado que los niveles de Radón en un sistema de distribución en realidad pueden aumentar cuando se libera Radón durante la descomposición del radio asociado con la escala de tubería a base de hierro (USEPA, 1999).

CONCLUSIONES

- i.** Se encontró presencia de gas Radón en todas las matrices de agua analizadas. Las concentraciones en las aguas subterráneas, específicamente en el pozo ubicado en el Instituto Nacional Luis Reynaldo Tobar, resultaron estar por debajo de la Concentración Mínima Detectable (2.14 Bq/L), esto indica que aun cuando hay presencia del gas Radón en el agua, está en una muy baja concentración.
- ii.** La implementación de la metodología para la cuantificación de gas Radón en Agua Potable ASTM-D5072-09 (2016) ha permitido obtener resultados satisfactorios en el análisis de Radón para otras matrices de agua, tales como: fuentes de agua Superficial y Vapor Condensado proveniente de fumarolas.
- iii.** Las pruebas de Control de Calidad que requiere el método ASTM D5072-09 para Radón en agua potable, se realizaron utilizando soluciones patrón certificadas de Radio-226, cumpliendo satisfactoriamente con cada uno de los límites de aceptabilidad en cada una de las pruebas realizadas: capacidad del analista y del laboratorio, pruebas por duplicado, verificación de la calibración y soluciones en blanco.
- iv.** Las fuentes superficiales de consumo humano, El Cashal y Apunia, muestran una correlación lineal significativa entre las concentraciones de gas Radón y la Conductividad, Cloruros, Temperatura, TDS y Conductividad Específica. Lo cual permite, por medio de un modelo de regresión lineal múltiple, estimar las concentraciones de gas Radón a partir de los datos de Conductividad, Cloruros, Temperatura, TDS y Conductividad Específica con un porcentaje de error menor al 30%.
- v.** Las tres matrices de agua analizadas (agua superficial, subterránea y vapor condensado de fumarola) no se relacionan entre sí respecto a las concentraciones de gas Radón, esto puede deberse a la naturaleza y procedencia del mismo gas; en los sitios donde las concentraciones de Radón permanecen constantes se puede inferir que éste procede de la roca encajante y en los puntos donde las concentraciones fluctúan puede deberse a la influencia geotérmica de la zona y la sismicidad, debido que al estar presente el Radón en los poros de las rocas, puede difundirse a través del suelo, fallas y un cuerpo rocoso.

- vi.** El punto de muestro de agua potable denominado fuente El Cashal ha presentado valores de concentración de gas Radón por encima del límite máximo permisible de 11.1 Bq/L de acuerdo al Reglamento Técnico Salvadoreño RTS 13.02.01.14, esta fuente abastece a varios cantones y caseríos en la zona de Ahuachapán: Cantón El barro, Caserío Cerro Blanco, Planta El Cantón Sunsutucupac, Cashal, Cantón El Barro y los Maguyes.

- vii.** El análisis estadístico ha permitido observar que solamente las fuentes superficiales (fuente El Cashal y Apunia) son las que presentan una correlación lineal entre la concentración de Radón y los parámetros fisicoquímicos, las fuentes que poseen mezclas y las fumarolas no poseen correlaciones estadísticas, pero si presentan relaciones cualitativas entre la concentración de Radón y los parámetros fisicoquímicos, donde al variar la concentración de Radón, varían de forma directa o inversa algunos parámetros fisicoquímicos, esto puede ser debido a la influencia de factores externos, tales como: la permeabilidad del suelo, flujo de ascenso, el porcentaje de mezclado, agua meteórica, sismicidad.

- viii.** El método más eficiente para disminuir las concentraciones de ^{222}Rn en agua de consumo humano de acuerdo a la bibliografía consultada es la aireación. Específicamente en la fuente El Cashal, la aireación simple durante el almacenamiento y debido al decaimiento radioactivo natural del ^{222}Rn , lo convierte en el método más viable para ser estudiado con el objetivo de disminuir las concentraciones de ^{222}Rn hasta por debajo del límite establecido por el Reglamento Técnico Salvadoreño de 11.1 Bq/L.

RECOMENDACIONES

- i. Mantener un monitoreo constante y periódico de las concentraciones de gas Radón en las fuentes destinadas al consumo humano que presentaron valores por encima del Límite Máximo Permisible de acuerdo al Reglamento Técnico Salvadoreño RTS 13.02.01.14.
- ii. Complementar esta investigación con otros estudios enfocados a evaluar la probabilidad de la existencia de efectos negativos sobre la población a raíz de las concentraciones de gas Radón en el agua de consumo humano.
- iii. Para realizar el muestreo en las fumarolas es necesario que se emplee la misma técnica de recolección de muestra y no varíe a lo largo de la investigación, ya que se comprobó que si la muestra se colecta de forma distinta cambian totalmente los resultados de concentración de gas Radón.
- iv. Es recomendable realizar una investigación respecto al Radón y las anomalías asociadas a la sismicidad de la zona, monitoreando el punto de la fumarola El Sauce, debido a que en el cuarto muestreo realizado dos días antes de un sismo (véase la Tabla G-1) se obtuvo un aumento en la concentración de gas Radón hasta los 29.59 Bq/L y de los parámetros fisicoquímicos: Cloruros y Sólidos Totales, sin embargo, en el octavo muestreo se obtuvo otro aumento en la concentración de gas Radón de 28.88 Bq/L sin registrar un aumento en los parámetros fisicoquímicos.
- v. Realizar mediciones de concentración de gas ^{222}Rn en los sistemas de distribución de agua potable de los puntos con mayores concentraciones de gas ^{222}Rn identificados en esta investigación (Fuente El Cashal), con el objetivo de identificar si existe una variación significativa en las concentraciones de gas ^{222}Rn provocada por el sistema de distribución del agua.
- vi. Continuar con la realización de nuevos análisis de gas Radón en muestras de agua destinadas al consumo humano, iniciando en áreas que presentan influencia hidrotermal y principales cabeceras departamentales del país; con el propósito de identificar fuentes con concentraciones mayores al Límite Máximo Permisible por el RTS 13.02.01.14 (11.1 Bq/L) y que requieran un tratamiento previo al consumo del agua potable.

REFERENCIAS

- Abdi, H., y Williams, L. (2010). *Principal Component Analysis*. Estados Unidos. John Wiley y Sons, Inc.
- Aguamarket. (12 de agosto de 2019). *Relación entre Agua Superficial y Subterránea*. Obtenido de aguamarket: <https://www.aguamarket.com/tema-interes.asp?id=3939ytema=relacion+entre+agua+superficial+y+subterranea>
- ANDA. (19 de julio de 2019). *Plan Estratégico Institucional 2014-2019*. Obtenido de anda.gob.sv: <http://www.anda.gob.sv/wp-content/uploads/2015/05/Plan-Estrategico-Institucional-ANDA-2014-2019.pdf>.
- Anderson, D. R., Sweeney, D. J., y Williams, T. A. (2012). *Estadística para Negocios y Economía*. Mexico D.F., México: Cengage Learning Editores.
- Arnórsson, S., Bjarnason, J. O., Giroud, N., Gunnarsson, I., y Stefánsson, A. (2006). *Sampling and Analysis of Geothermal Fluids*. Reikiavik, Islandia. Institute of Earth Sciences, University of Iceland.
- ASTM Standards. (2016). *Standard Test Method for Radon in Drinking Water D5072 – 09 (Reapproved 2016)*. ASTM International .
- ATSDR. (1990). *Resumen de Salud Pública Radón*. Washington D. C., Estados Unidos: Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades.
- Bosse, H., Lorenz, W., Merino, A., Mihm, A., Rode, K., Schmidt, M., . . . Weber, H. (1978). *Mapa Geológico de la República de El Salvador*. San Salvador.
- Custodio, E. (2001). *Hidrología Subterránea Segunda Edición*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Barcelona.
- De La Fuente, S. (2011). *Análisis por Componentes Principales*. Madrid, España: Universidad Autónoma de Madrid.
- EPA. (2012). *Report to Congress: Radon in Drinking Water Regulations*. Washington, Estados Unidos: US EPA Archive Document.

- Errico, L., y Giovanetti, L. (s.f.). *Rdioactividad y Medioambiente* . La Plata, Argentina: Universidad Nacional de La Plata.
- Fuente, M. (2016). *Estudio de Diferentes Técnicas para la Medida de Exhalación de Radón en Suelos*. Santander, España: Universidad de Cantabria.
- Garzon, G., Salazar, S., y Hincapie, W. (2004). *El Gas Radón: Una Amenaza Radioactiva Natural*. Manizales, Colombia: Universidad de Caldas .
- Giorgio, B., y Paulina, L. (2014). *Guía de Asociación entre Variables (Pearson y Spearman en SPSS)*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Gutiérrez, X. (2008). *Estudio Geoquímico de Gases en Torno a la Falla el Hoyón, Berlín, Usulután*. San Salvador.
- ILCE, I. L. (24 de agosto de 2019). *Biblioteca Digital del ILCE*. Obtenido de: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/Colecciones/index.php?clave=cTiCalorypag=6>
- Kinner, N. E., Schell, G., Quern, P., y Lessard, C. (1998). *Eliminación del Radón del Agua Potable Mediante el Carbono Activado Granular, la Aireación de la Torre Empacada y las Técnicas de Aireación de Burbuja Difusas*. New Hampshire, Estados Unidos: University of New Hampshire Durham.
- LaGeo. (1 de agosto de 2019). *lageo.com.sv*. Obtenido de: <http://www.lageo.com.sv/index.php?cat=9ytitile=%BFQu%E9%20es%20la%20Geo%20termia?ylang=es>
- Lastra, M. F. (2015). *Puesta a Punto de un Sistema de Medida de Radón en Agua Aplicado al Estudio de Acuíferos (Set up of a radon in water measurement system applied to aquifers' study)*. Santander, España. Universidad de Cantabria.
- Lesikar, B., Melton, R., Hare, M., Hopkins, J., y Dozier, M. (2006). *Problemas del Agua Potable: los Radionúclidos*. AgriLIFE extension. Texas AyM System, 1-9.
- Martin, R. (14 de agosto de 2019). *UCLM.es*. Obtenido de: https://previa.uclm.es/profesorado/raulmmartin/Estadistica/Practicaspss/REGRESION_LINEAL_CON_SPSS.pdf

- Matus, A. (2019). *Microcuencas en el Departamento de Ahuachapán, El Salvador*. [Mapa hidrogeográfico (elaboración personal)].
- Mingorance, F., Ibáñez, S., Rovira, S., Chirino, G., Quiroga, M., Sebok, A., . . . Arreghini, G. (2018). *Sismotectónica, Radón y Ambiente*. Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de Cuyo.
- MINITAB. (20 de septiembre de 2019). *support.minitab.com*. Obtenido de:
<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/multivariate/how-to/principal-components/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/#scree-plot>
- Morales, K., y Sigüenza, A. (2018). *Determinación de la Actividad del Radón (^{222}Rn) en Fuentes Termales de Agua Geotérmica*. Escuela de Posgrado, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de El Salvador. San Salvador, El Salvador
- Mosqueda, F. (2010). *Desarrollo de Procedimientos para la Determinación de Radioisótopos en Muestras Ambientales Mediante Técnicas de Bajo Recuento por Centelleo Líquido y Radiación Cerenkov*. Huelva, España: Universidad de Huelva.
- OIEA. (2016). *Protección Radiológica y Seguridad de las Fuentes de Radiación: normas básicas internacionales de seguridad*. Viena, Austria: Organismo Internacional de Energía Atómica .
- OMS. (2018). *Guías para la Calidad del Agua de Consumo Humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda*. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud .
- OSARTEC. (2018). *RTS 13.02.01:14: Agua. Agua de Consumo Humano. Requisitos de Calidad e Inocuidad*. San Salvador, El Salvador. Diario Oficial No. 60, Tomo No. 419.
- Pardo, A., y Ruis, M. (2005). *Análisis de Datos con SPSS 13 Base*. España: McGraw-Hill.
- PNUMA. (2016). *Radiación: Efectos y Fuentes*. Viena Austria: Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas.
- Quindós, L. (1995). *Radón: Un Gas Radioactivo de Origen Natural en su Casa*. Santander, España: Universidad de Cantabria.

- Rodríguez, R. (2013). *Cuantificación de la Actividad de Radón (^{222}Rn) y Radio (^{226}Ra) Aplicando la Técnica de Centelleo Líquido en Aguas Termales del Cerro Pacho, Lago de Coatepeque, Departamento de Santa Ana*. (Tesis de grado). Facultad Multidisciplinaria de Occidente. Universidad de El Salvador. Santa Ana, El Salvador.
- Ruales, F. R., y Perdomo, C. M. (2007). *Uso del Análisis de Componentes Principales para Construir un Índice Tipo Producción en Ganado Romosinuano*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Salazar, B. (2017). *Metal Sulphide Scaling in Production Wells in Ahuachapan Geothermal Field, El Salvador*. Reykjavik, Islandia: UNU-GTP Geothermal Training Programme.
- Sosa, D. (2018). *Métodos Estadísticos Multivariados*. San Salvador, El Salvador: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.
- Triola, M. F. (2018). *Estadística, décimo segunda edición*. Mexico D.F., México: Pearson Educación S.A.
- Universidad de Alcalá. (1994). *Química Nuclear*. Obtenido de:
http://www3.uah.es/edejesus/resumenes/QG/Tema_2.pdf
- USEPA. (1999). *Evaluación de Riesgos de Exposición al Radón en el Agua Potable*. Washington D.C., Estados Unidos: National Academies Press.



ANEXOS

Anexo A: Conglomerado de Datos para el Cálculo de la Actividad de Gas Radón en Muestras de Agua.

Tabla A-1: Datos correspondientes a la tercera campaña de muestreo.

PUNTO DE MUESTREO	CPM	FECHA Y HORA DE MUESTREO	FECHA Y HORA DE MEDICIÓN	CPS (Ra)	Rn	T (días)	D	AC (Bq/L)	DER
Fumarola El Sauce	85.63	4/4/2019 9:05	5/4/2019 13:00	1.43	0.58	1.17	0.81	20.12	0.36
	84.20	4/4/2019 9:08	5/4/2019 13:30	1.40	0.56	1.19	0.81	19.35	
Cashal Fuente	78.23	4/4/2019 10:40	5/4/2019 14:00	1.30	0.46	1.15	0.81	15.77	0.40
	76.77	4/4/2019 10:46	5/4/2019 14:30	1.28	0.43	1.17	0.81	14.97	
Cashal Fuente Caliente	57.27	4/4/2019 11:03	5/4/2019 15:00	0.95	0.11	1.18	0.81	3.72	0.09
	57.00	4/4/2019 11:10	5/4/2019 15:30	0.95	0.10	1.19	0.81	3.57	
Agua Shuca	Muestreo no realizado								
Apunia	59.50	4/4/2019 15:55	5/4/2019 21:00	0.99	0.14	1.22	0.80	5.05	0.91
	62.17	4/4/2019 16:05	5/4/2019 21:30	1.04	0.19	1.24	0.80	6.63	
Pozo Mirasol	Muestreo no realizado								
Pozo Instituto Agrícola	49.27	4/4/2019 15:12	5/4/2019 19:00	0.82	-0.03	1.17	0.81	-0.90	0.72
	51.13	4/4/2019 15:16	5/4/2019 19:30	0.85	0.00	1.19	0.81	0.17	
Pozo San Luis	52.63	4/4/2019 14:50	5/4/2019 22:00	0.88	0.03	1.31	0.79	1.06	0.80
	54.80	4/4/2019 14:55	5/4/2019 22:30	0.91	0.07	1.33	0.79	2.36	
Río los Ausoles A	52.90	4/4/2019 13:18	5/4/2019 16:00	0.88	0.03	1.12	0.82	1.18	1.84
	48.07	4/4/2019 13:22	5/4/2019 16:30	0.80	-0.05	1.14	0.81	-1.59	
Río los Ausoles B	60.47	4/4/2019 13:03	5/4/2019 17:00	1.01	0.16	1.18	0.81	5.57	0.75
	62.67	4/4/2019 13:03	5/4/2019 17:30	1.04	0.20	1.20	0.80	6.87	
Fumarola El Playón	67.57	4/4/2019 13:49	5/4/2019 18:00	1.13	0.28	1.18	0.81	9.69	0.27
	68.37	4/4/2019 13:53	5/4/2019 18:30	1.14	0.29	1.20	0.80	10.19	
Río los Ausoles C	47.93	4/4/2019 14:23	5/4/2019 20:00	0.80	-0.05	1.24	0.80	-1.70	1.29
	51.27	4/4/2019 14:26	5/4/2019 20:30	0.85	0.01	1.26	0.80	0.25	

Tabla A-2: Datos correspondientes a la segunda campaña de muestreo.

PUNTO DE MUESTREO	CPM	FECHA Y HORA DE MUESTREO	FECHA Y HORA DE MEDICIÓN	CPS (Ra)	Rn	T (días)	D	AC (Bq/L)	DER
Fumarola El Sauce	73.07	24/4/2019 10:00	25/4/2019 19:45	1.22	0.37	1.42	0.77	13.43	2.06
	80.17	24/4/2019 10:30	25/4/2019 20:15	1.34	0.49	1.42	0.77	17.72	
Cashal Fuente	76.37	24/4/2019 10:50	25/4/2019 20:45	1.27	0.43	1.42	0.77	15.45	1.03
	72.83	24/4/2019 11:00	25/4/2019 21:15	1.21	0.37	1.44	0.77	13.34	
Cashal Fuente Caliente	55.73	24/4/2019 11:12	25/4/2019 21:45	0.93	0.08	1.45	0.77	2.97	2.04
	61.60	24/4/2019 11:15	25/4/2019 22:15	1.03	0.18	1.47	0.77	6.57	
Agua Shuca	61.33	24/4/2019 11:50	25/4/2019 22:45	1.02	0.17	1.47	0.77	6.40	0.23
	60.63	24/4/2019 11:57	25/4/2019 23:15	1.01	0.16	1.48	0.76	5.99	
Apunia	60.23	24/4/2019 13:12	25/4/2019 23:45	1.00	0.16	1.45	0.77	5.71	0.11
	59.87	24/4/2019 13:16	26/4/2019 0:15	1.00	0.15	1.47	0.77	5.51	
Pozo Mirasol	54.53	24/4/2019 14:00	26/4/2019 0:45	0.91	0.06	1.46	0.77	2.25	0.25
	53.83	24/4/2019 14:05	26/4/2019 1:15	0.90	0.05	1.48	0.77	1.83	
Pozo Instituto Agrícola	49.00	24/4/2019 14:43	25/4/2019 13:45	0.82	-0.03	0.97	0.84	-1.02	1.08
	51.83	24/4/2019 14:45	25/4/2019 14:15	0.86	0.02	0.99	0.84	0.56	
Pozo San Luis	54.47	24/4/2019 15:03	25/4/2019 14:45	0.91	0.06	1.00	0.83	2.03	1.09
	51.53	24/4/2019 15:08	25/4/2019 15:15	0.86	0.01	1.02	0.83	0.39	
Río los Ausoles A	52.97	24/4/2019 16:05	25/4/2019 17:45	0.88	0.04	1.08	0.82	1.21	1.73
	48.43	24/4/2019 16:07	25/4/2019 18:15	0.81	-0.04	1.10	0.82	-1.37	
Río los Ausoles B	50.10	24/4/2019 15:51	25/4/2019 16:45	0.84	-0.01	1.05	0.83	-0.42	0.13
	49.77	24/4/2019 15:54	25/4/2019 17:15	0.83	-0.02	1.07	0.82	-0.60	
Fumarola El Playón	131.93	24/4/2019 16:00	25/4/2019 15:45	2.20	1.35	1.00	0.83	45.43	7.53
	98.57	24/4/2019 16:16	25/4/2019 16:15	1.64	0.80	1.01	0.83	26.79	
Río los Ausoles C	48.00	24/4/2019 16:43	25/4/2019 18:45	0.80	-0.05	1.10	0.82	-1.62	0.41
	46.97	24/4/2019 16:47	25/4/2019 19:15	0.78	-0.06	1.11	0.82	-2.21	

Tabla A-3: Datos correspondientes a la tercera campaña de muestreo.

PUNTO DE MUESTREO	CPM	FECHA Y HORA DE MUESTREO	FECHA Y HORA DE MEDICIÓN	CPS (Ra)	Rn	T (días)	D	AC (Bq/L)	DER
Fumarola El Sauce	81.23	7/5/2019 9:37	8/5/2019 14:47	1.35	0.51	1.23	0.80	17.74	5.94
	61.60	7/5/2019 9:37	8/5/2019 15:17	1.03	0.18	1.25	0.80	6.31	
Cashal Fuente	79.90	7/5/2019 10:43	8/5/2019 15:47	1.33	0.48	1.22	0.80	16.95	0.98
	76.37	7/5/2019 10:45	8/5/2019 16:17	1.27	0.43	1.24	0.80	14.94	
Cashal Fuente Caliente	60.93	7/5/2019 10:54	8/5/2019 16:47	1.02	0.17	1.26	0.80	5.92	0.73
	58.77	7/5/2019 11:10	8/5/2019 17:17	0.98	0.13	1.27	0.79	4.66	
Agua Shuca	84.43	7/5/2019 12:10	8/5/2019 17:47	1.41	0.56	1.24	0.80	19.67	1.29
	79.70	7/5/2019 12:14	8/5/2019 18:17	1.33	0.48	1.26	0.80	16.96	
Apunia	64.50	7/5/2019 1:14	8/5/2019 18:47	1.08	0.23	1.74	0.73	8.76	0.33
	63.43	7/5/2019 1:15	8/5/2019 19:17	1.06	0.21	1.76	0.73	8.10	
Pozo Mirasol	53.50	7/5/2019 13:46	8/5/2019 19:47	0.89	0.04	1.26	0.80	1.56	0.55
	55.00	7/5/2019 13:50	8/5/2019 20:17	0.92	0.07	1.28	0.79	2.45	
Pozo Instituto Agrícola	49.17	7/5/2019 14:10	8/5/2019 20:47	0.82	-0.03	1.29	0.79	-0.98	0.87
	51.43	7/5/2019 14:14	8/5/2019 21:17	0.86	0.01	1.30	0.79	0.35	
Pozo San Luis	57.20	7/5/2019 14:43	8/5/2019 21:47	0.95	0.11	1.30	0.79	3.77	1.79
	52.27	7/5/2019 14:48	8/5/2019 22:17	0.87	0.02	1.32	0.79	0.85	
Río los Ausoles A	49.90	7/5/2019 15:32	8/5/2019 22:47	0.83	-0.02	1.31	0.79	-0.56	0.31
	49.10	7/5/2019 15:40	8/5/2019 23:17	0.82	-0.03	1.33	0.79	-1.03	
Río los Ausoles B	57.80	7/5/2019 15:56	8/5/2019 23:47	0.96	0.12	1.34	0.78	4.15	1.75
	62.93	7/5/2019 16:00	9/5/2019 0:17	1.05	0.20	1.36	0.78	7.23	
Fumarola El Playón	60.97	7/5/2019 16:12	9/5/2019 0:47	1.02	0.17	1.37	0.78	6.07	1.13
	64.33	7/5/2019 16:16	9/5/2019 1:17	1.07	0.22	1.39	0.78	8.11	
Río los Ausoles C	49.53	7/5/2019 16:40	9/5/2019 1:47	0.83	-0.02	1.39	0.78	-0.79	0.69
	47.77	7/5/2019 16:43	9/5/2019 2:17	0.80	-0.05	1.41	0.77	-1.85	

Tabla A-4: Datos correspondientes a la cuarta campaña de muestreo.

PUNTO DE MUESTREO	CPM	FECHA Y HORA DE MUESTREO	FECHA Y HORA DE MEDICIÓN	CPS (Ra)	Rn	T (días)	D	AC (Bq/L)	DER
Fumarola El Sauce	100.57	14/5/2019 10:20	16/5/2019 9:15	1.68	0.83	1.98	0.70	33.26	3.93
	89.40	14/5/2019 10:38	16/5/2019 10:15	1.49	0.64	2.00	0.70	25.92	
Cashal Fuente	73.98	14/5/2019 11:20	16/5/2019 11:15	1.23	0.39	2.02	0.69	15.59	1.29
	70.80	14/5/2019 11:27	16/5/2019 12:15	1.18	0.33	2.05	0.69	13.54	
Cashal Fuente Caliente	59.23	14/5/2019 11:41	15/5/2019 15:15	0.99	0.14	1.17	0.81	4.85	0.02
	59.20	14/5/2019 11:43	15/5/2019 16:15	0.99	0.14	1.21	0.80	4.87	
Agua Shuca	85.28	14/5/2019 12:17	16/5/2019 5:15	1.42	0.57	1.73	0.73	22.02	0.20
	84.52	14/5/2019 12:20	16/5/2019 6:15	1.41	0.56	1.77	0.73	21.69	
Apunia	59.90	14/5/2019 13:06	15/5/2019 21:15	1.00	0.15	1.36	0.78	5.42	0.20
	60.25	14/5/2019 13:10	15/5/2019 22:15	1.00	0.16	1.40	0.78	5.67	
Pozo Mirasol	Muestreo no realizado								
Pozo Instituto Agrícola	52.53	14/5/2019 14:20	15/5/2019 19:15	0.88	0.03	1.23	0.80	0.99	0.74
	51.15	14/5/2019 14:25	15/5/2019 20:15	0.85	0.01	1.26	0.80	0.18	
Pozo San Luis	52.53	14/5/2019 13:39	15/5/2019 17:15	0.88	0.03	1.17	0.81	0.98	0.37
	51.83	14/5/2019 13:41	15/5/2019 18:15	0.86	0.02	1.21	0.80	0.58	
Río los Ausoles A	49.89	14/5/2019 15:44	15/5/2019 23:15	0.83	-0.02	1.33	0.79	-0.56	1.17
	47.78	14/5/2019 15:50	16/5/2019 0:15	0.80	-0.05	1.37	0.78	-1.83	
Río los Ausoles B	63.90	14/5/2019 16:05	16/5/2019 1:15	1.07	0.22	1.40	0.78	7.87	1.28
	66.60	14/5/2019 16:10	16/5/2019 2:15	1.11	0.26	1.44	0.77	9.57	
Fumarola El Playón	154.47	14/5/2019 15:40	16/5/2019 7:15	2.57	1.73	1.67	0.74	65.56	15.22
	103.27	14/5/2019 16:00	16/5/2019 8:15	1.72	0.87	1.70	0.73	33.34	
Río los Ausoles C	48.07	14/5/2019 16:27	16/5/2019 3:15	0.80	-0.05	1.47	0.77	-1.69	0.46
	47.25	14/5/2019 16:32	16/5/2019 4:15	0.79	-0.06	1.51	0.76	-2.20	

Tabla A-5: Datos correspondientes a la quinta campaña de muestreo.

PUNTO DE MUESTREO	CPM	FECHA Y HORA DE MUESTREO	FECHA Y HORA DE MEDICIÓN	CPS (Ra)	Rn	T (días)	D	AC (Bq/L)	DER
Fumarola El Sauce	49.43	22/5/2019 10:08	24/5/2019 12:51	0.82	-0.02	2.13	0.68	-0.97	1.13
	51.52	22/5/2019 10:11	24/5/2019 13:51	0.86	0.01	2.17	0.67	0.47	
Cashal Fuente	77.18	22/5/2019 10:58	24/5/2019 2:51	1.29	0.44	1.68	0.74	16.70	0.25
	77.6	22/5/2019 11:02	24/5/2019 3:51	1.29	0.45	1.72	0.73	17.09	
Cashal Fuente Caliente	60.08	22/5/2019 11:35	23/5/2019 22:51	1.00	0.15	1.49	0.76	5.66	0.36
	59.3	22/5/2019 11:55	23/5/2019 23:51	0.99	0.14	1.52	0.76	5.21	
Agua Shuca	75.2	22/5/2019 12:33	24/5/2019 10:51	1.25	0.41	1.95	0.70	16.22	0.92
	72.85	22/5/2019 12:42	24/5/2019 11:51	1.21	0.37	1.99	0.70	14.75	
Apunia	60.87	22/5/2019 13:42	24/5/2019 0:51	1.01	0.17	1.49	0.76	6.14	0.29
	61.4	22/5/2019 13:45	24/5/2019 1:51	1.02	0.18	1.52	0.76	6.51	
Pozo Mirasol	54.7	22/5/2019 14:28	23/5/2019 16:51	0.91	0.06	1.12	0.82	2.21	0.07
	54.53	22/5/2019 14:31	23/5/2019 17:51	0.91	0.06	1.16	0.81	2.13	
Pozo Instituto Agrícola	50.43	22/5/2019 14:59	23/5/2019 18:51	0.84	-0.01	1.18	0.81	-0.24	0.02
	50.47	22/5/2019 15:02	23/5/2019 19:51	0.84	-0.01	1.22	0.80	-0.21	
Pozo San Luis	55.68	22/5/2019 15:18	23/5/2019 20:51	0.93	0.08	1.25	0.80	2.84	0.14
	55.38	22/5/2019 15:27	23/5/2019 21:51	0.92	0.08	1.29	0.79	2.68	
Río los Ausoles A	47.83	22/5/2019 16:21	24/5/2019 4:51	0.80	-0.05	1.54	0.76	-1.86	1.02
	49.7	22/5/2019 16:26	24/5/2019 5:51	0.83	-0.02	1.58	0.75	-0.71	
Río los Ausoles B	66.42	22/5/2019 16:45	24/5/2019 8:51	1.11	0.26	1.69	0.74	9.90	0.19
	66.73	22/5/2019 16:48	24/5/2019 9:51	1.11	0.26	1.73	0.73	10.17	
Fumarola El Playón	65.85	22/5/2019 16:21	24/5/2019 14:51	1.10	0.25	1.96	0.70	10.01	12.90
	98.57	22/5/2019 16:35	24/5/2019 15:51	1.64	0.80	1.99	0.70	32.00	
Río los Ausoles C	48.5	22/5/2019 17:12	24/5/2019 6:51	0.81	-0.04	1.59	0.75	-1.46	1.01
	46.7	22/5/2019 17:14	24/5/2019 7:51	0.78	-0.07	1.63	0.74	-2.60	

Tabla A-6: Datos correspondientes a la sexta campaña de muestreo.

PUNTO DE MUESTREO	CPM	FECHA Y HORA DE MUESTREO	FECHA Y HORA DE MEDICIÓN	CPS (Ra)	Rn	T (días)	D	AC (Bq/L)	DER
Fumarola El Sauce	59.10	28/5/2019 9:47	30/5/2019 12:59	0.99	0.14	2.15	0.68	5.71	6.70
	73.90	28/5/2019 10:00	30/5/2019 13:59	1.23	0.38	2.19	0.67	16.02	
Cashal Fuente	75.13	28/5/2019 10:25	30/5/2019 8:59	1.25	0.40	1.96	0.70	16.20	0.34
	74.15	28/5/2019 10:30	30/5/2019 9:59	1.24	0.39	2.00	0.70	15.66	
Cashal Fuente Caliente	57.72	28/5/2019 10:31	30/5/2019 10:59	0.96	0.11	2.04	0.69	4.66	0.27
	57.13	28/5/2019 10:39	30/5/2019 11:59	0.95	0.10	2.08	0.69	4.29	
Agua Shuca	65.95	28/5/2019 11:03	30/5/2019 14:59	1.10	0.25	2.18	0.67	10.50	0.50
	66.95	28/5/2019 11:05	30/5/2019 15:59	1.12	0.27	2.23	0.67	11.27	
Apunia	60.28	28/5/2019 11:30	30/5/2019 6:59	1.00	0.16	1.83	0.72	6.15	0.35
	59.48	28/5/2019 11:32	30/5/2019 7:59	0.99	0.14	1.87	0.71	5.67	
Pozo Mirasol	50.15	28/5/2019 16:05	29/5/2019 22:59	0.84	-0.01	1.31	0.79	-0.41	1.23
	52.42	28/5/2019 16:10	29/5/2019 23:59	0.87	0.03	1.35	0.78	0.94	
Pozo Instituto Agrícola	50.97	28/5/2019 12:15	29/5/2019 18:59	0.85	0.00	1.30	0.79	0.08	0.14
	51.23	28/5/2019 12:18	29/5/2019 19:59	0.85	0.01	1.34	0.78	0.23	
Pozo San Luis	54.37	28/5/2019 11:59	29/5/2019 20:59	0.91	0.06	1.40	0.78	2.13	1.90
	50.78	28/5/2019 12:01	29/5/2019 21:59	0.85	0.00	1.44	0.77	-0.03	
Río los Ausoles A	47.65	28/5/2019 13:51	30/5/2019 0:59	0.79	-0.05	1.48	0.76	-1.95	0.83
	49.17	28/5/2019 13:56	30/5/2019 1:59	0.82	-0.03	1.52	0.76	-1.03	
Río los Ausoles B	60.83	28/5/2019 14:06	30/5/2019 4:59	1.01	0.17	1.64	0.74	6.29	1.19
	58.32	28/5/2019 14:11	30/5/2019 5:59	0.97	0.12	1.68	0.74	4.74	
Fumarola El Playón	117.03	28/5/2019 13:55	30/5/2019 16:59	1.95	1.10	2.15	0.68	45.67	0.18
	116.10	28/5/2019 14:12	30/5/2019 17:59	1.94	1.09	2.18	0.67	45.28	
Río los Ausoles C	49.85	28/5/2019 14:26	30/5/2019 2:59	0.83	-0.02	1.54	0.76	-0.61	0.56
	48.83	28/5/2019 14:30	30/5/2019 3:59	0.81	-0.03	1.58	0.75	-1.25	

Tabla A-7: Datos correspondientes a la séptima campaña de muestreo.

PUNTO DE MUESTREO	CPM	FECHA Y HORA DE MUESTREO	FECHA Y HORA DE MEDICIÓN	CPS (Ra)	Rn	T (días)	D	AC (Bq/L)	DER
Fumarola El Sauce	84.32	4/6/2019 9:25	6/6/2019 12:22	1.41	0.56	2.14	0.68	23.08	2.30
	78.32	4/6/2019 9:40	6/6/2019 13:22	1.31	0.46	2.17	0.67	19.06	
Cashal Fuente	73.47	4/6/2019 10:18	6/6/2019 0:22	1.22	0.38	1.61	0.75	14.16	1.60
	69.58	4/6/2019 10:20	6/6/2019 1:22	1.16	0.31	1.65	0.74	11.81	
Cashal Fuente Caliente	56.92	4/6/2019 10:19	6/6/2019 4:22	0.95	0.10	1.77	0.72	3.92	0.10
	57.08	4/6/2019 10:22	6/6/2019 5:22	0.95	0.10	1.81	0.72	4.05	
Agua Shuca	Muestreo no realizado								
Apunia	58.53	4/6/2019 13:56	6/6/2019 2:22	0.98	0.13	1.54	0.76	4.75	0.87
	60.25	4/6/2019 13:58	6/6/2019 3:22	1.00	0.16	1.58	0.75	5.86	
Pozo Mirasol	53.92	4/6/2019 13:19	5/6/2019 22:22	0.90	0.05	1.40	0.78	1.86	0.87
	55.58	4/6/2019 13:21	5/6/2019 23:22	0.93	0.08	1.44	0.77	2.88	
Pozo Instituto Agrícola	49.48	4/6/2019 11:42	5/6/2019 20:22	0.82	-0.02	1.38	0.78	-0.81	0.73
	50.82	4/6/2019 11:44	5/6/2019 21:22	0.85	0.00	1.42	0.77	-0.01	
Pozo San Luis	55.32	4/6/2019 11:14	5/6/2019 18:22	0.92	0.07	1.32	0.79	2.66	0.11
	55.50	4/6/2019 11:17	5/6/2019 19:22	0.93	0.08	1.36	0.78	2.79	
Río los Ausoles A	48.83	4/6/2019 14:43	6/6/2019 6:22	0.81	-0.03	1.67	0.74	-1.27	0.83
	50.35	4/6/2019 14:48	6/6/2019 7:22	0.84	-0.01	1.71	0.73	-0.31	
Río los Ausoles B	62.37	4/6/2019 15:05	6/6/2019 10:22	1.04	0.19	1.82	0.72	7.50	0.49
	61.25	4/6/2019 15:08	6/6/2019 11:22	1.02	0.17	1.86	0.71	6.82	
Fumarola El Playón	86.98	4/6/2019 14:56	6/6/2019 14:22	1.45	0.60	2.00	0.70	24.26	4.31
	98.65	4/6/2019 15:24	6/6/2019 15:22	1.64	0.80	2.02	0.69	32.23	
Río los Ausoles C	46.88	4/6/2019 15:25	6/6/2019 8:22	0.78	-0.07	1.73	0.73	-2.53	1.06
	48.83	4/6/2019 15:28	6/6/2019 9:22	0.81	-0.03	1.77	0.73	-1.29	

Tabla A-8: Datos correspondientes a la octava campaña de muestreo.

PUNTO DE MUESTREO	CPM	FECHA Y HORA DE MUESTREO	FECHA Y HORA DE MEDICIÓN	CPS (Ra)	Rn	T (días)	D	AC (Bq/L)	DER
Fumarola El Sauce	92.82	19/6/2019 9:33	21/6/2019 13:53	1.55	0.70	2.20	0.67	29.25	0.39
	91.62	19/6/2019 10:07	21/6/2019 14:53	1.53	0.68	2.22	0.67	28.51	
Cashal Fuente	70.22	19/6/2019 9:38	21/6/2019 21:53	1.17	0.32	2.53	0.63	14.34	0.16
	69.73	19/6/2019 9:44	21/6/2019 22:53	1.16	0.31	2.57	0.63	14.07	
Cashal Fuente Caliente	55.87	19/6/2019 10:02	22/6/2019 1:53	0.93	0.08	2.68	0.61	3.83	0.33
	55.18	19/6/2019 10:05	22/6/2019 2:53	0.92	0.07	2.72	0.61	3.32	
Agua Shuca	77.25	19/6/2019 10:44	21/6/2019 17:53	1.29	0.44	2.32	0.66	18.80	0.65
	75.5	19/6/2019 10:48	21/6/2019 18:53	1.26	0.41	2.36	0.65	17.68	
Apunia	57.08	19/6/2019 11:14	21/6/2019 23:53	0.95	0.10	2.55	0.63	4.63	0.37
	57.77	19/6/2019 11:19	22/6/2019 0:53	0.96	0.12	2.59	0.63	5.18	
Pozo Mirasol	51.28	19/6/2019 13:25	21/6/2019 17:53	0.85	0.01	2.21	0.67	0.31	0.11
	51.07	19/6/2019 13:27	21/6/2019 18:53	0.85	0.00	2.25	0.67	0.16	
Pozo Instituto Agrícola	52.63	19/6/2019 13:53	20/6/2019 15:08	0.88	0.03	1.07	0.82	1.02	0.16
	52.32	19/6/2019 13:56	20/6/2019 16:08	0.87	0.02	1.11	0.82	0.85	
Pozo San Luis	56.35	19/6/2019 11:44	20/6/2019 13:08	0.94	0.09	1.08	0.82	3.13	1.33
	53.72	19/6/2019 11:45	20/6/2019 14:08	0.90	0.05	1.12	0.82	1.65	
Río los Ausoles A	48.02	19/6/2019 14:49	22/6/2019 3:53	0.80	-0.05	2.57	0.63	-2.10	1.09
	50.03	19/6/2019 14:53	22/6/2019 4:53	0.83	-0.01	2.60	0.62	-0.60	
Río los Ausoles B	62.78	19/6/2019 15:06	21/6/2019 19:53	1.05	0.20	2.22	0.67	8.35	1.14
	60.3	19/6/2019 15:10	21/6/2019 20:53	1.01	0.16	2.26	0.66	6.66	
Fumarola El Playón	93.38	19/6/2019 15:00	21/6/2019 15:53	1.56	0.71	2.06	0.69	28.88	3.12
	84.88	19/6/2019 15:30	21/6/2019 16:53	1.41	0.57	2.08	0.69	23.19	
Río los Ausoles C	49.07	19/6/2019 15:22	22/6/2019 5:53	0.82	-0.03	2.63	0.62	-1.33	1.69
	46.03	19/6/2019 15:25	22/6/2019 6:53	0.77	-0.08	2.67	0.62	-3.64	

Anexo B: Ejemplos de Cálculo para la Cuantificación de la Actividad de Gas Radón en Muestras de Agua y Patrones de Referencia.

En la Tabla A-5 se presentan los datos experimentales obtenidos en el laboratorio concernientes a la quinta campaña de muestreo para el cálculo de la actividad de ^{222}Rn en muestras de agua para consumo humano. A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo para obtener la actividad de ^{222}Rn concerniente al punto de muestreo denominado “El Cashal”.

i. Datos experimentales:

$$V_a = 10 \text{ mL}$$

$$CF = 3.5667$$

$$CPM_{\text{muestra}} = 77.18 \text{ min}^{-1}$$

$$CPS_{\text{blanco}} = 0.8473 \text{ min}^{-1}$$

ii. Tasa de conteo de la muestra:

$$R_a = CPS = CPM * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 77.18 \text{ min}^{-1} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 1.286 \text{ s}^{-1}$$

iii. Tasa de conteos netos (R_n):

$$R_n = (1.286 - 0.8473) \text{ s}^{-1} = 0.439 \text{ s}^{-1}$$

iv. Factor de corrección por decaimiento (D):

$$D = e^{\left(\frac{-0.693(T)}{t_{1/2}}\right)} = e^{[-0.693(1.683)/3.82]} = 0.737$$

v. Cálculo para actividad de Radón:

$$AC = \frac{R_n}{(CF)(D)(V_a)} = 0.439 \text{ s}^{-1} / (3.5667)(0.737)(0.01L) = 16.70 \text{ Bq/L}$$

Ejemplo de cálculo para actividad de Radón (AC) del patrón NIST-01 del primer duplicado de la réplica:

i. Datos experimentales (véase la Tabla 3.2):

$$V_a = 10 \text{ mL}$$

$$CF = 3.5667 \frac{\text{s}^{-1}}{\text{Bq}}$$

$$CPM_{\text{muestra}} = 269.23 \text{ min}^{-1}$$

$$CPS_{\text{blanco}} = 0.8473 \text{ min}^{-1}$$

ii. Tasa de conteo de la muestra:

$$R_a = CPS = CPM * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 269.23 \text{ min}^{-1} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 4.487 \text{ s}^{-1}$$

iii. Tasa de conteos netos (R_n):

$$R_n = (4.487 - 0.8473) \text{ s}^{-1} = 3.640 \text{ s}^{-1}$$

iv. Factor de corrección por decaimiento (D):

$$D = e^{\left(\frac{-0.693(T)}{t_{1/2}}\right)} = e^{[-0.693(0.1458)/3.82]} = 0.9739$$

v. Cálculo para actividad de Radón:

$$\overline{AC} = \frac{R_n}{(CF)(D)(V_a)} = 3.640 \text{ s}^{-1} / (3.5667)(0.9739)(0.01 \text{ L}) = \mathbf{104.79 \text{ Bq/L}}$$

Anexo C: Espectros de Gas Radón (^{222}Rn) y su Progenie en Muestras de Agua y Patrón NIST-01

A continuación, se presentan diferentes espectros de gas Radón obtenidos durante el análisis de muestras de agua superficial y de vapor condensado de fumarola de la zona hidrotermal El Playón en Ahuachapán, obtenidos del software SpectraView del equipo de centelleo líquido TRICARB 2100 TR. Así también, se muestran en las Figuras C-1 y C-2 los espectros de gas Radón en una de las réplicas de la solución patrón NIST-01 y de un blanco (fondo) respectivamente, utilizados en la Calibración y Estandarización del método ASTM D5072-09 (2016).

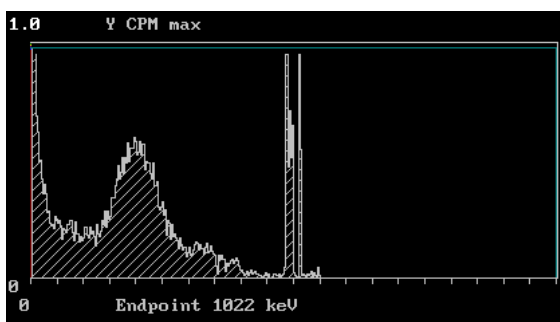


Figura C-1: Calibración solución patrón NIST-01

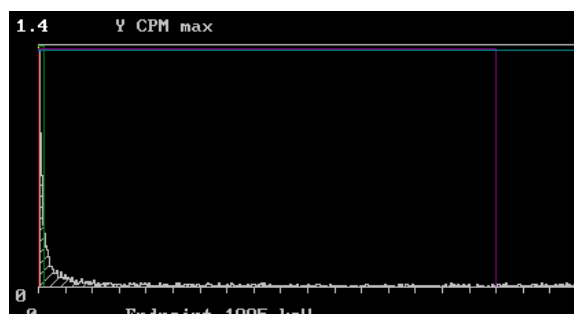


Figura C-2: Blanco para la sección de Calibración de método ASTM

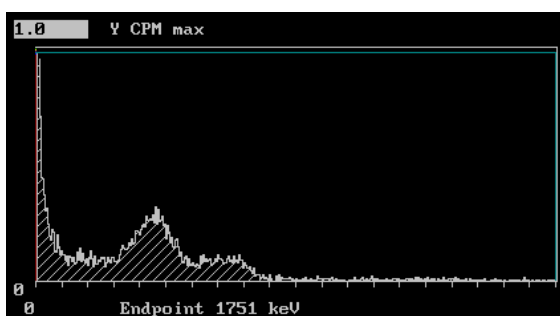


Figura C-3: Jornada 4, Fumarola El Playón

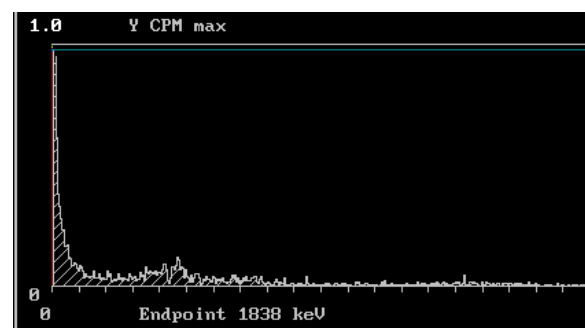


Figura C-4: Jornada 5, Fuente Apunia

Anexo D: Metodología en el Uso del Programa IBM SPSS Utilizado en el Análisis Estadístico

a) Análisis por Componentes Principales

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

- i.** El primer paso que se realizó en el ACP es la matriz de correlaciones con cada la significación de cada componente. Las variables que presentaron factores comunes, son las que están muy correlacionadas entre sí.
- ii.** Luego se realizó las medidas y contrastes estadísticos la cual permiten indicar la idoneidad de la técnica, si las variables no estuvieron suficientemente interconectadas entre si no tiene sentido aplicar ACP.
- iii.** Posteriormente se construye la tabla de comunalidades las cuales explican la proporción de su varianza del modelo factorial obtenida.
- iv.** Luego se realizó la tabla de varianza total que explica los porcentajes de varianza explicada asociadas a cada variable, la cual permite observar el número de variables que explican la mayor parte de variabilidad de set datos. Los valores 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.
- v.** Se obtiene la gráfica de sedimentación, la cual tiene el mismo propósito que la varianza total explicada, la cual permite observar el número de variables que explican la mayor parte de variabilidad de los datos y cuales valores no son significativos.
- vi.** Y finalmente, se realizó la matriz de componentes la cual permite expresar cada una de las variables originales mediante los factores extraídos. Para ver qué variables que se agrupan en cada una de las componentes (factor) obtenidas y cuales están correlacionadas entre sí.

b) Correlación lineal

Para este análisis se hizo uso del programa IBM SPSS. Los pasos para la obtención de la correlación lineal son los siguientes:

- i.** Se elaboró la tabla de correlaciones, la cual indica la proporción de la correlación entre la variable dependiente y las variables independientes.

c) Regresión lineal múltiple

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

- i.** Como primer paso se realizó la tabla resumen del modelo, el coeficiente de determinación obtenido en el modelo es un valor que indica la proporción de variabilidad de la variable dependiente explicado por el modelo de las variables independientes.
- ii.** Luego se obtuvo la prueba de análisis de varianza, estima si la relación global entre la variable dependiente y las variables independientes es significativa.
- iii.** Y finalmente se realizó la tabla de Coeficientes, la cual presenta los valores de coeficientes estandarizados, no estandarizados y la significancia de las variables evaluadas, con el fin de describir la ecuación del modelo lineal múltiple y la influencia que aporta cada una de las variables.

Anexo E: Precipitación Diaria Acumulada en Milímetros, Cinco Días Antes de la Toma de Muestras (2019)

Tabla E-1: Precipitación diaria acumulada en milímetros cinco días antes de día de muestreo, datos de la estación meteorológica. Ahuachapán (año 2019).

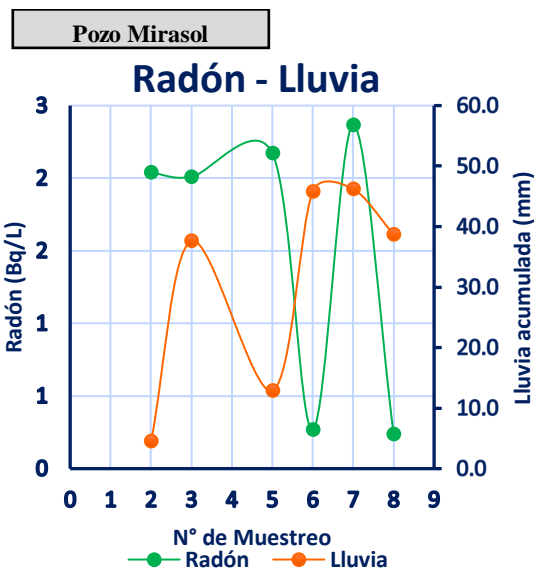
No DE MUESTREO	PRECIPITACIÓN DIARIA ACUMULADA POR DÍA EN MILÍMETROS						TOTAL mm
	30/03/19	31/03/19	1/04/19	2/04/19	3/04/19	4/04/19	
1	0	0	0	0	0	0	0
2	19/04/19	20/04/19	21/04/19	22/04/19	23/04/19	24/04/19	4.5
	0	0	0	0	0	4.5	4.5
3	2/05/19	3/05/19	4/05/19	5/05/19	6/05/19	7/05/19	
	16.8	0	19.0	0	0	1.8	37.6
5	17/05/19	18/05/19	19/05/19	20/05/19	21/05/19	22/05/19	
	2.0	1.9	0	7.0	2.0	0	12.9
6	23/05/19	24/05/19	25/05/19	26/05/19	27/05/19	28/05/19	
	0	18.0	0	0	0	27.8	45.8
7	30/05/19	31/05/19	1/06/19	2/06/19	3/06/19	4/06/19	
	12.2	5.7	0.7	0	0	27.6	46.2
8	14/06/19	15/06/19	16/06/19	17/06/19	18/06/19	16/06/19	
	20.0	0	0	18.0	0	0.7	38.7

Fuente: MARN, 2019

Referencia:

MARN. (2019). Resolución MARN-OIR 308-2019. Portal de Transparencia. Recuperado de: <https://www.transparencia.gob.sv>

a)



b)

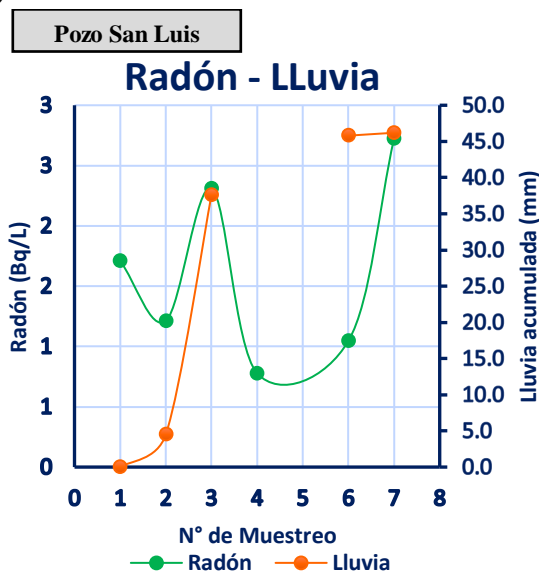
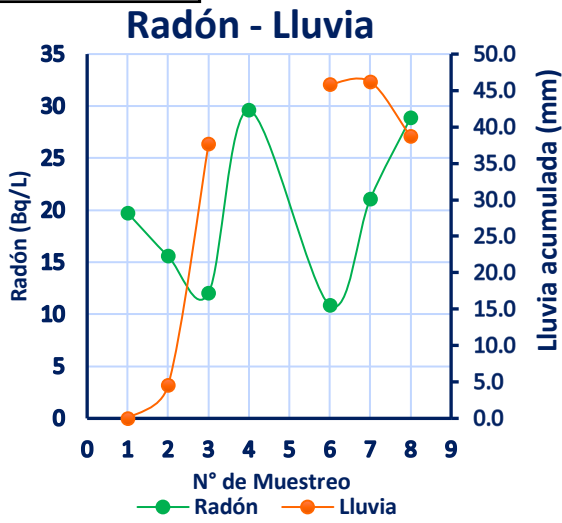


Figura E-1: Gráfico concentración de gas Radón en agua versus precipitación acumulada a) Pozo Mirasol b) Pozo San Luis. Continúa.

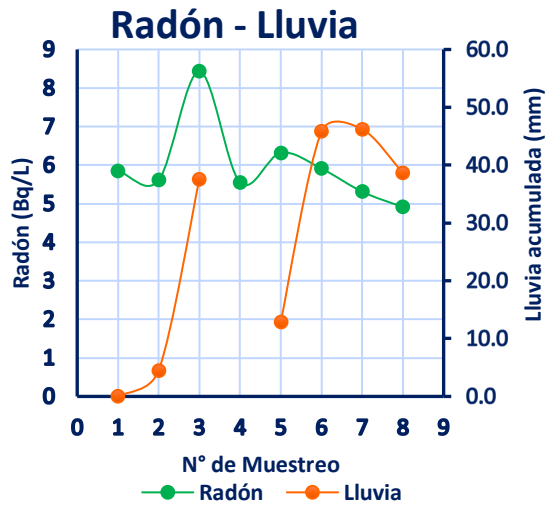
c)

Fum. El Sauce



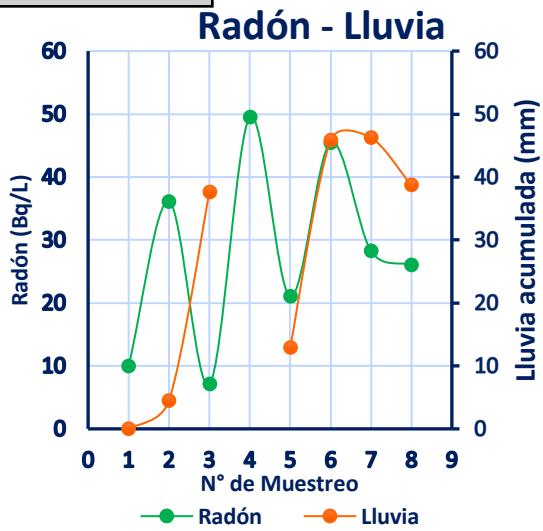
d)

Apunia



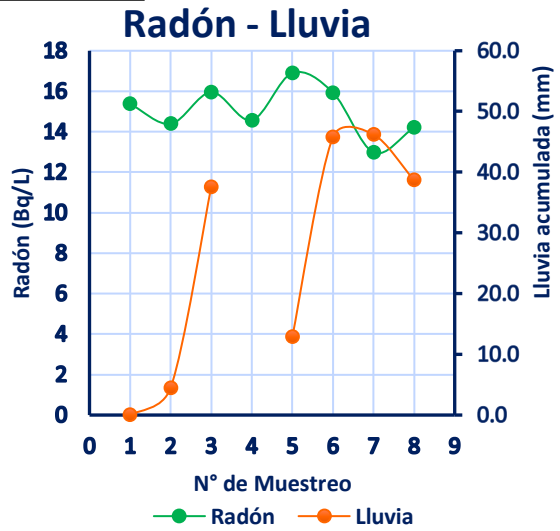
e)

Fum. El Playón



f)

Cashal



Continuación Figura E-2: Gráficos concentración de gas Radón en agua versus precipitación acumulada. c) Fumarola El Sauce, d) Apunia, e) Fumarola El Playón, f) El Cashal.

Anexo F: Mapa Hidrológico de Ahuachapán

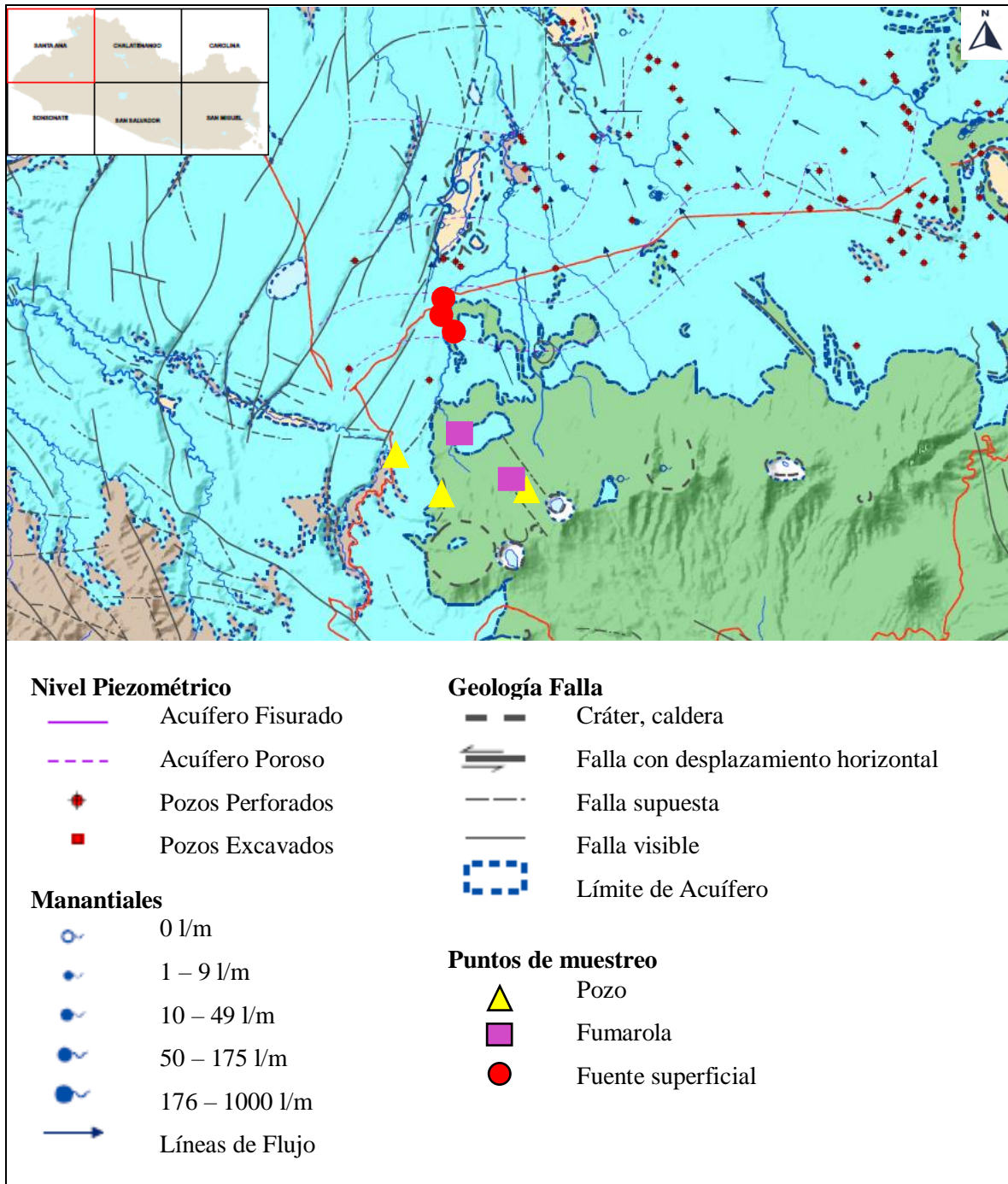


Figura F-1: Mapa hidrogeológico de Ahuachapán con la ubicación de los puntos de muestreo.

Referencia:

UCA, UPES y UAE. (2 de octubre de 2019). *Mapa Geológico de la República de El Salvador, Zona Occidental*. Recuperado de: <http://www.anda.gob.sv/descargables/>

Leyenda hidrogeológica

Acuífero Volcánico Fisurado de Gran Extensión y Posiblemente Alta Producción

Esta unidad la constituyen, principalmente, rocas volcánicas de carácter andesítico y basáltico, con ciertas intercalaciones de materiales piroclásticos. Entre las rocas volcánicas se pueden distinguir flujos y coladas de lavas que provienen de los centros de erupción volcánica. Dichos materiales pueden presentar conductividades hidráulicas de medianas a altas, como consecuencia de su porosidad secundaria (fallamiento existente).

Acuífero Volcánico Fisurado de Extensión Limitada y Productividad Media

Esta unidad la constituyen, principalmente, rocas volcánicas de carácter andesítico y basáltico, con ciertas intercalaciones de materiales piroclásticos. Entre las rocas volcánicas se pueden distinguir flujos y colados de lavas que provienen de los centros de erupción volcánica de la zona. Dichos materiales pueden presentar conductividades hidráulicas de medianas a altas, como consecuencia de su prosidad secundaria (fallamiento existente).

Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media

Los materiales de esta unidad consisten principalmente en materiales piroclásticos aglomerados y retrabajados (pómez, lapillo, tobas), teniendo una distribución granulométrica que varía de fina a gruesa. Las conductividades hidráulicas pueden variar de medianas a bajas, como consecuencia al grado de cementación o compactación que pueden tener los granos de los materiales que la constituyen. Esta unidad puede tener más de 50 m de espesor.

Acuíferos Locales de Extensión Limitada y de Productividad Mediana a Baja

Esta unidad está constituida, básicamente, por sedimentos aluviales (arenas, gravas, etc.) que han sido transportados por los ríos, desde la parte alta de los cerros hasta la planicie. El espesor de estos materiales puede superar los 15 m.

Acuíferos Locales Generados por Sistemas de Fallas

Esta unidad la constituyen, principalmente, rocas volcánicas de carácter andesítico y basáltico, distinguiéndose flujos y coladas de lavas que provienen de procesos tectónico-volcánicos originados en la zona. La manifestación de esta unidad se da por el afloramiento de manantiales que posteriormente contribuyen a la generación del caudal base de los sistemas de escorrentía superficial de la zona.

Unidad Rocas No Acuíferas

Flujos macizos de lavas, intercalados con tobas aglomeradas y brechosas, lahares cementados.

Anexo G: Mapa Sísmico de El Salvador de Abril a Julio de 2019

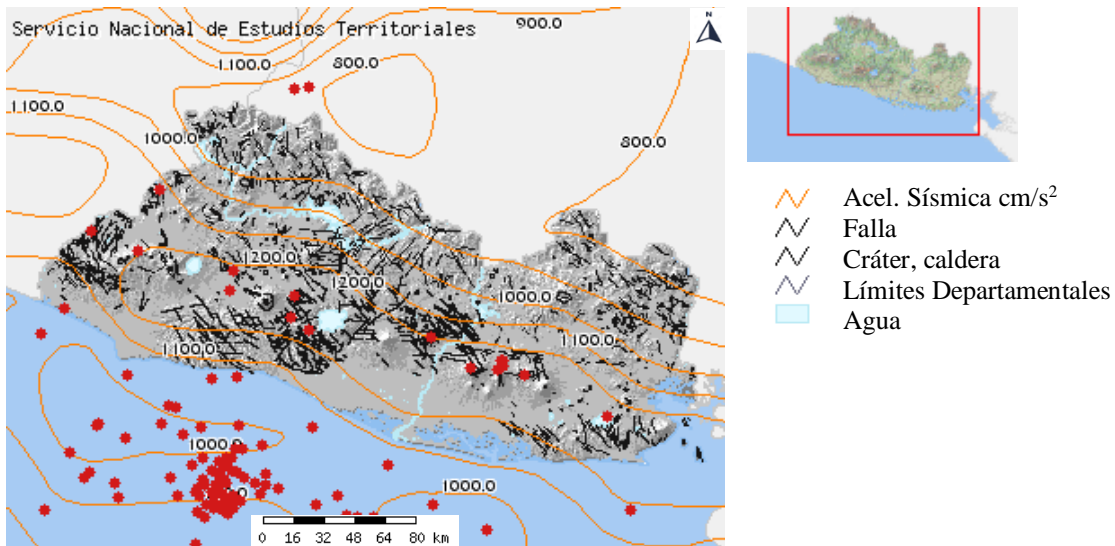


Figura G-1: Mapa sísmico de El Salvador (periodo del 01/04/2019 hasta 30/06/2019). Cada punto rojo representa un movimiento telúrico. (SNET, 2019)..

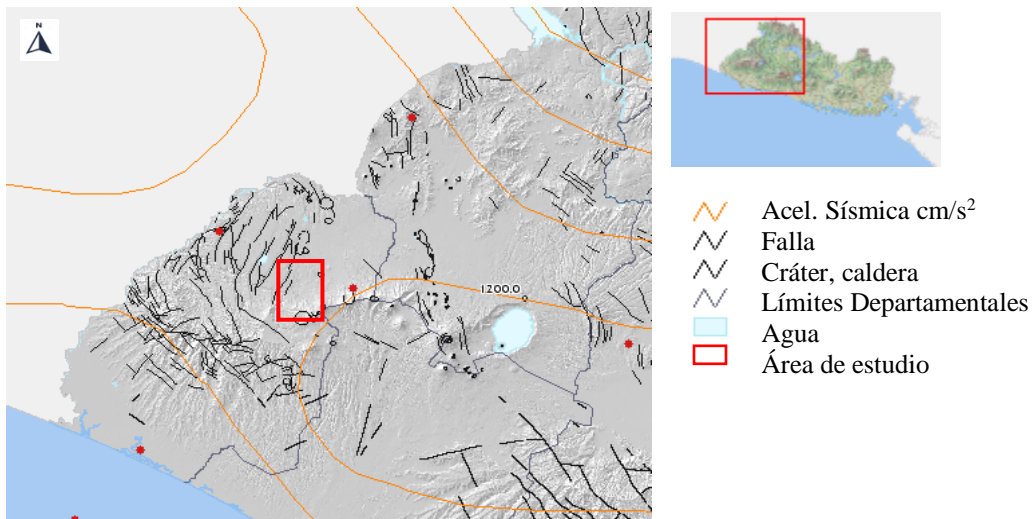


Figura G-2: Mapa sísmico de la zona Occidental de El Salvador (periodo del 01/04/2019 hasta 30/06/2019). Cada punto rojo representa un movimiento telúrico. (SNET, 2019).

Referencia:

Servicio Nacional de Estudios Territoriales. (24 de septiembre de 2019). *Mapa Sísmico de la República de El Salvador, Zona Occidental*. Recuperado de: <http://mapas.snet.gob.sv/geologia/sismicidad>.

Tabla G-1: Parámetros de los sismos percibidos en el departamento de Ahuachapán.

Fecha	Hora local	Latitud N(°)	Longitud W(°)	Localización	Prof. (km)	Mag-nitud	Intensidad
May 18, 2019	06:34	13.703	-90.481	Frente a la costa de Guatemala. A 50 km al oeste de Barra de Santiago.	56.13	3.8	II en Ahuachapán
May 17, 2019	20:03	13.2087	-90.267	Frente a la costa de Ahuachapán. A 60 km al suroeste de Barra de Santiago.	53.35	4	II en Ahuachapán
May 16, 2019	10:22	12.7048	-88.0337	Frente a costas de La Unión. A 59 km al sur de Playa Las Tunas.	36.7	5.9	IV en San Miguel
May 14, 2019	05:49	13.4022	-90.2335	Frente a la costa de Ahuachapán. A 40 km al suroeste de Barra de Santiago.	26.29	3.8	II en Ahuachapán
May 04, 2019	10:14	13.6192	-90.099	Frente a la costa de Ahuachapán. A 12 km al suroeste de Barra de Santiago.	75.86	4.3	II en Ahuachapán
Abr 30, 2019	17:25	13.9877	-89.9192	En munic. de Ahuachapán.	1.75	2.9	II en Ahuachapán
Abr 15, 2019	03:26	13.9163	-89.7491	En munic. de Atiquizaya, Ahuachapán. A 10 km al este de Ahuachapán.	5	3.5	III en Atiquizaya
Abr 13, 2019	21:32	13.7078	-90.0177	En munic. de Jujutla, Ahuachapán. A 1 km al noroeste de Barra de Santiago.	94.25	4.3	II en Ahuachapán
Abr 12, 2019	01:55	13.0005	-90.3317	Frente a la costa de Ahuachapán. A 81 km al suroeste de Playa Los CÑ ³ banos.	34.95	4.3	II en Ahuachapán
Abr 11, 2019	00:49	14.1337	-89.6752	En munic. de Candelaria de la Frontera, Santa Ana. A 20 km al noroeste de Santa Ana.	4.92	3.1	III en Candelaria de La Frontera
Abr 08, 2019	15:56	13.527	-90.2735	Frente a la costa de Guatemala. A 33 km al suroeste de Barra de Santiago.	70.36	4.1	II en Ahuachapán

Fuente: SNET

Referencia:

Servicio Nacional de Estudios Territoriales, SNET. (24 de septiembre de 2019). *Mapas*

SNET. Recuperado de: http://mapas.snet.gob.sv/geologia/consulta_sismos.

Anexo H: Mapas de Concentración de Gas Radón en Muestras de Agua, Ahuachapán.



Figura H-1: Puntos de muestreo en la zona de El Playón y río Cashalate, Ahuachapán.

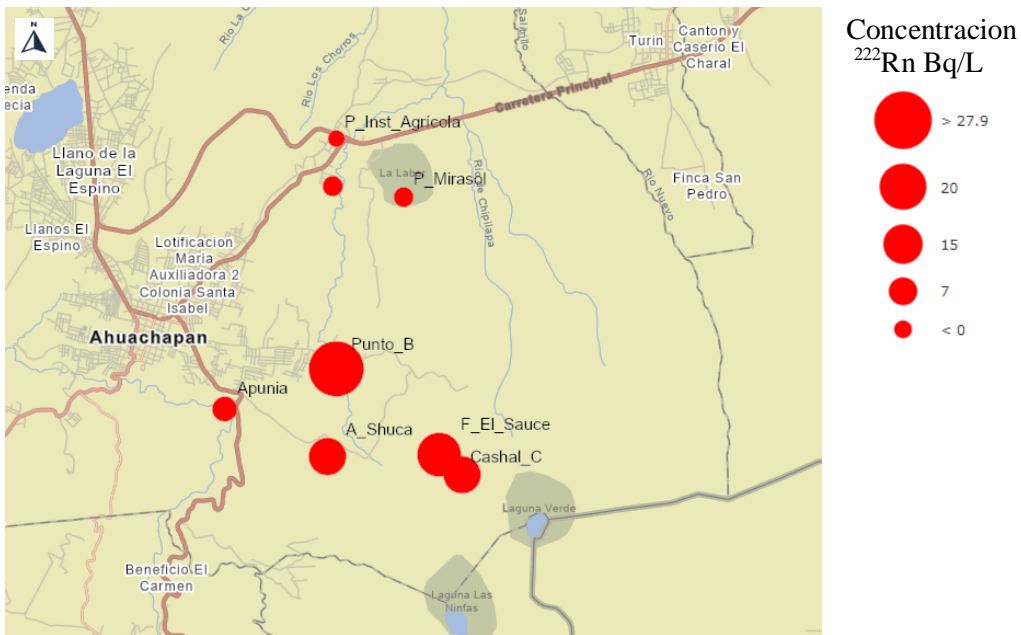


Figura H-2: Mapa de concentración de gas Radón en los puntos de muestreo, Ahuachapán.

Anexo I: Muestreo de Vapor Condensado de Fumarola y Agua Superficial



Figura I-1: Sistema: condensado de fumarola.



Figura I-2: Ampolla de dos salidas.



Figura I-3: Muestreo fumarola El Playón.



Figura I-4: Viales de centelleo líquido.



Figura I-5: Toma de muestra de agua superficial.



Figura I-6: Toma de muestra de agua superficial para análisis fisicoquímico.