



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**“DETERMINACIÓN DE GAS RADÓN Y MERCURIO  
COMO CONTAMINANTES DISPERSOS EN EL  
SUELO EN LA REGIÓN DE LA SIERRA GORDA  
SAN JOAQUÍN, QUERÉTARO”**

## **T E S I S**

PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

**NORMA ANGÉLICA HINOJO ALONSO**

TUTOR

DR. ANATOLY KOTSARENKO (CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM)

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

DR. GUILLERMO ESPINOSA GARCIA (INSTITUTO DE FÍSICA, UNAM)

DR. JUVENTINO MARTÍNEZ REYES (CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM)

DR. GILVERTO HERNÁNDEZ SILVA (CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM)

CAMPUS JURQUILLA, UNAM, AGOSTO 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## AGRADECIMIENTOS

A **DIOS** por darme esperanza, fortaleza y voluntad para cumplir mis metas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haberme otorgado una beca para estudios de doctorado.

A la Universidad Autónoma de México por darme una oportunidad de cumplir un sueño y ser parte de la comunidad estudiantil y superarme académicamente.

Al Dr. Juventino Martínez Reyes, que siempre me demostró el apoyo académico y moral para el término de esta investigación.

Al Dr. Gilberto Hernández Silva por el apoyo con el tema de mercurio.

Al Dr. Guillermo Espinosa García por las correcciones y sugerencias para la mejora de la tesis.

Al Dr. Anatoly Kotsarenko asesor de tesis, por su paciencia y enseñanzas del radón.

Al Dr. Carlos Mendoza porque siempre me alentó a terminar este proyecto.

A Marta Pereda asistente del Posgrado de Ciencias de la Tierra, porque siempre amablemente me apoyo en cada trámite durante estancia estudiantil.

A mí estimado y querido amigo Dr. Sergio Martínez Trinidad porque siempre conté con su apoyo, conocimiento y aliento para terminar ésta tesis.

A mis amigas: Tere Loera, Conchita, Georgina Buendía, Rosario Jiménez por todo el apoyo brindado y amistad sincera.

A mis compañer@s y amig@s del centro de geociencias: Idaly, Ieni, Paola Botero, Paulina Patiño, Marisol Cano, Gildardo, José Luis Farfán, Eduardo, Juan José Martínez Reyes, Javier, Francisco (el profe), Marielena, Jorge, Gianluca, Martín Tanner, Mike por los buenos momentos y enseñanzas en geología.

# DEDICATORIA

Dedico este trabajo a:

A mis padres **Felipe Hinojo y Hermelinda Alonso** por brindarme su amor, apoyo y su confianza **LOS AMO**.

Con **CARIÑO** a mis hermanos y hermanas, sobrín@s; Porque sin duda son mí Fortaleza y La Mayor Riqueza que Dios me ha dado.

Con **NOSTALGIA** a mi hermana **AMELIA**, porque ella inicio con migo este proyecto, pero desafortunadamente ella perdió la batalla. Siempre te llevo en mi corazón y en mis recuerdos **GRACIAS** por todas tus enseñanzas y ser mi compañera, amiga de mis locuras. †

Con **ALEGRIA** a dos excelentes amigas que dejaron huella, Nelly Rincón (Nella) y Olivia Beltrán por su gran Calidez Humana y Apoyo Incondicional en los momentos más complicados de ésta etapa de mi vida. Gracias por los buenos momentos que compartimos.

Con **AMOR** para un hombre excepcional que llevo a mi vida cuando menos lo esperaba pero si cuando más lo necesitaba Ernesto A. Guillén Y. Gracias por tu apoyo incondicional. Eres parte de este proyecto, no tengo palabras para expresar toda tu bondad.

# ÍNDICE

Índice	Páginas
<b>Resumen</b>	
<i>Introducción</i>	1
<i>Objetivos</i>	3
<i>Hipótesis</i>	4
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>1.1. Área de estudio</b>	5
<b>1.2 Marco geológico San Joaquín</b>	5
<b>1.3. Suelo</b>	10
<b>1.4 Contaminantes</b>	13
<b>CAPITULO 2 RADÓN (<sup>222</sup>Rn)</b>	
<b>2. El Radón (<sup>222</sup>Rn)</b>	14
<b>2.1 Decaimiento del radón y algunos isótopo</b>	15
2.1.1. Emanación de radón	17
2.1.2. Transporte de radón	18
<b>2.2 Radiactividad</b>	20
<b>2.3 Antecedentes</b>	21
2.3.1 Investigaciones previas	21
<b>2.4 Metodología</b>	24
2.4.1 Características de detectores <sup>222</sup> Rn	24
2.4.2 Técnica de medición con detectores scout	26
2.4.2.1 Pruebas de medición en laboratorio	27
2.4.2.1.1 Medición de aire	27
2.4.2.1.2 Actividades de campo	27
2.4.2.2.1 Medición de suelos	28

2.4.3 Técnica de medición de $^{222}\text{Rn}$ con Monitor RTM1688-2	28
2.4.3.1 Actividades de campo	29
2.4.3.1.1 Medición de suelos	30
2.4.3.1.2 Medición de agua	31
<b>2.5 Resultados</b>	<b>32</b>
<i>2.5.1 Mediciones de suelos con detectores scout</i>	32
<i>2.5.2 Perfil en Agua de Venado con scout y monitor RTMM1688-2</i>	34
2.5.3 Estudio ambiental intramuros con monitor RTMM1688-2	37
2.5.3.1 Mediciones primer periodo con monitor RTMM1688-2	37
2.5.3.2 Mediciones con detectores scout primer período	38
2.5.3.3 Mediciones segundo período con monitor RTMM1688-2	40
2.5.3.4 Mediciones del segundo período con detectores scout	40
2.5.4 Validación de calibración de detectores scout	42
2.5.5 Validación de calibración de monitor RTMM1688-2	44
2.5.5.1 Pruebas de mediciones en el laboratorio	44
<i>2.5.6 Relación de concentración de <math>^{222}\text{Rn}</math> con respecto a la geología de la zona de estudio</i>	45
<i>2.5.7 Con un modelo teórico se determinó la velocidad de los gases en el subsuelo mediante las variaciones de la concentración de gas radón</i>	47
2.5.7.1 Aplicación del método utilizando datos de campo	50
<b>CAPITULO 3 Mercurio</b>	
<b>3. Mercurio derivado de cinabrio</b>	<b>53</b>
<b>3.1 Propiedades del mercurio</b>	<b>53</b>
<b>3.2 Ciclo del mercurio</b>	<b>54</b>
3.2.1 Distribución de mercurio	55
3.2.2 Mercurio en suelos	55
<b>3.3 Antecedentes</b>	<b>56</b>
<b>3.4 Metodología</b>	<b>57</b>

3.4.1 Selección de lugares de muestreo	57
3.4.2 Actividades de campo de muestreo de suelos	57
3.4.3 Actividades de laboratorio	58
<b>3.5 Medición de mercurio total (AMA-254)</b>	<b>58</b>
3.5.1 Funcionamiento del equipo AMA-254	59
<b>3.6 Software</b>	<b>60</b>
<b>3.7 Resultados y Discusión</b>	<b>61</b>
3.7.1 Concentración de mercurio total en suelo	62
3.7.2 Propiedades químicas	63
3.7.2.1 pH	64
3.7.2.2 Materia orgánica	66
3.7.2.3 Carbón Orgánico	68
3.7.2.4 Capacidad de intercambio catiónico	69
3.7.3 Propiedades físicas	70
3.7.3.1 Textura de suelos	70
<b>3.8. Estadística</b>	<b>71</b>
<b>3.9 Conclusiones Rn-Hg</b>	<b>72</b>
<b>CAPÍTULO 4 Referencias Bibliográficas</b>	
<b>4.1 Bibliografía</b>	<b>75</b>

# INDICE DE FÍGURAS

Índice	Página
Figura 1. Zona de estudio	5
Figura 2. Provincias fisiográficas que ocupan el territorio del estado de Querétaro	6
Figura 3. Imagen radar de la Sierra Gorda queretana en la región del Distrito Minero de San Joaquín	7
Figura 4. Carta geológica de la Sierra Gorda queretana entre los ríos Extórax y Moctezuma (Martínez-Reyes et al., 2009). Abajo: sección estructural a través de la región del Distrito minero de San Joaquín (tomada de la Carta Geológico-Minera San Joaquín (F14-C58) a escala 1: 50 000. Servicio Geológico Mexicano, 1998, 2ª edición)	8
Figura 5. Perfil de suelos y horizontes que lo constituyen	11
Figura 6. Desintegración de radón. (Karunakara et al., 2005.)	15
Figura 7. Procesos de generación y migración del suelo	18
Figura 8. Representación de procesos de emanación de $^{222}\text{Rn}$ hacia la superficie	19
Figura 9. Detector SARAD-SCOUT	27
Figura 10. Foto 1. Superficie del suelo escavado y colocación del equipo	28
Figura 11. Foto 2. Monitor RTM1688-2	29
Figura 12. Foto 2. Mediciones de radón con monitor	30
Figura 13. Foto 3. Excavación – introducción - subcción	30
Figura 14. Foto 4. Midiendo Rn en suelos con monitor	31
Figura 15. Foto 5. Medición de agua con monitor	31
Figura 16. Gráficos de concentración de $^{222}\text{Rn}$ con detectores scout	33
Figura 17. Gráfica de mediciones de $^{222}\text{Rn}$ en suelos en Ranas y Agua de Venados	34
Figura 18. Sitio Agua de Venado, anomalía de $^{222}\text{Rn}$ . Imagen google earth	35
Figura 19. Gráficos de distribución de concentraciones de $^{222}\text{Rn}$ en el perfil agua de venado con scout	36
Figura 20. Gráfico de distribución de mediciones de $^{222}\text{Rn}$ las minas El Otatal y Calabacillas con monitor	37
Figura 21. Gráficas de medición de $^{222}\text{Rn}$ con equipos scout. Primer período	39
Figura 22. Gráfica de promedios del primer periodo con scout	39

Figura 23. Gráficas de medición de $^{222}\text{Rn}$ con equipos scout. segundo período	41
Figura 24. Gráfico de medición de $^{222}\text{Rn}$ con equipos scout de casa Moy. Agua de Venado. segundo período	41
Figura 25. Gráfica de promedios del primer periodo con scout	42
Figura 26. Calibración de equipos scout	43
Figura 27. Medición de radón en observatorio	43
Figura 28. Medición de 5 equipos scout	44
Figura 29. Grafica de calibración de monitor	45
Figura 30. Mapa geológico con puntos de muestreo con scout y monitor <i>RTM1688-2</i>	45
Figura 31. Concentración de radón de la mina El Rincón, se presenta la gráfica con tendencia de datos calculados con el método de media móvil para un período de 12 días en lapsos de 1 hora	51
Figura 32. Concentración de radón del sitio Agua de Venado, se presenta la gráfica con tendencia de datos calculados con el método de media móvil para un período de 12 días en lapsos de 1 hora	51
Figura 33. Diagrama de flujo de mercurio post (a) y pre (b) era industrial (Mason et al., 1994)	55
Figura 34. Esquema de los componentes del equipo AMA-254	59
Figura 35. Mapa y sitio de localización de suelos muestreados para Hg total	62
Figura 36. Distribución y estadística descriptiva de la concentración del mercurio total en suelos	63
Figura 37. Distribución y estadística descriptiva de la concentración del mercurio total con pH	65
Figura 38. Distribución y estadística descriptiva de la concentración del mercurio total con M.O	67
Figura 39. Distribución y estadística descriptiva de la concentración del mercurio total con CO	69
Figura 40. Distribución y estadística descriptiva de la concentración del mercurio total con CIC	70
Figura 41. Estadística descriptiva general de la textura y el contenido de mercurio total. Mapa de distribución de los diferentes diámetros de partículas de suelos.	71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades atómicas y físicas de Rn. (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2004)	14
Tabla 2. Constante de difusión de diferentes medios (Taner, 1965)	16
Tabla 3. Concentraciones de $^{238}\text{U}$ y $^{232}\text{Th}$ rocas (Núñez-Lagos)	17
Tabla 4. Datos de medición de $^{222}\text{Rn}$ de los equipos scout	32
Tabla 5. Datos de perfil en Agua de Venado con scouts	35
Tabla 6. Datos del perfil de medición de $^{222}\text{Rn}$ en minas Otatal y Calabacillas con monitor RTM1688-2	36
Tabla 7. Mediciones de radón con monitor en período junio del 2010	38
Tabla 8. Mediciones de $^{222}\text{Rn}$ con espectrómetro en periodo febrero del 2011	40
Tabla 9. Parámetros utilizados para la medición de mercurio total	59
Tabla 10. Sitios de muestreo de suelos	61
Tabla 11. Resultados de estadística de Pearson de las propiedades físicas y químicas con mercurio total en suelos	72

## RESUMEN

El suelo desempeña diversas funciones como medio filtrante, amortiguador y transformador de sustancias diversas; es hábitat de miles de organismos. El suelo puede llegar a contaminarse por la aportación de metales pesados debido a las actividades antropogénicas como la minería. La zona minera de la región de San Joaquín, Querétaro ha sido explotada desde épocas prehispánicas hasta épocas recientes, permaneciendo a la intemperie, los terreros o jales extraídos de las minas. Este hecho ha producido la liberación de Hg al ambiente, contaminando los sistemas terrestres de la región, convirtiéndose en riesgo para la salud de sus habitantes. Por otro lado, debido a que en la zona de estudio existe un sistema de fallamiento, el gas radón puede emanar fácilmente por estas fracturas y podría existir contaminación por este gas. En esta investigación se presenta el estudio de las concentraciones de dos elementos químicos (radón y mercurio) en suelos del Distrito Minero de San Joaquín, Querétaro.

### RADÓN

En los últimos años se ha hecho evidente que existe contaminación natural debido a las altas concentraciones de gas radón que emanan del interior de la tierra, generando altas dosis de radiactividad. Sitios con poca ventilación sirven como lugar de acumulación del elemento y por lo tanto, puede aumentar la dosis efectiva de radiactividad sobre los organismos de los residentes de la región.

Uno de los objetivos principales de este trabajo fue implementar técnicas de detección de radón con equipos de monitoreo continuo Scout y monitor RTM1688-2, con el fin de estimar el rango de respuesta y comportamiento de los equipos, así como evaluar las concentraciones de gas Rn obtenidas. Inicialmente se midió la concentración de radón en algunas minas abandonadas del Distrito Minero de San Joaquín, donde se creó un ambiente de flujo de aire constante, observando variaciones a diferentes tiempos. Posteriormente se realizaron mediciones de  $^{222}\text{Rn}$  en intramuros y suelos de la comunidad Agua de Venado empleando las técnicas ya mencionadas. También se realizaron mediciones en muestras de agua de consumo local. Se presentan las bases físicas de la radiación que son empleadas para medir la concentración de  $^{222}\text{Rn}$ , se describen las características y el comportamiento del radón para comprender el origen y obtener información de su concentración. Se emplearon dos metodologías diferentes: con el equipo de monitoreo continuo scout y monitor RTM1688-2.

Se encontraron emanaciones de  $6000\text{ Bq/m}^3$  en suelo de la comunidad Agua de Venado con el equipo scout. Debido a esta anomalía que se registró, se realizó un perfil de mediciones de ( $^{222}\text{Rn}$ ) en los alrededores de esta comunidad con detectores scout, registrando valores altos de ( $^{222}\text{Rn}$ ) en dos sitios georeferenciados cuyos valores fueron  $7651\text{ Bq/m}^3$  y  $4742\text{ Bq/m}^3$ . Posteriormente se realizó una evaluación ambiental intramuros en 5 casas de la comunidad Agua de Venado. En este estudio intramuros se midió el ( $^{222}\text{Rn}$ ) en suelos y agua con scout y monitor RTM1688-2 en dos períodos diferentes. Los resultados indican que en la casa 3, la concentración de ( $^{222}\text{Rn}$ ) fue la más alta en los dos periodos en las muestras de suelo y agua. Se encontraron concentraciones elevadas en la zona de estudio, sobrepasando el límite de emanación de  $^{222}\text{Rn}$  permitido, según la agencia de protección del medio ambiente EPA, con un valor de  $148\text{ Bq/m}^3$  en aire para casa habitación. Estas comunidades presentan una exposición alta de este gas, lo que puede ocasionar un serio problema de salud. Las concentraciones que registraron los equipos scout y monitor RTM1688-2, mostraron valores que van de  $60000$  a  $180\text{ Bq/m}^3$ , estos resultados pueden deberse a las diferentes características geológicas del

subsuelo, ya que se reportan algunas anomalías gravimétricas en la región. Se concluye que los detectores scout y monitor RTM1688-2 son una herramienta confiable para futuras investigaciones y que se pueden utilizar como técnicas rápidas de medición de radón ya que tienen una velocidad de integración rápida.

## **MERCURIO**

La toxicidad del mercurio está directamente relacionada con su estado químico; es un metal pesado, muy tóxico, ya que produce daño al sistema nervioso central, perturbaciones del comportamiento y lesiones renales. El objetivo fue evaluar las concentraciones de mercurio total en los suelos de la región y obtener indicios de una posible contaminación ambiental por este elemento químico. Para esta evaluación se hizo una revisión bibliográfica de la geología de la zona. Se tomaron 61 muestras de suelo para su análisis con base en la Norma oficial Mexicana Nmx-AA-132-SCFI-2006. Todos los sitios muestreados fueron georeferenciados; además, se realizaron algunos análisis fisicoquímicos de suelos. La concentración de mercurio total se determinó con un equipo AMA-254. Se realizó también un análisis de estadística descriptiva general así como un análisis de coeficiente de correlación de Pearson.

Los resultados indican que existen concentraciones importantes de Hg y (<sup>222</sup>Rn). La mayor concentración de Hg que se encontró fue en el sitio Las Ovejas con 2000 mg/kg y la menor concentración que se encontró fue en Loma de Guadalupe (0.27 mg/kg). El pH en suelos varía de 6.2 a 7.95 considerando la mayoría como básicos o neutros, con excepción al sitio 31 (Pozos) con pH de 4.22. El porcentaje mayor de carbón orgánico corresponde al mismo sitio Pozos con 24.4% y la menor fue de 0.17 % en Santa Rita. El 92% de los suelos poseen un contenido bajo de materia orgánica, mientras que en el 8% restante, el contenido de materia orgánica es alto. El valor de CICT mayor es para el sitio El Otatal con un valor de 122 y un valor menor de 7.59 que corresponde a Santa Rita. La mayor parte de las muestras de suelo presentan granulometría franca; los sitios El Socavón, Azogues, Tierras Coloradas, La Frontera, La Zahuda, El Huizacal, Campo Alegre, Los Arteaga, Los Pericos, San Joaquín y La Cañada presentan una textura arcillosa. Algunas concentraciones de mercurio total obtenidas en suelos del Distrito Minero de San Joaquín, son consideradas como altas, según la NOM-147, ya que sus valores llegan hasta los 2000 mg/kg. Con el análisis estadístico y la correlación de Pearson, se demostró que no existe ninguna correlación del mercurio con respecto a las propiedades físico-químicas.

Las propiedades físico-químicas afectan al comportamiento y disponibilidad del mercurio en el suelo; el pH propicia una baja movilidad y adsorción del mercurio en los suelos. Los altos contenidos de materia orgánica retienen al mercurio en los suelos. Los mapas de distribución indican que las concentraciones más altas de mercurio se ubican al noreste; los valores de pH que van de ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos; las cantidades altas de materia orgánica están distribuidas al noreste-noroeste; los valores altos de carbón orgánico se localizan en el centro; los valores de capacidad de intercambio catiónico muestran una distribución homogénea y los valores altos de arcilla se encuentran en el centro y sur oeste de la zona de estudio.

## **Palabras clave**

Radón, mercurio, suelos, contaminación ambiental, San Joaquín, México.

# ABSTRACT

Soil has different functions such as a filter, a shock absorber a transformer; it is the habitat of thousands of organisms. Soil may get contaminated because of the presence of heavy metals due to anthropogenic activities such as mining. The mine zone in the region of San Joaquín, Querétaro, was exploited in past decades, producing a high degree of Hg; therefore, residues of this element contaminated ground systems of this region, turning into possible health risks. As San Joaquín geologically has a fractured system, radon gas can get the surface easily through these fractures and possibly can contaminate the soil. This research presents the study of the concentration of these two chemical elements (radon and mercury) in the soil of the Mining District of San Joaquín, Querétaro.

## RADON

In recent years it has become apparent that there is natural pollution generating high doses of radioactivity by high concentrations of radon gas which emanate from inside the earth. Sites with poor ventilation serves as a radon gas accumulation and thus increase the effective dose of radioactivity on living organisms. One of the main objectives of this research was to implement radon detection techniques with continuous monitoring equipment and monitor Scout RTM1688-2, in order to estimate the range of response and behavior of the equipment as well as evaluating Rn gas concentrations obtained. Initially radon concentrations in some abandoned mines Mining District San Joaquin were measured which created an atmosphere of constant airflow and some variations at different times were noted. Subsequently measured for  $^{222}\text{Rn}$  in intramural and community soils in Agua de Venado using the aforementioned techniques. Measurements were also performed on samples of local water suppliers.

We present the physical basis of radiation, which are used to measure the concentration of  $^{222}\text{Rn}$ .- They describe the characteristics and behavior of radon to understand the origin and obtain information on their concentrations. We used two different methods: with continuous monitoring equipment and monitor scout RTM1688-2. 6000 emissions were found in soil Bq/m<sup>3</sup> Agua de Venado community with scout team. Due to this anomaly that occurred, we performed measurements profile of  $^{222}\text{Rn}$  around this community with scout detectors recorded high values of  $^{222}\text{Rn}$  in two georeferenced sites whose values were 7651 and 4742 Bq/m<sup>3</sup> Bq/m<sup>3</sup>. Subsequently a intramural environmental assessment to 5 homes in the community of Agua de Venado . In this study was measured intramural of  $^{222}\text{Rn}$  in soil and water to scout and monitor RTM1688-2 in two different periods. The results indicate that in the house 3, concentration of  $^{222}\text{Rn}$  was higher in the two periods in soil and water samples

Elevated concentrations in the study area, exceeding the limit allowed by  $^{222}\text{Rn}$  emanation of agency environmental protection EPA with a value of 148 Bq/m<sup>3</sup> in air to household. These communities have exposure to this gas which can cause serious health problem. The concentrations recorded scout and monitor equipment RTM1688-2, showed values ranging from 60000-180 Bq/m<sup>3</sup>, these results may be due to the different subsurface geological features, as reported some gravity anomalies in the region. Is concluded that the monitor detectors and RTM1688 scout-2 are a reliable tool for future research and that can be used as rapid techniques for measuring radon and having a fast integration speed.

## MERCURY

Mercury toxicity is directly related to the chemical state; it is a heavy metal and is highly toxic; it causes central nervous system damage, behavioral disturbances and kidney damage. The objective was to assess total mercury concentrations in soils of the region and obtain indications of possible environmental contamination by this chemical element. For this evaluation a literature review of the geology of the area was done. A set of 61 soil samples for analysis based on the Mexican Official Standard Nmx-AA-132-SCFI-2006 was taken. All sampled sites were georeferenced; in addition, some soil physicochemical characteristics were analyzed. The total mercury concentration was measured with an AMA-254. It also conducted a general descriptive statistical analysis and an analysis of the Pearson correlation coefficient.

The results indicate that there are significant concentrations of Hg and <sup>222</sup>Rn. The place with the highest concentration of Hg was Las Ovejas with a value of 2000 mg/kg the lowest concentration found was in Loma de Guadalupe (0.27 mg/kg). The results for the pH in soils vary from 6.2 to 7.95 as considering most basic or neutral, except site 31 with pH of 4.22. The highest percentage of organic carbon corresponds to site Pozos with 24.4% and the lowest was 0.17% in Santa Rita. In the 92% of the samples the soil organic matter content is low, and the rest 8% the organic matter content is high. The value of higher CICT for the site El Otatal with a value of 122 and a lower value of 7.59 which corresponds to Santa Rita. Most of the soil samples have frank texture; El Socavón, Azogues, Tierras Coloradas, La Frontera, La Zahuda, El Huizacal, Campo Alegre, Los Arteaga, Los Pericos, San Joaquin and La Cañada sites have a clay texture. Some concentrations of total mercury in soils obtained Mining District San Joaquin, are considered high, according to NOM-147, as their values reach up to 2000 mg/kg. With the statistical analysis and the Pearson correlation showed that there is no correlation of mercury with respect to physicochemical properties.

The physicochemical properties affect the behavior and availability of mercury in the soil, the pH favors low mobility and adsorption of mercury in soils. The high organic matter contains retain mercury in soils. The distribution maps indicate that the highest concentrations of mercury are located to the northeast; pH values ranging from slightly acidic to slightly alkaline, high amounts of organic matter are distributed to the northeast-northwest, the high values of organic carbon located in the center and the values of cation exchange capacity show a homogeneous distribution and high clay values are in the center and south west of the study area.

**Key words:** Radon gas, mercury, soils, environmental pollution, San Joaquin, Mexico.

## INTRODUCCIÓN

Los contaminantes dispersos se caracterizan por ser sustancias dañinas al medio ambiente, modificando características originales de los diferentes medios como es el caso del suelo. Éste es un cuerpo natural, tridimensional, no consolidado, producto de la interacción de factores formadores del suelo (clima, rocas, organismos, relieve, tiempo). Está compuesto por sólidos (material mineral y orgánico), líquidos y gases, que se mezclan para formar los horizontes o capas diferenciadas, resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia a través del tiempo, y cuyo espesor puede ir desde la superficie terrestre hasta varios metros de profundidad (Sposito 1989 citado en Volke et al., 2005). Tiene diversas funciones en nuestro entorno actuando como medio filtrante, amortiguador y transformador, donde se realizan ciclos biogeoquímicos. El suelo puede contaminarse por procesos antropogénicos o naturales.

La zona minera de San Joaquín, Querétaro lugar donde se desarrolla este trabajo, se ha caracterizado por la explotación del cinabrio (HgS). De acuerdo a estudios arqueológicos, se conoce que la explotación del cinabrio en San Joaquín tuvo inicios desde el siglo III a.C. (Herrera, 1985), su aplicación era para usos decorativos y rituales; dicha explotación se continuó en la época colonial y se prolongó hasta el siglo XX. En los años 60's, San Joaquín se colocó como primer productor a nivel nacional de mercurio (Geological Mining Monograph of State of Querétaro, 1992). Desde hace 10 años la producción de Hg en la región fue prohibida, lo que produjo el cese a la actividad minera dejando minas abandonadas ocasionando contaminación a el medio ambiente y un posible riesgo ambiental.

Las aportaciones de contaminantes químicos a los suelos y especialmente la referida a metales pesados, se ha asociado entre otras, a las actividades mineras; México posee una rica historia en yacimientos minerales. La génesis del mercurio en el Municipio de San Joaquín, Qro. ha sido relacionada directamente con el magmatismo cenozoico. La mineralización se manifiesta a través de yacimientos de tipo hidrotermal, casi siempre en el entorno de los cuerpos intrusivos que allí afloran. La mena de mercurio, aparece en la naturaleza como sulfuro de mercurio (HgS) o cinabrio. Este mineral se aloja en fallas y fracturas formando vetas, de donde se deduce que la mineralización ha sido controlada por un factor geológico de tipo tectónico-estructural. Las vetas de cinabrio que están encajonadas preferentemente en las formaciones carbonatadas del Cretácico Inferior, son acompañadas por minerales de ganga como la calcita y el cuarzo, por lo que existe también un factor geoquímico de tipo sílice-carbonato que parece controlar la mineralización del mercurio en la región de San Joaquín (Martínez-Reyes et al., 2009).

La tradición minera en el país se remonta a la época prehispánica, con la explotación de yacimientos ubicados principalmente en las zonas de Taxco, Pachuca, Guanajuato y Querétaro. En la Sierra Gorda la presencia del cinabrio y azogue (o mercurio nativo) propició que sus habitantes desarrollaran técnicas mineras y metalúrgicas. La producción de éste en la región fue variable durante la época prehispánica. Las minas resultaron irregulares ya que su desarrollo era definido por la misma formación geológica; sin embargo, fueron perfectamente

estables “como lo prueba el hecho de que tantas y tantas obras mineras están aún abiertas desde hace 10, 20 o más siglos en esta sierra” (Cuapio et al., 2004).

El impacto de la minería sobre el ambiente y la salud, se relaciona con la composición química y concentración del mineral que se está extrayendo. En el caso del mercurio se conoce que ingresa al suelo bajo la forma de mercurio metálico, puede llegar a oxidarse hasta la forma divalente ( $\text{Hg}^{2+}$ ), una vez que el mercurio es oxidado, interactúa con la superficie de los suelos a través de las reacciones de adsorción, acomplejamiento entre otros, a fin de producir las diferentes especies geoquímicas (Carrasquero y Adams, 2003). Las especies de mercurio difieren grandemente en sus propiedades, pero todas son tóxicas.

El mercurio es un elemento muy dañino para la salud pública y el medio ambiente; es relativamente raro en la corteza de la tierra y es liberado por procesos naturales tales como la erosión y vulcanismo así como por la minería. Debido a la actividad antropogénica, el mercurio puede causar deterioro en los ecosistemas, dañando las tierras de cultivo, contaminando cuerpos de agua, así como el ingreso y la acumulación del metal en la cadena alimenticia. (Gochfeld, 2003).

Por otro lado, el  $^{222}\text{Rn}$  es un compuesto radioactivo que procede de la desintegración del radio ( $^{226}\text{Ra}$ ); a la vez se origina la desintegración del uranio ( $^{238}\text{U}$ ). El  $^{222}\text{Rn}$  puede entrar al medio ambiente a través del suelo, por minas de uranio y fosfato o por la combustión de carbón. Una parte del radón que se encuentra en el suelo se moverá a la superficie y entrará en el aire a través de la evaporación. Cualquier espacio que contenga altas concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  se considera como riesgo a la salud.

Existen diferentes fenómenos geofísicos, geoquímicos, erupciones volcánicas donde el gas radón puede emanar; también del subsuelo, a través de fisuras creadas por las fallas geológicas (Quindós et al., 1992) o por las corrientes subterráneas de agua (Singh et al., 1984). Existen otros factores que originan una mayor emisión de radón como son los substratos, la permeabilidad del suelo, la presión atmosférica (a menor presión atmosférica corresponde una mayor emanación) y la estación del año (existe mayor emanación durante el verano) (Rowe et al., 2002).

El comité científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2001) dictaminaron que las cantidades permisibles de  $^{222}\text{Rn}$  promedio para casas habitación, es de  $148 \text{ Bq/m}^3$ . La concentración máxima permisible en agua de pozo es  $11 \text{ Bq/m}^3$ . La Comunidad Europea recomienda que las viviendas de nueva construcción tengan niveles de radón inferiores a  $200 \text{ Bq/m}^3$ , mientras que el nivel de actividad recomendado para viviendas ya existentes es de  $400 \text{ Bq/m}^3$ .

Numerosas mediciones de emanación de  $^{222}\text{Rn}$  registradas en San Joaquín sobre pasan el límite; en lo que respecta a las cantidades detectadas de mercurio total en suelos rebasa la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1 2004.

La contaminación de suelos se asocia con la entrada de sustancias que, a partir de una cierta concentración, deben considerarse como no deseable. El suelo puede contener una gran variedad de elementos químicos, por lo que puede parecer difícil establecer a partir de qué momento, un mismo elemento deja de ser beneficioso o nocivo para establecerse en la categoría de contaminante. Para determinar la amplitud y naturaleza de un sitio contaminado, se debe caracterizar el sitio mediante actividades de muestreo y análisis; esto proveerá las bases para adquirir la información técnica necesaria para desarrollar, proyectar, analizar y seleccionar técnicas de limpieza más apropiadas. La caracterización se realiza en etapas, debido a que su principal objetivo es la toma de decisiones basadas en información existente (Volke et al., 2005). En este sentido, la caracterización de los suelos con metales, resulta ser fundamental para entender el comportamiento de los contaminantes así como la influencia que ejercen tanto en el desarrollo del suelo como en la interacción de este recurso con otros elementos del ecosistema, como por ejemplo la población bacteriana del suelo. (Huerta, 2010) Por lo tanto, es necesario llevar a cabo una caracterización de suelos de la región minera de San Joaquín Qro., ya que si bien se sabe de la existencia de mercurio tanto por la formación geológica del lugar como por la actividad minera, las propiedades físicas y químicas de estos suelos pueden arrojar datos importantes en cómo está afectando al ambiente.

## OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo fue determinar las concentraciones de mercurio total y gas  $^{222}\text{Rn}$  por separado en la región mineralizada de San Joaquín, Qro, considerándolos como contaminantes dispersos y valorar las bases para determinar si existe contaminación ambiental y posibles riesgos de salud pública.

### Objetivo particulares

- Correlacionar los factores físico-químicos evaluados con la concentración de mercurio total en suelos.
- Desarrollar mapas de distribución del Hg y Rn así como de las características físicas y químicas del suelo consideradas como fundamentales.
- Implementar una técnica de detección de  $^{222}\text{Rn}$  con los equipos y monitor RTM1688-2 para que las mediciones se realicen en campo y obtener una respuesta rápida de la variación de concentración con respecto al tiempo y que sea eficiente.
- Iniciar con la consolidación de datos de mercurio, radón para evaluarlos y ver su origen.
- Que éste estudio se utilice como apoyo para la comunidad de San Joaquín y observar los riesgos a la salud y a la contaminación ambiental que posiblemente puedan tener con la determinación de estos 2 elementos químicos.

## HIPÓTESIS

Para alcanzar el objetivo general de este trabajo se planteó la siguientes hipótesis: los elementos mercurio y radón en el Distrito Minero de San Joaquín tienen una posible similitud en su transporte a la superficie a través de las fallas y fracturas existentes en la zona, pero no existe ninguna correlación química o física entre estos dos elementos. Sin embargo, su presencia en el ambiente puede ser un riesgo a la salud, cuando existe la explotación del elemento mercurio y de diversos materiales en minería.

En el Distrito Minero de San Joaquín se encuentran localizadas varias minas de mercurio, por lo que se encontraran grandes concentraciones de mercurio total en suelos y posiblemente tendrán una correlación significativa con algunas propiedades físicas y químicas del suelo. También, en esta zona se han identificado fracturas geológicas y algunos intrusivos granodioríticos, que posiblemente sean las causas de las emanaciones del gas radón ( $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  y  $^{222}\text{Rn}$ ).

Este trabajo está dividido en **cuatro capítulos**

**Primer Capítulo:** Se describe la ubicación de la zona de estudio, la geología del San Joaquín, características edafológicas y definición de contaminante.

**Segundo Capítulo:** Se describe al ( $^{222}\text{Rn}$ ); conceptos básicos, comportamiento, generalidades, características, aplicaciones, metodología, puntos de muestreo, descripción de los métodos y monitor RTM1688-2, trabajo de campo, resultados – discusiones y conclusiones.

**Tercer Capítulo:** Se presentan generalidades, propiedades, distribución y abundancia del mercurio, suelos, metodología, trabajo de campo, puntos de muestreo, descripción del equipo AMA-254, análisis fisicoquímicos del suelo, resultados obtenidos y conclusiones.

**Cuarto Capítulo:** Referencias bibliográficas.

# CAPÍTULO I

## 1. 1 ÁREA DE ESTUDIO

La presente investigación se desarrolló en el municipio de San Joaquín, Querétaro que se localiza al centro este del Estado (Figura 1); se ubica a 92 km al noreste de la ciudad de Querétaro y abarca una superficie de 280 km<sup>2</sup> aproximadamente. Sus coordenadas geográficas son 21° 07' y 20 ° 53' de latitud norte, y 99° 22' y los 99° 39' de longitud oeste; se encuentra a una altura promedio de 2,440 metros sobre el nivel del mar. Con una elevación máxima de 3250 msnm y una mínima de 850 msnm.

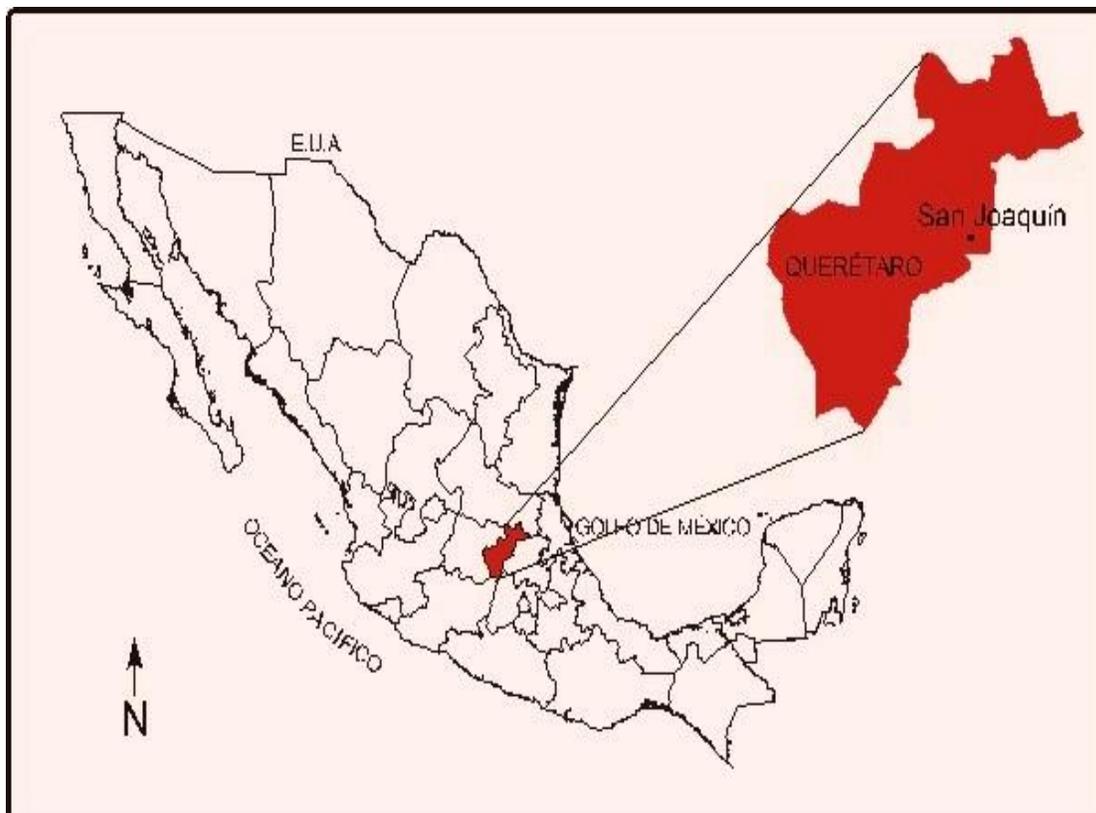


Figura 1. Zona de estudio.

## 1.2 MARCO GEOLÓGICO

El Distrito Minero de San Joaquín se localiza en la Sierra Gorda queretana. Forma parte de la Sierra Madre Oriental, unidad fisiográfica y geológica de alcance más regional que ocupa la mitad nororiental del territorio del estado de Querétaro (Figura 2).



Figura 2. Provincias fisiográficas que ocupan el territorio del estado de Querétaro.

La Sierra Madre Oriental es un rasgo orográfico formado por un macizo montañoso rugoso, angosto y alargado, con cumbres que sobrepasan los 2500 m sobre el nivel del mar. Surgió hace aproximadamente 65 Ma (millones de años), a finales del período Cretácico y principios del Paleógeno. Es el resultado del plegamiento y exhumación de rocas pertenecientes a secuencias de formaciones marinas de edades jurásicas y cretácicas. Es la consecuencia de la deformación tectónica producida durante la orogénesis laramídica (Orogenia Laramide) (Carbonel et al., 1970).

Las tres principales corrientes fluviales que cruzan la Sierra Gorda queretana forman parte de la cuenca del río Pánuco y corren por profundos cañones: al norte, el río Santa María que marca el límite entre los estados de San Luis Potosí y Querétaro; en la parte media, el río Extórax que une su caudal al río Moctezuma, el cual corre por la parte meridional de la región y marca el límite entre los estados de Querétaro e Hidalgo.

El Distrito Minero de San Joaquín se localiza hacia la parte más suroccidental de la Sierra Gorda queretana, entre los ríos Extórax al norte y Moctezuma al sur poniente (Figura 3).

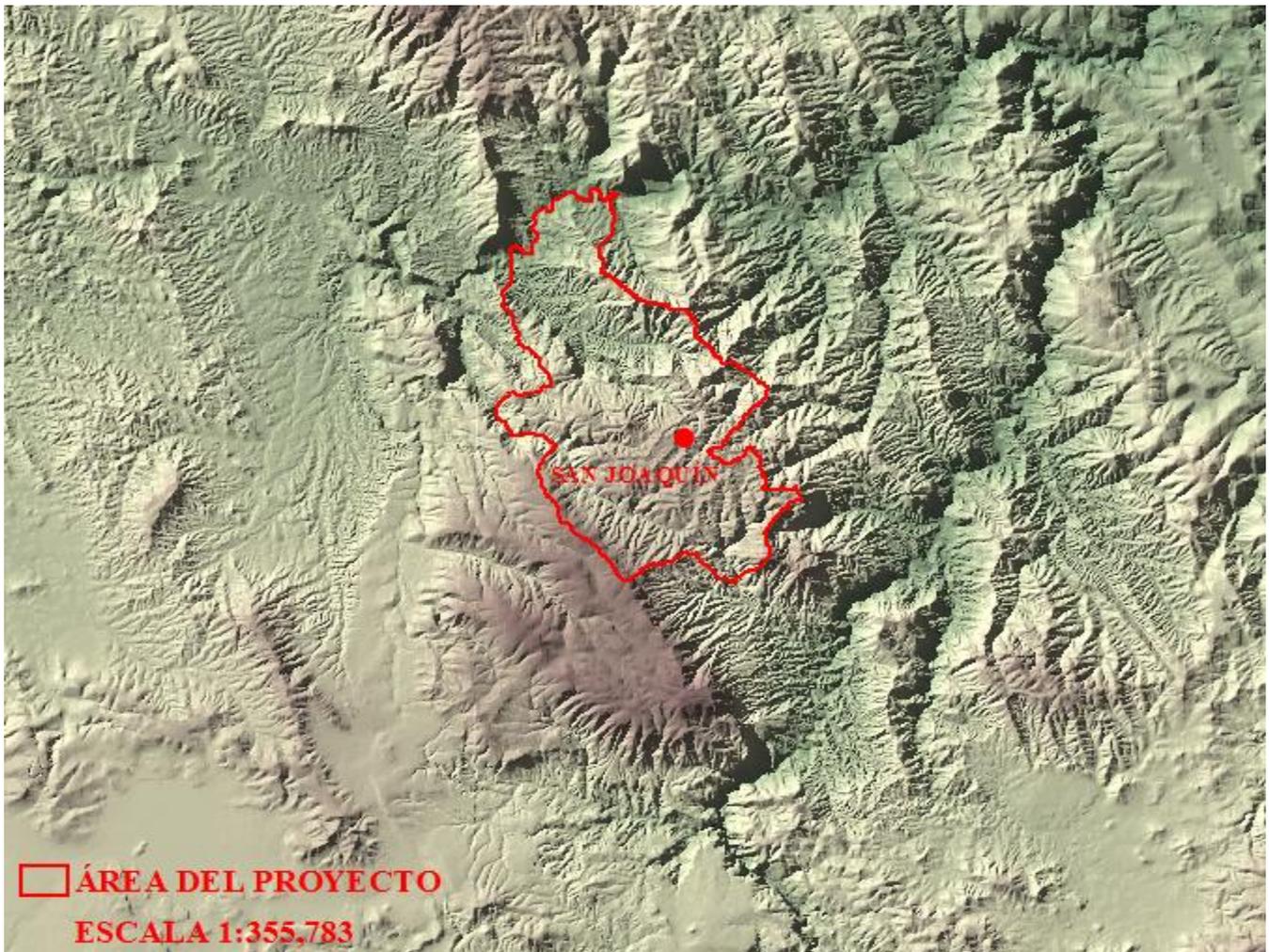


Figura 3. Imagen radar de la Sierra Gorda queretana en la región del Distrito Minero de San Joaquín (Hinojo 2008).

Como parte de la Sierra Madre Oriental, la Sierra Gorda queretana está formada geológicamente por el plegamiento de formaciones marinas cretácicas y jurásicas que forman estructuras tectónicas representadas por grandes anticlinales y sinclinales de orientación general Noroeste-Sureste. En la región que enmarca el Distrito Minero de San Joaquín (Figura 4) aparece la siguiente sucesión lito estratigráfica (Carrillo, 1983).

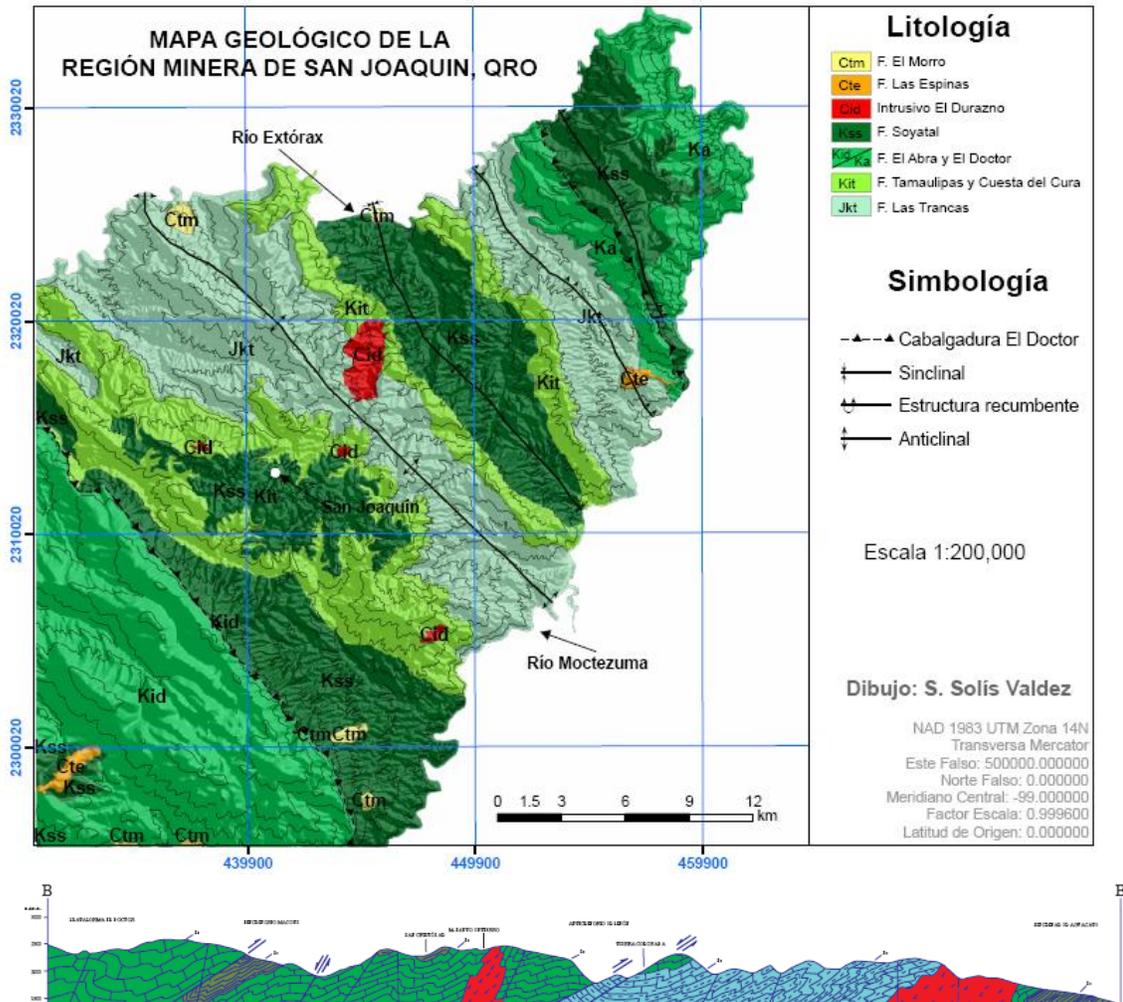


Figura 4. Carta geológica de la Sierra Gorda queretana entre los ríos Extórax y Moctezuma (Martínez-Reyes et al., 2009). Abajo: sección estructural a través de la región del Distrito Minero de San Joaquín (tomada de la Carta Geológico-Minera San Joaquín (F14-C58) a escala 1: 50 000. Servicio Geológico Mexicano, 1998, 2ª edición).

**La Formación Las Trancas (J-Kt).** Es la unidad estratigráfica más antigua que aflora en la región y aparece formando el corazón de las estructuras anticlinales. Está representada por facies pelítico-calcareas, calcáreo-arcillosas y volcanoclásticas. Se trata de calizas micríticas, lutitas, tobas y areniscas conglomeráticas. Representa un ambiente de cuenca marina con influencia de volcanismo el cual disminuye paulatinamente hacia el Este a favor de las facies calcáreo pelíticas. El contenido faunístico de esta formación incluye amonitas, radiolarios y esporas de diversos géneros y especies que en su conjunto han permitido asignarle una edad del Jurásico Superior (Kimmeridgiense)-Cretácico Inferior (Barremiano). Esta formación representa la base de la columna (Bernabe, 1994).

**Formación El Doctor (Kid) y Formación El Abra (Kia).** Estas unidades representan facies muy similares equivalentes en el tiempo; al oeste se les conoce como Formación El Doctor, mientras que al Este se les denomina Formación El Abra. Se trata de facies de plataforma marina representadas por bancos gruesos bien estratificados de calizas de grano fino que pueden cambiar a calcilutitas y calciruditas. El contenido tanto de microfauna (miliólidos, mayormente) como de macrofauna (rudistas principalmente) es abundante y ha permitido asignarles a estas rocas una edad del Albiano-Cenomaniano (Carrillo, 1983).

**Formación Tamaulipas (Kit) y Formación Cuesta del Cura (Kic).** Estas formaciones representan las facies de talud y cuenca respectivamente, equivalentes a las facies de plataforma de las formaciones El Doctor y El Abra. La Formación Tamaulipas está constituida por estratos de espesor variable de calizas arenosas y calizas brechoides con lentes o nódulos de pedernal; contiene abundante microfauna de calciesferúlidos y foraminíferos. La Formación Cuesta del Cura por su parte está constituida por una secuencia de estratos medianos a gruesos de calizas micríticas y arenosas separados por delgados niveles de lutitas; las bandas y lentes de pedernal son abundantes. Estas facies contienen numerosos radiolarios y foraminíferos cuyos géneros y especies han permitido asignarles, igual que a la Formación Tamaulipas, edades del Albiano-Cenomaniano.

**Formación Soyatal (Kss).** La formación Soyatal está representada por facies de cuenca marina calcareo-terrágenas que constituyen una secuencia de estratos delgados a medianos de calizas micríticas, calcarenitas, margas y lutitas. Encierra una fauna de rudistas y algas probablemente acarreados desde las formaciones de plataforma pre-existentes. Algunos gasterópodos y amonitas encontrados le asignan una edad del Turoniano (Carrillo, 1997).

Las formaciones anteriores representan los depósitos marinos mesozoicos, jurásicos y cretácicos. En el área de estudio sin embargo aparecen también rocas cenozoicas, aunque en proporciones muy escasas y afloramientos muy reducidos. Son rocas de naturaleza continental que se depositaron sobre las formaciones marinas mesozoicos deformadas y plegadas al final del Cretácico, por lo cual aparecen en discordancia angular.

Las rocas cenozoicas más antiguas reportadas en la región pertenecen a la **Formación El Morro (Ctm)**. En el área cartografiada solo quedan pequeños vestigios de esta unidad, representada por estratos de burda estratificación, bien consolidados de coloración rojiza compuestos de brechas cuya litología incluye clastos de diferentes tamaños, angulosos a subredondeados, de calizas, margas y lutitas empaquetados en una matriz arenosa cementada por carbonatos y sílice. Su edad ha sido considerada del Paleoceno-Eoceno.

Los vestigios de un magmatismo terciario en el área de estudio están representados por algunos cuerpos intrusivos de composición granodiorítica como el **Intrusivo El Durazno (Cid)** que es el más grande de ellos. Estos cuerpos están encajonados en las formaciones cretácicas y se les ha asignado una edad del Eoceno-Oligoceno. Otro vestigio de este magmatismo lo representan también los derrames de lavas andesítico-basálticas de la **Formación Las Espinas (Cte)** que forman pequeñas mesas y que son atribuidos al Mioceno. El magmatismo

terciario está íntimamente relacionado con la mineralización de la región (González y Carrillo, 1986).

Desde el punto de vista estructural los rasgos tectónicos más relevantes en la Sierra Gorda en la región del Distrito Minero de San Joaquín son los grandes pliegues anticlinales y sinclinales que a la escala regional tienen una orientación general NW-SE. Tienen su origen durante la Orogenia Laramide (Cretácico superior-Paleoceno) cuyos efectos son también el origen de grandes fallas inversas, como es el caso de la cabalgadura El Doctor.

Después de los efectos de plegamientos y cizallamientos de la deformación laramídica, la tectónica terciaria se hace sentir en esta parte de la Sierra Gorda, a través de un fallamiento de tipo normal en diversas direcciones acompañado de un intenso fracturamiento. Este régimen tectónico terciario conjuntamente con el activo magmatismo de la época, favorecieron el emplazamiento de cuerpos intrusivos y el volcanismo presentes en la región (Carillo, 1989).

La mineralización del Distrito Minero de San Joaquín tiene relación directa con los fenómenos tectónicos y magmáticos cenozoicos, a través de los diversos procesos hidrotermales que han sido propuestos para explicar la génesis del mercurio y demás yacimientos minerales de la región (Consejo de Recursos Minerales, 1992).

La Sierra Gorda Queretana pertenece a la Sierra Madre Oriental y en ella se encuentra ubicado el municipio de San Joaquín, está conformada por una serie de cadenas montañosas paralelas con dirección noroeste-sureste, principalmente de rocas calizas, formadas por antiguos lechos marinos durante el Jurásico y el Cretácico, y la intrusión de rocas ígneas en etapas tardías, que dieron origen a los yacimientos minerales en la sierra (Mérida, 1988).

### **1.3 SUELO**

El suelo es la parte superficial de la litósfera; es un medio multifacético constituido por una mezcla variable de partículas minerales, materia orgánica, solución acuosa y un medio gaseoso. El suelo es considerado como uno de los recursos naturales más importantes, de ahí la necesidad de mantener su productividad, para que a través de él y las prácticas agrícolas adecuadas se establezca un equilibrio entre la producción de alimentos y el acelerado incremento del índice demográfico (Linn et al., 1982). Gracias al soporte que constituye el suelo es posible la producción de los recursos vegetales, por lo cual es necesario comprender las características físicas y químicas para propiciar la productividad y el equilibrio ambiental adecuados sustentabilidad) (Tan, 1993). El suelos se constituye por capas llamadas horizontes en lo que se describen perfil edáfico.

#### **El perfil edáfico**

Es la capa del suelo paralela a la superficie del terreno, con características más ó menos bien definidas que se han producido a través de la operación de los procesos de formación del suelo. Cada capa difiere de la superior y de la inferior en algunas características. Las propiedades más accesibles para establecer los horizontes de un suelo son color, textura y

estructura. La naturaleza química y la sucesión de los diferentes horizontes para caracterizar un suelo se clasifican en seis horizontes H, O, A, E, B, C, R.

### Tipos de horizontes

- H.** Acumulaciones de materia orgánica sin descomponer (>20-30%), saturados en agua por largos períodos.
- O.** Capa de hojarasca sobre la superficie del suelo (sin saturar agua; >35%), frecuente en los bosques.
- A.** Formado en la superficie, con mayor % materia orgánica (transformada) que los horizontes situados debajo. Típicamente de color gris oscuro, negro, pero en función del contenido de materia orgánica.
- E.** Horizonte de fuerte lavado. Típicamente situado entre un A y un B. Con menos arcilla y óxidos de Fe y Al que el horizonte A y el horizonte B. Con menos materia orgánica que el A, textura arenosa y de colores muy claros.
- B.** Horizonte de enriquecimiento en arcilla (iluvial o *in situ*), óxidos de Fe y Al (iluviales o *in situ*), materia orgánica (sólo si es de origen iluvial; no *in situ*); enriquecimiento residual por lavado de los carbonatos (si estaban presentes en la roca). De colores pardos o rojos, de cromas más intensos o tonalidad más roja que el material original.
- C.** Roca original con rasgos de intemperismo; sin desarrollo de estructura ni rasgos edáficos.
- R.** Roca original; dura y coherente, sin rasgos de intemperismo

Algunos suelos poseen al menos 3 horizontes A, B Y C, como se muestran en la Figura 5.

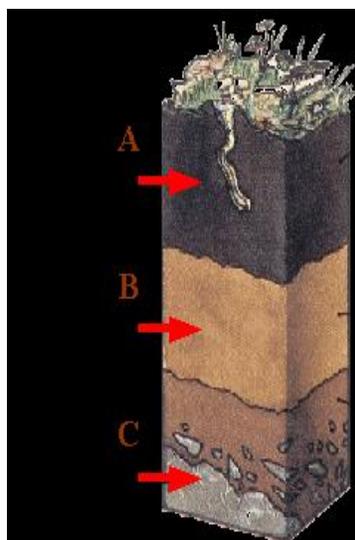


Figura 5. Perfil de suelos y horizontes que lo constituyen.

## 1.2.2 Propiedades del suelo

La composición química y estructura física son propiedades que caracterizan al suelo; éstas a su vez dependen de las distintas fases del material a partir de cual se origina (Vence et al., 1985).

### a) *Propiedades físicas*

Las propiedades físicas son aquéllas que reflejan la manera en que este recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil y que además estén relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros. La estructura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, profundidad del suelo superficial, capacidad de almacenamiento del agua y conductividad hidráulica saturada son las características físicas del suelo que se han propuesto como indicadores de su calidad (Singer y Ewing, 2000).

#### *Textura del suelo*

La textura de un suelo es la proporción de los tamaños de grupos de partículas que lo constituyen (arena, arcilla y limo) y está relacionada con el tamaño de las partículas de los minerales que lo forman. Esta propiedad ayuda a determinar la facilidad de abastecimiento de los nutrientes, agua y aire que son fundamentales para la vida de las plantas.

### b) *Propiedades químicas*

Las propiedades químicas de los suelos son parte del estudio de la ciencia química de suelos que se encargan del estudio de los componentes orgánicos e inorgánicos y de las diversas reacciones que ocurren en un entorno para formar mezclas y o compuestos como productos finales (Bornemisza, 1982). Corresponden a:

#### Potencial de hidrógeno (pH)

El pH es una de las características del suelo más importantes y lo asocian tres variables: acidez, alcalinidad y neutralidad (Bruckman y Brady, 1996).

#### Materia orgánica.

La materia orgánica (M.O), contribuye al crecimiento vegetal mediante sus efectos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

#### Tiene Como:

1. Función nutricional la que sirve como fuente de N, P para el desarrollo vegetal.
2. Función biológica la que afecta profundamente las actividades de organismos de micro flora y micro fauna.
3. Función física y físico-química que promueve una buena estructura del suelo.

Capacidad de intercambio catiónico.

Es la cantidad de cationes total de iones adsorbidos reversiblemente y se expresa como la cantidad de moles de carga positiva por unidad de masa de materia (normalmente por kg de suelo).

En el municipio de San Joaquín se presentan 5 Grupos de Suelos (INEGI, 1974)

**Luvisol crómico:** Presentan niveles medios de fertilidad, de color rojizo, ácidos y con un horizonte de acumulación de arcilla; son suelos delgados con un contenido de materia orgánica de pobre a moderado.

**Regosol:** Suelo joven, con una capa superficial delgada de color claro y en algunas ocasiones de color oscuro, tiene baja capacidad de retención de humedad y con fertilidad baja.

**Litosol:** Puede ser de color gris negruzco o amarillo rojizo, según la roca de la que se origine; es delgado en su horizonte superficial (menos de 10 cm), arenoso o arcilloso, con alto contenido de calcio o magnesio, pero bajo en potasio.

**Rendzinas:** Son suelos de pradera delgados, de color oscuro y desarrollados sobre rocas calizas blandas, de pH neutro a alcalino.

**Cambisol:** Suelos con una fertilidad elevada, se sitúan sobre materiales precámbricos.

La actividad principal en el municipio es agrícola, en la que predomina la siembra de cultivos de Temporal.

## 1.4 CONTAMINANTES

Los contaminantes dispersos son definidos como toda materia, sustancia o elementos químicos que al actuar en el ambiente, lo modifica negativamente. Se dispersan en cualquier escenario, impidiendo o perturbando la vida de los organismos y/o produciendo efectos nocivos a la población y al propio ambiente.

Los contaminantes se clasifican en físicos y químicos. Los contaminantes físicos son caracterizados por un intercambio de energía entre persona y ambiente en una dimensión y/o velocidad tan alta que el organismo no es capaz de soportarlo. Por varias razones, el contaminante físico más relacionado con la geología ambiental, es la radiactividad (natural o artificial).

Los contaminantes químicos representan grupo de agentes más significativos en el medio ambiente. Como contaminantes químicos se puede entender toda sustancia orgánica e inorgánica, natural o sintética que tiene probabilidades de lesionar la salud de las personas en alguna forma o causar otro efecto negativo en el medio ambiente.

## CAPÍTULO II

### 2. EL RADÓN (<sup>222</sup>Rn)

El Radón es un elemento natural gaseoso radiactivo, incoloro e inodoro (Tso y Li, 1987); pertenece a los gases nobles (Aitchison et al., 1969). En la tabla periódica tiene número atómico 86 y símbolo Rn; fue descubierto en 1900 por el químico alemán Friedrich Ernst Dorn; químicamente es un elemento inerte, su solubilidad decrece cuando se incrementa la temperatura. El radón presenta una gran facilidad para ser adsorbido por una gran variedad de sólidos (carbón activo); por su naturaleza gaseosa, se difunde fácilmente a través de diferentes medios (Fenell et al., 2002). En la Tabla 1 se muestran las propiedades atómicas y físicas del radón.

Tabla 1. Propiedades atómicas y físicas de Rn (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2004).

Propiedades atómicas					
Masa atómica <b>222</b>	Radio atómico calculado <b>120</b>	Radio covalente <b>145 pm</b>	Configuración electrónica $[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p^6$	Estados de oxidación ( <b>óxido</b> )	Estructura cristalina <b>Cúbica centrada en las caras</b>
Propiedades físicas					
Estado de la materia <b>Gas</b>	Punto de fusión <b>202 K</b>	Entalpía de vaporización <b>16,4 kJ/mol</b>	Punto de ebullición <b>211,3 K</b>	Entalpía de fusión <b>2,89 kJ/mol</b>	Presión de vapor y velocidad del sonido <b>Sin datos</b>

El radón es el gas monoatómico más pesado de la naturaleza; proviene de la desintegración natural de elementos radiactivos como el uranio ( $U^{238}$ ,  $U^{235}$ ,  $Th^{232}$ ) Figura 6.

El radón tiene 3 isótopos naturales: <sup>222</sup>Rn, <sup>220</sup>Rn y <sup>219</sup>Rn. Los 3 isótopos son radiactivos y forma parte de cadenas de desintegración del <sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U y <sup>232</sup>Th; el <sup>219</sup>Rn se define como actinon, es el menos abundante ya que se deriva del <sup>235</sup>U, su tiempo de vida media es de 4 s; la capacidad de difusión es irrelevante. El <sup>220</sup>Rn se llama toron tiene una vida media de 55 s, sin embargo tiene un subproducto que es el isótopo <sup>210</sup>Pb, con una vida media de 10.6 h. Y el <sup>222</sup>Rn que tiene una vida media de 3.8 días (Chart of Nuclides). Para este proyecto se evaluará el <sup>222</sup>Rn en suelos, fundamentalmente por su vida media.

Las rocas que constituyen la corteza terrestre contienen concentraciones de uranio a nivel de trazas de 2 a 4 ppm (Abu-Jarad y Fremlin, 1994). Algunas rocas ígneas contienen una mayor

concentración de uranio que las rocas metamórficas y sedimentarias (Thomas et al., 1994). El radón también puede encontrarse en suelos contaminados con ciertos tipos de desperdicios industriales tales como los residuos del uranio y las minas de fosfato (Amorós et al., 1995). La cantidad de radón contenida en el aire se mide en Becquerels/metro cúbico de aire ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ), es decir, por el número de desintegraciones por segundo que tiene una muestra dada. El becquerel o becquerelio (símbolo Bq) es una unidad derivada del Sistema Internacional de Unidades que mide la actividad radiactiva. Equivale a una desintegración nuclear por segundo. Otra unidad para medir el radón es el picocuries por litro ( $\text{pCi}/\text{lt}$ ) de aire.

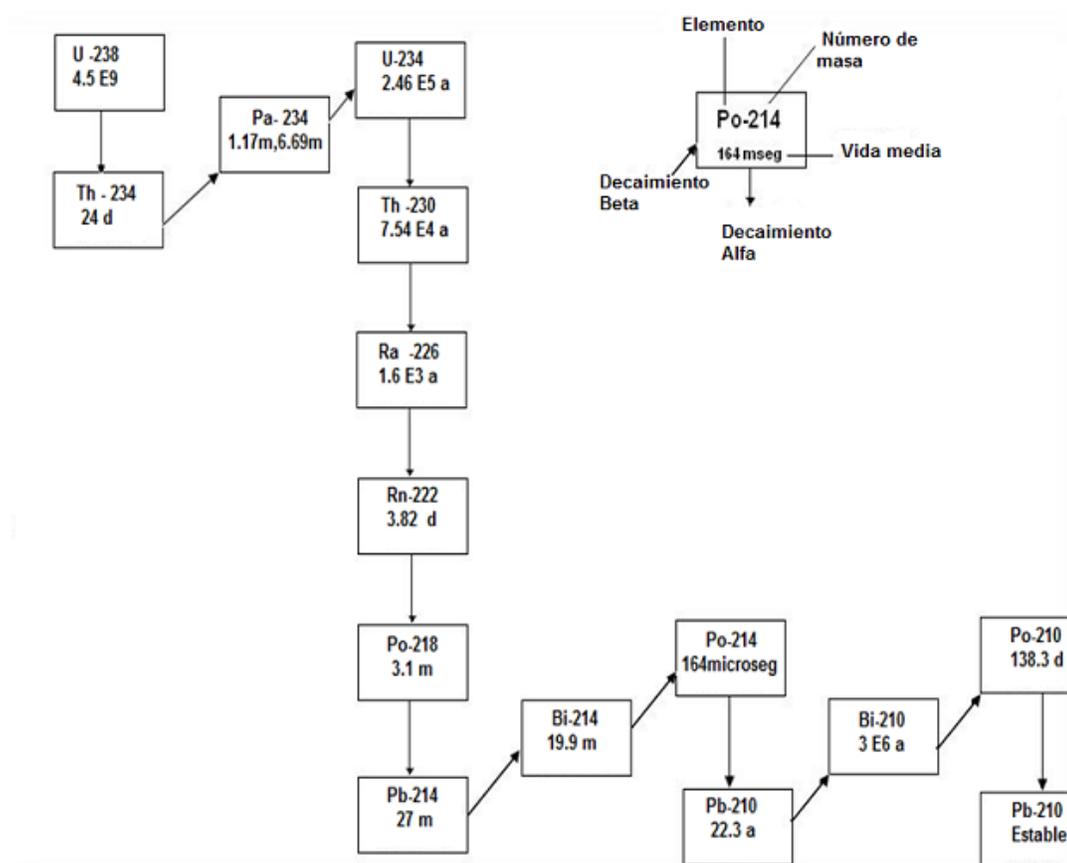


Figura 6. Desintegración de radón (Karunakara et al., 2005)

## 2.1 DECAIMIENTO DEL RADÓN Y ALGUNOS ISÓTOPOS

El  $^{222}\text{Rn}$  se origina por la desintegración de los átomos de  $^{226}\text{Ra}$  y se convierte emitiendo partículas alfa en un isótopo del elemento polonio dentro de los granos de las rocas que contienen uranio y a su progenie en equilibrio secular (Segovia et al., 1994; Nishizawa et al., 1989). No todos los átomos de radón generados por el radio contenidos en las rocas o en los granos del suelo son liberados por los poros; puede suceder que viajen distancias cortas y

queden en el mismo grano, que viajen a través de los poros y permanezcan empotrados en un grano adyacente, o que se escapen a través de la superficie de los granos y se mezclen con los fluidos intergranulares (Schuman y Gundersen 1996; Sesana et al., 1999). Cuando el radón es liberado de los granos minerales de un material poroso como las rocas del suelo, éste migra por los espacios intergranulares bajo 2 mecanismos: la difusión y el arrastre (Hess, 1985). La difusión molecular es un proceso en el cual la materia se transporta de un lugar a otro dentro de un sistema, como resultados de movimientos moleculares al azar, inducidos por diferencia de concentración. La mayor probabilidad ocurre donde existe una concentración mayor hacia una menor. Esta tendencia está descrita por la ley de Fick la cual relaciona el gradiente de concentración de flujo por unidad de masa (Bird 1992; Hines y Maddox 1987, Lobo 1997); la difusión molecular depende de la concentración, la porosidad del terreno y la distancia en recorrer (Martinelli 1998; Shweikanni et al., 1995). El arrastre que es el movimiento de los fluidos que lo transporta se ve influido por diversos factores: corriente de fluidos terrestres (agua y/o gases) Segovia et al., 1994) o presión, fallas geológicas, etc. (Etipoe y Martinelli, 2000). El radón presente en el suelo, puede ser transportado por fuerzas que originan cambios en los poros mediante esfuerzos de compresión causados por mareas terrestres, o por cambios en la relación de esfuerzos como ocurre en los sismos (Igarashi y Wakita, 1995). El radón es conocido como una fuente importante de exposición a la radiación natural (Segovia et al., 1999c). En la Tabla 2, se observan los valores de la constante de difusión de algunos medios con respecto a la distancia de los isótopos <sup>222</sup>Rn y <sup>220</sup>Rn antes del decaimiento. Estos parámetros que se encuentran en la misma tienen un mecanismo de transporte diferente (Tanner, 1964).

Tabla 2. Constante de difusión de diferentes medios (Tanner, 1964)

Medio	Distancia		Constante de difusión (D) (cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
	<sup>222</sup> Rn (cm)	<sup>220</sup> Rn (cm)	
Aire	220	2.85	10 <sup>-1</sup>
Poros del suelo	155	2.0	5.10 <sup>-1</sup>
Agua	2.2	0.0285	10 <sup>-5</sup>

En la corteza terrestre existen distintas litologías donde se pueden encontrar diferentes concentraciones de <sup>238</sup>U y <sup>232</sup>Th como se observa en la Tabla 3, en donde no se encuentra el <sup>235</sup>Uranio debido a que su porcentaje es de 0.07 % es con respecto al <sup>238</sup>U, por lo que se considera despreciable.

Tabla 3. Concentraciones de <sup>238</sup>U y <sup>232</sup>Th rocas (Núñez-Lagos, 2003)

<b>MATERIA</b>	<b>URANIO 238 (en ppm)</b>	<b>TORIO 232 (en ppm)</b>
Rocas areniscas	0.5	1.7
Rocas carbonatadas	0.5	1.7
Rocas basálticas	1	4
Suelo	1	6
Arcillas	3.5	11
Rocas graníticas	5	12

### 2.1.1 Emanación de radón

El origen natural del radón se encuentra prácticamente en la totalidad de los suelos de la corteza terrestre debido a la presencia de uranio y radio en la composición de los mismos (Nazorof, 1992).

En la Figura 7, se representa esquemáticamente los procesos de generación y migración del radón en suelos hacia la atmósfera.

Este proceso se clasificó en 2 grupos:

1. Disponibilidad del radón: factores que influyen en la concentración del radón en el suelo-aire y transporte.
2. Migración de radón: factores que gobiernan el movimiento del radón en el suelo-aire dentro y fuera de la atmósfera.

El proceso de generación y migración se ha convertido en los últimos años el modelo a seguir para el proceso de emanación de gas radón. Esto se debe a que se considera al suelo una mezcla homogénea; el contenido de radio es emanado hacia la superficie en donde la porosidad del suelo es parte importante, ya que a esta característica se le atribuye la existencia de la difusividad, permeabilidad (por el gradiente de presión) para un alto coeficiente de emanación de radón en suelos.

El radón migra a través de los poros del suelo en donde existe una combinación de convección y difusión. El radón entra a los edificios, casas, escuelas etc., por convección y migra en el aire por los poros del suelo y fracturas. Las variables que pueden controlar la emanación de gas

radón son: el gradiente de temperatura, el gradiente de presiones y el viento. Otro variable importante es el factor de construcción, tipo de infraestructura, calidad de construcción, ventilación en las construcciones, aire acondicionado, la calidad de construcción (Nazaroff, 1984).

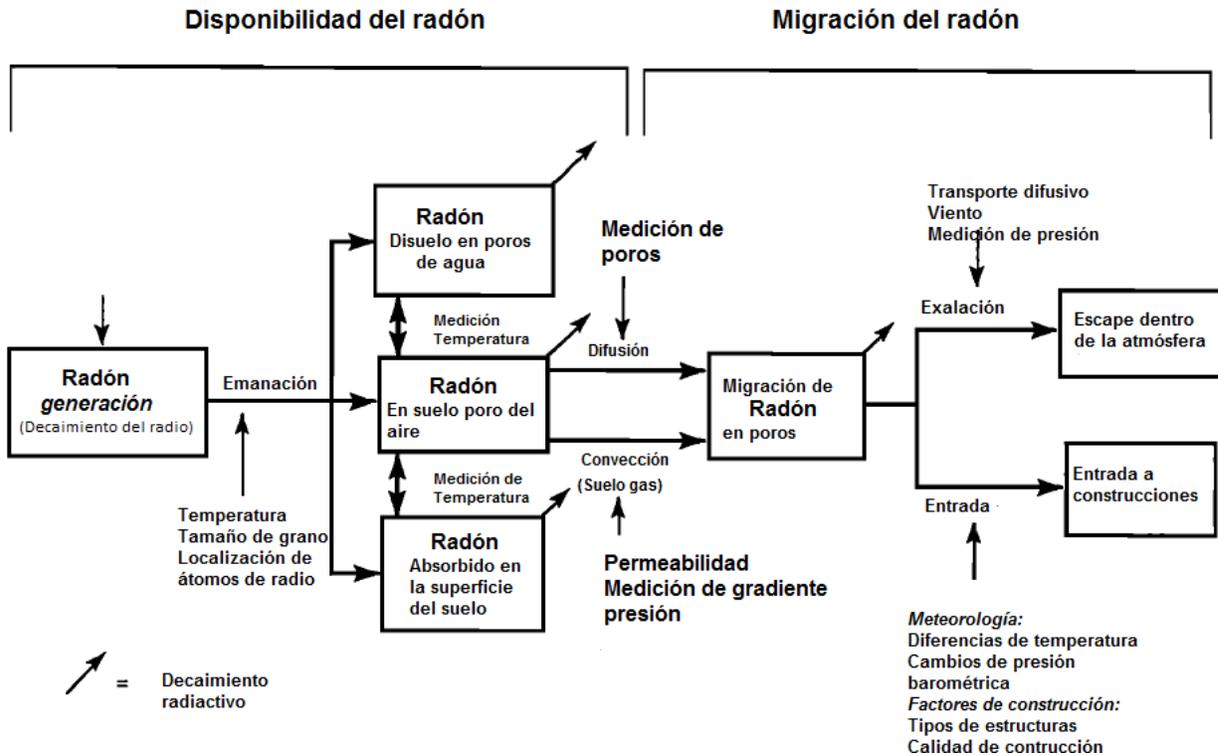


Figura 7. Procesos de generación y migración del suelo (William Nazaroff, 1992)

### 2.1.2 Transporte del radón

El contenido de radio y el radón en la tierra y en las rocas es típicamente expresado por unidad de masa. El radón se mide en Becquerel; es la unidad en el sistema internacional que mide la actividad radiactiva y se define como la actividad de una cantidad de material radiactivo con decaimiento de un núcleo por segundo equivalente a una desintegración nuclear por segundo; se calcula derivando N con respecto al tiempo:

$$A = \frac{-dN}{dt} = \lambda N; A = A_0 e^{-\lambda t}$$

Dónde:

$N$ = Número de núcleos radiactivos sin desintegrarse

$\lambda$ = Constante radiactiva

$A_0$ = Actividad en el instante inicial

Las estructuras geológicas modifican la permeabilidad del suelo, por lo que se asocia al tectonismo activo, debido a que la concentración del <sup>222</sup>Rn se registra en la superficie (Alexander y Gundersen, 1992; Hair et al., 1995; Lippmann et al., 2005; Soto et al., 1999).

Sin embargo, mediciones realizadas en regiones de suelo arcilloso, dan niveles más bajos que las realizadas sobre terrenos graníticos, lo cual lleva a la cuestión de que además de poseer el potencial, los suelos han de permitir la salida del radón, solo si éstos se hallan lo suficientemente fracturados y son lo suficientemente porosos (Gallegos, 1987).

El radón se desintegra formando minúsculas partículas radiactivas, de las cuales algunas quedan suspendidas en el aire. Cuando son inhaladas e ingresan al organismo, estas partículas producen bombardeos radiactivos que afectan a las células de los pulmones, produciendo daños a las vías respiratorias lo que puede llevar al cáncer pulmonar (Deetjen, 1997).

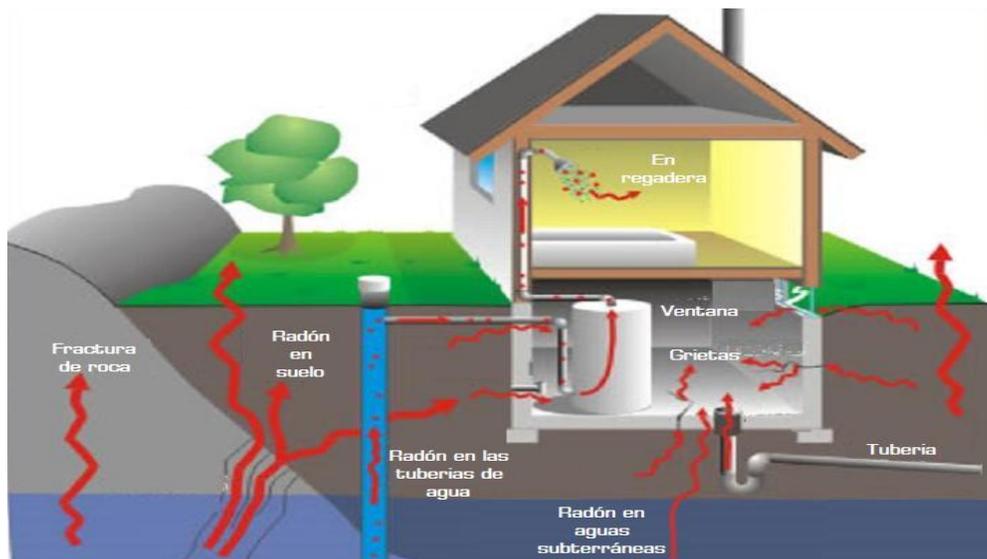


Figura 8. Representación del proceso de emanación de <sup>222</sup>Rn hacia la superficie.

## 2.2 RADIATIVIDAD <sup>222</sup>Rn

“La radiactividad es una propiedad de ciertos elementos químicos cuyos núcleos atómicos son inestables. Con el tiempo, para cada núcleo llega un momento en que alcanza su estabilidad al producirse un cambio interno llamado desintegración radiactiva, que implica un desprendimiento de energía conocido de forma general como radiación. La energía que interviene es muy grande si se compara con la desprendida en las reacciones químicas en que pueden intervenir las mismas cantidades de materiales; el mecanismo por el cual se libera esta energía es totalmente diferente (Cothier et al., 1986). La radiactividad fue descubierta en 1896 por el químico francés Bequerel.

La desintegración radiactiva espontánea del radón es un proceso en el que un átomo de un elemento decae o se descompone para formar otro elemento por la pérdida de partículas atómicas (protones, neutrones y electrones) (Segovia, 1994; Azorín 1997; Navarrete y Cabrera, 1993). Cuando decae el radio, se forma el gas radón, que pierde dos protones y dos neutrones. Estos dos protones y dos neutrones son llamados partícula alfa ( $\alpha$ ), que es un tipo de radiación. Los elementos que producen radiación se les llama radiactivos (Cothier et al., 1986).

Cuando un isótopo radiactivo emite una partícula alfa ( $\alpha$ ), se transforma en otro isótopo con número atómico (Z) inferior en dos unidades al del núcleo original y una masa atómica (A) inferior a 4 unidades.



Cuando un isótopo radiactivo emite una partícula beta ( $\beta$ ) se emite un electrón, el núcleo conserva su masa atómica, pero su número atómico aumenta en una unidad.



Los isótopos radiactivos son inestables y por desintegraciones progresivas se van transformando en otros hasta terminar en uno estable.

La medida de la radiactividad es la actividad si se tienen N núcleos radiactivos en un determinado instante; la actividad (A) se define como el número de átomos desintegrados en unidad de tiempo.

$$\text{Ec. 3} \quad A = dN/dt$$

El número de átomos radiactivos dN que se desintegra en un intervalo de tiempo dt es constante para cada isótopo radiactivo, lo cual se expresa como sigue:

$$\text{Ec. 4} \quad A = dN/dt = -\lambda N$$

Dónde:  $\lambda$  = constante de desintegración, es específica para cada radionúclido y representa la probabilidad de que un núcleo radiactivo se desintegre en la unidad de tiempo. El signo negativo indica que el número de átomos radiactivos disminuya al aumentar el tiempo transcurrido” (Ayala, 2009).

## 2.3 ANTECEDENTES

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, EPA, considera la concentración de radón intramuros (<sup>222</sup>Rn) de 148 Bq/m<sup>3</sup> como nivel de acción, en casas y edificios (Environmental Protection Agency). La mayoría de la radioactividad natural a la que se expone el ser humano es debida al radón (Environmental Protection Agency; Cothorn et al., 1987).

En la actualidad las mediciones de radón se utilizan en dos campos de investigación: salud física y geociencias; en la primera opción, las mediciones son realizadas para la detección de cáncer de diferentes tipos que puede estar inducido por la exposición al gas radón. El número de publicaciones indica que este tópico se incrementa exponencialmente con el tiempo. En la segunda opción, las mediciones son utilizadas para estudios geofísicos, lugares que presentan actividad sísmica y para predecir sismos (King, 1980; Wakita, et al., 1986; Igarashi et al., 1995; Loria et al., 1995). Se ha observado en algunos casos, antes de que se registre un evento sísmico, los valores de gas radón cambian, incrementándose la emanación de éste. (Ulomov y Mavashev, 1967; King et al., 1995; Igarashi et al., 1995). Se han asociado las mediciones de gas radón con las fallas o fracturas con los eventos sísmicos. Si los valores de concentración de radón se desvían por más de  $2\sigma$ , (donde  $\sigma$  es la desviación estándar), la desviación es considerada como una anomalía (Segovia et al., 1993). El evento podría llamarse precursor si ocurre antes de un sismo. También se ha utilizado para la detección de yacimientos de hidrocarburos, en el sistema de circulación y ventilación de minas y cuevas; en ambientes volcánicos, para la determinación del grado de desgasificación del magma durante la erupción, estudios de agua subterránea, detección de fallas activas, entre otros.

El gas radón tiene una alta movilidad; su peculiaridad radiactiva se puede utilizar como un trazador natural para el estudio de transporte de fluidos asociados a la corteza terrestre; en estudios de estructura y comportamiento de acuíferos (Segovia y Bulbulian, 1992; Monnin y Seidel, 1992; Pane, 1995; Low 1996; Segovia et al., 1997<sup>a</sup>; Wysocka et al., 2001).

### 2.3.1 Investigaciones previas

Se realizaron mediciones de <sup>222</sup>Rn en interiores en 16 regiones de la ciudad de México y el Distrito Federal (Espinosa and Gammage, 2003). En la actualidad la ciudad de México es una de las ciudades más pobladas y contaminadas del mundo con constantes inversiones térmicas. Los contaminantes químicos y aerosoles (partículas en el aire ambiente), la mayor parte del año son altos. Debido a condiciones geológicas, ambientales y socioeconómicas, el Distrito Federal presenta características muy peculiares que son importantes para la comprensión de la

distribución las mediciones de la concentración de radón en el interior de las construcciones. En este trabajo se muestran los resultados de tres años (1998-2000); las mediciones de los niveles de radón en el interior se realizaron con la metodología de detección nuclear en trazas, específicamente con los detectores pasivos CR-39 (Lantrack), siguiendo un protocolo muy bien establecido, desarrollado en el Instituto de Física de la UNAM. Los resultados muestran que los valores aritméticos medios de la concentración de radón detectado en el interior de cada región muestran valores anti-homogéneos.

También se hizo un estudio de los niveles de concentración de radón en interiores, en tres regiones con climas diferentes en México (Espinosa y Gammage, 2011) con el fin de investigar si las diferencias en el clima se traducen en diferencias significativas en las concentraciones de radón al interior de las construcciones. El país fue dividido en tres regiones climáticas: el norte con clima semi-desértico, la región semitropical del centro y, al sur, la región tropical. Las mediciones se llevaron a cabo utilizando la metodología de trazas nucleares. Los dosímetros utilizados para las mediciones de radón fueron detectores pasivos, desarrollados en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México; el material detector fue PADC; posteriormente, se siguió un protocolo bien establecido para el revelado químico y la lectura de trazas. Las temperaturas medias anuales difieren de una región a otra (de 15 °C a 28 °C). La temperatura atmosférica es uno de los factores más importantes que se deben considerar cuando se lleva a cabo un estudio de las concentraciones de radón en el interior ya que la temperatura determina en gran medida la ventilación del edificio. Ahora se sabe que los hábitos de ventilación tienen efecto significativo en las concentraciones de radón en el interior. Otros factores son los materiales de construcción de edificios, estilos arquitectónicos, las características geológicas e hidrológicas, sismicidad, etc. Estas características varían de región a región. En las tres regiones se encontraron bajas concentraciones de radón en el interior que van de 37 a 179 Bq/m<sup>3</sup>).

En la ciudad de Querétaro se estimaron concentraciones de <sup>222</sup>Rn en ambientes intramuros (García et al., 2007). Se utilizó el equipo y se monitorearon 40 casas en el año 2007; los niveles de concentración más altos se presentaron en el mes de octubre y las concentraciones más bajas en el mes de junio. Es posible que estas variaciones estén en función de las diferencias de temperatura, presión barométrica, ventilación, tipos de materiales de construcción y localización de los tipos de muestreo.

Las anomalías registradas en la variación de la concentración de radón en el volcán Popocatepetel, en el periodo del 2007 al 2008 (Kotsarenko et al., 2008), muestran una variación en las mediciones de gas radón en los sitios seleccionados para su monitoreo: Tlamacas, Paso de Cortés y el sitio de referencia, Amecameca. Utilizaron el equipo scout para las mediciones. Estas revelaron una gradual depresión de la concentración de radón, estas anomalías están asociadas a 2 eventos volcánicos 1) La depresión del radón anticipa una erupción volcánica, 2) Algunas anomalías fueron acompañadas por eventos volcano-tectónicos.

La medición de <sup>222</sup>Rn en Ambientes Geohidrológicos en la Fracción Central de México. (Ayala, 2009). En este trabajo se presentan las bases físicas de las radiaciones que son empleadas en

la detección y medición de la concentración de <sup>222</sup>Rn. Se emplean dos métodos distintos: con detectores de trazas nucleares, específicamente el CR-39 y con el equipo de monitoreo continuo RAD-7. Se utiliza al <sup>222</sup>Rn como trazador en dos zonas del estado de Guanajuato, situado en la fracción central de México. En la zona conocida como La Muralla, se midió la concentración de <sup>222</sup>Rn disuelto en agua en 16 pozos y manantiales usando el CR-39; se obtuvieron valores entre 75 y 1523 Bq/m<sup>3</sup>, los resultados se interpretaron como zonas con diferentes características geológicas.

Cambios de radón en suelo y elementos químicos mayores y traza en agua subterránea asociados a la actividad sísmica (Peña-García, 2003). La determinación de la concentración del radón en el suelo y en el agua subterránea, así como el análisis de elementos químicos mayores y trazas en agua subterránea de las costas de Guerrero y del Golfo de México ayudarán a estudiar su posible correlación con la actividad sísmica. La costa del Pacífico Mexicano es una de las zonas sísmicas más activas del mundo debido a la subducción de las placas de Cocos y Rivera bajo la placa de Norteamérica. Los sismos que ocurren en esta parte de México son de gran magnitud y afectan la parte central del país donde se encuentra la mayor densidad de población. Mientras que en la costa del Golfo de México, que presenta una actividad sísmica relativamente baja, se tiene localizada la planta nuclear de Laguna Verde (PNLV) por lo que los estudios de sismicidad deben conocerse por cuestiones de seguridad nuclear. La determinación de la concentración del radón tanto en suelo como en agua subterránea se llevó a cabo con mediciones de largo periodo, utilizando Detectores de Trazas Nucleares en Sólidos (DTNS) (LR-115). Se utilizaron detectores automáticos para mediciones continuas que registran las fluctuaciones de la concentración del radón en tiempos cortos (sonda Clipperton). En algunos casos se analizó la radiación gamma en suelo utilizando detectores termoluminiscentes (CaSO<sub>4</sub>: Dy+ PTFE). La medida de parámetros fisicoquímicos en el lugar de muestreo y en laboratorio se realizó por métodos físicos y químicos convencionales. Los elementos traza se obtuvieron utilizando un espectrómetro de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS). En la zona de la PNLV, los resultados muestran que por lo general los promedios de los valores de la concentración de radón fueron bajos; tanto en el suelo como en el agua subterránea, fueron diferentes en cada estación de muestreo y están en función de los parámetros meteorológicos y de las características geológicas. Las anomalías se presentan durante la época de lluvias; este comportamiento quizás se deba a la humedad del suelo ya que coincide la época de mayor precipitación. En cuanto a la costa del Pacífico, se observó que las fluctuaciones en suelo muestran ocasionalmente dependencia con los parámetros meteorológicos. Los valores máximos se obtuvieron principalmente en la época de lluvias. El factor primordial que influyó en la concentración del radón fue la geología local de los sitios de estudio; es decir, la respuesta del radón en el suelo depende del tipo de sustrato. Las estaciones de muestreo de radón ubicadas en suelo residual, indicaron valores menores que aquellas que están ubicadas en suelo granítico y metamórfico; así mismo, las estaciones cercanas entre sí y que corresponden a la misma región geológica, presentan un comportamiento parecido. Se observó una intensa actividad sísmica en el periodo de muestreo. La mayoría de los sismos fueron de magnitud (M>4) y someros (< 20 km).

Se realizaron mediciones de Radón <sup>222</sup> en dos zonas volcánicas en México, en la cuenca de México y San Luis Potosí (Cortés et al., 2006). En la primera de ellas, se tomaron muestras en 46 sitios con el método activo y cinco con el pasivo. Los valores de <sup>222</sup>Rn los asociaron con las rocas presentes en la zona. El promedio de la actividad obtenida fue de 300 Bq/m<sup>3</sup>, observando que en el 15 % de las muestras tienen valores por arriba de 1000 Bq/m<sup>3</sup>. En la cuenca de San Luis Potosí, se tomaron once muestras para analizarse con cada método. Se obtuvieron un valor promedio de 4000 Bq/m<sup>3</sup>; estos valores mucho más altos, se asocian con la presencia de rocas de la naturaleza (sedimentarias).

Soto et al., (2002) realizaron mediciones de la radiactividad en agua de manantiales de Cantabria, al norte de España. Las medidas de la actividad del <sup>222</sup>Rn las realizaron por medio de espectrometría gama en 47 manantiales. Los resultados más altos fueron de 123, 534 y 824 Bq/l sólo se encontraron en manantiales empleados para balnearios.

Espinosa et al., (2011) llevaron a cabo mediciones a largo plazo en el interior del laboratorio Pelletron del Instituto de Física de la UNAM. Midieron el contenido de radón en intramuros donde labora personal del laboratorio así como usuarios eventuales. Se establecieron límites de tiempo continuo dentro de las instalaciones; se usaron detectores pasivos (DTNS) y sistemas dinámicos con duración de 6 meses. Los resultados indican, a diferencia con otras instituciones y laboratorios, que los niveles de radón intramuros están por debajo de los niveles recomendados por la agencia USEPA (400 Bq/m<sup>3</sup>) para lugares de trabajo.

## 2.4 METODOLOGÍA

Existen algunos métodos para la detección de radón que se llevan a cabo por transmisión de toda o parte de su energía de radiación, al detector. Una manera es a través de una ionización directa de los átomos o provocando la emisión de partículas cargadas, las cuales a su vez producen ionización en el medio (Espinosa, 1994). Este método se basa en la detección de los productos emitidos en el proceso de desintegración radioactiva, específicamente las partículas alfa del <sup>222</sup>Rn y de sus hijos, para conocer la concentración de actividad (Bq/m<sup>3</sup>), que es proporcional a la cantidad de <sup>222</sup>Rn presente. Las técnicas se pueden dividir por el tiempo de respuesta; a la vez, la ionización producida puede detectarse por varios métodos, ya que la selección de quipos depende de la aplicación específica, información necesaria, duración de la muestra y requerimientos de sensibilidad (Somogyi, 1990). Existen instrumentos diversos para la detección del gas radón que se han incrementado en la última década que se dividen en 2 grupos: activos y pasivos.

### 2.4.1 Características de detectores de radón

A continuación se describen características de algunos detectores de radón que se basan en la detección de los productos emitidos en el proceso de desintegración radiactiva, específicamente las partículas alfa del <sup>222</sup>Rn y de sus hijos, para conocer la concentración de la

actividad ( $\text{Bq/m}^3$ ) que es proporcional a la cantidad de  $^{222}\text{Rn}$  presente. Se pueden dividir por su tiempo de respuesta.

**Detectores Pasivos:** Determinan la concentración promedio en un período de tiempo (varios días). Se le llama técnica de integración (George, 1996; Papastefanou, 2003).

**Detectores de Trazas Nucleares en Sólidos (DTNS).** Permiten la detección de partículas cargadas (alfas, iones, fragmentos de fisión, etc.). Estos detectores, policarbonatos (CR39) dan información sobre la cantidad de partículas que llegan a una superficie en un determinado tiempo. Esta técnica permite incluso la discriminación de las trazas en tamaños y excentricidades, lo que da información de la energía y masa de las partículas y de la distribución angular de la radiación incidente. Algunas de las aplicaciones de esta técnica se encuentran en dosimetría, estudio de reacciones nucleares, exhalación de radón, radiografía con neutrones, etc. (Monnin y Seidel, 1992; Espinosa, 1994).

Los materiales de los **(DTNS)** son, polímeros orgánicos, vidrios o cristales en los cuales las partículas nucleares al incidir, forman zonas de daño intenso a escala atómica. El paso de partículas nucleares y de iones pesados a través de ciertos materiales, crea patrones finos de daño intenso o huellas estables a escala atómica, llamados trazas nucleares en sólidos, formados básicamente por desplazamientos atómicos. Un modelo que explica la formación de estas trazas, es el llamado punta de explosión iónica (Espinosa, 1994), que considera como efecto fundamental, un desplazamiento atómico en el material usado como detector. A lo largo del patrón de ionización de la partícula, se forma una inestabilidad electrostática, produciendo una repulsión eléctrica de los iones y con esto, un movimiento hacia los intersticios cercanos. Luego de que estos iones se desexcitan, se relajan los alrededores de la red perturbada, provocando dislocaciones, es decir, deslizamiento de las redes cristalinas a lo largo de la trayectoria de la partícula (Espinosa, 1994). Estos daños se pueden observar directamente mediante el microscopio electrónico de transmisión, pero para poder ver las trazas con microscopio óptico, tendrán que ser reveladas con un ataque químico (Fleischer et al., 1965).

La técnica de trazas nucleares en sólidos es una técnica tradicional que se ha usado durante mucho tiempo en diversas áreas en donde es importante la detección de radón; esta técnica se ha usado más para interiores. Es simple de usar y relativamente barata, al no necesitar de grandes recursos tecnológicos; es especialmente útil en las campañas de prospección por ser un método de integración que da el promedio de la concentración de radón durante el tiempo total de exposición, con lo cual, la medida está menos afectada por variaciones ambientales de corto periodo.

**Detectores CR- 39:** es un policarbonato que puede ser Launder, Pershore o algún policarbonato europeo. Una de las características del detector CR-39, es que son sensibles a partículas alfa, protones, neutrones, iones pesados y fragmentos de fisión, siendo ciegos básicamente a partículas beta, radiación gamma y rayos X (Espinosa, 1994). Esta discriminación en la detección, es una excelente característica para mediciones en campos de

radiación mixtos, como los hijos del radón. Este método se basa en la detección de partículas alfa emitidas por los átomos de radón y por sus descendientes radiactivos que emitan alfas: el <sup>222</sup>Rn, el <sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Po y <sup>210</sup>Po que, al incidir sobre el policarbonato CR-39, dañan la superficie del material, dejando trazas o huellas de impacto que pueden permanecer latentes por cientos o miles de años, hasta que sean reveladas, mediante un ataque químico.

**Detectores Activos:** son aquéllos que emiten energía sobre el objeto y reciben la señal reflejada por el mismo. Los sensores activos más comunes son los sensores de RADAR (Radio Detection And Ranging). Estos sensores trabajan en el rango de las microondas, razón por la cual es posible trabajar sobre cualquier condición atmosférica. Otro tipo de sensor activo es el LIDAR (Light Detection and Ranging) que permite conocer información y variaciones de alturas en superficie, calculando el tiempo de retorno de una señal. Algunos de estos detectores son el Sarad y Monitor RTM1688-2.

En este trabajo se usaron dos métodos de medición de <sup>222</sup>Rn:

1. Se mide el <sup>222</sup> Rn con el detector Sarad que llega a la superficie del suelo como gas transportado por el aire; se hace uso de él durante 15 a 25 días, según sea el caso.
2. Se mide el <sup>222</sup> Rn que llega a la superficie del suelo, en aire y agua, con un medidor de flujo continuo como el Monitor RTM1688-2; se obtiene concentraciones en función del tiempo.

#### 2.4.2 Técnica de medición con detectores SARAD-SCOUT

Las mediciones detectadas se procesaron con el software Radon Vison 32; este software determina la concentración del gas radón en Bq/m<sup>3</sup>, % humedad, temperatura en °C y presión atmosférica. El modelado del análisis se hace con el software Matlab 3.1; las mediciones se obtienen de manera rápida y sencilla. El equipo Scout tiene en su interior iones implantados en detectores de silicio especial para la espectroscopia alpha/beta que funcionan como filtro. Su diseño robusto permite hacer mediciones por un período largo (1-12 meses). El tamaño de la memoria de datos fue diseñado para conseguir una distribución de tiempo de alta resolución. El instrumento trabaja en un modo de difusión de tal forma que, pueda ser eliminada una interferencia de Thoron. La cámara de mediciones está equipada con un detector semiconductor; no muestra ninguna sensibilidad contra la humedad ambiental (Figura 9).

Tiene un rango de medición que van de 0 a 10 MBq/m<sup>3</sup>, con una sensibilidad 1.8 cpm, 200 Bq/m<sup>3</sup> con 20 % de error y estadístico. Tiene un tiempo de respuesta de 120 minutos de 95 % del valor final. Cuenta con una serie de sensores internos que miden la humedad relativa (0 - 100%), intervalo de temperatura que va de 20 a 40 °C, presión barométrica (800 – 1200 mbar), intervalos de integración que van de 1 a 255 minutos; todo esto se puede ajustar al software. Cuenta además, con un reloj interno de tiempo real.



Figura 9. Equipo Sarad-Scout.

## 2.4.2.1 Pruebas de medición en el laboratorio

### 2.4.2.1.1 *Medición de aire*

Se realizaron pruebas ambientales en el Laboratorio de Edafología del Campus Juriquilla-UNAM Querétaro, lugar cerrado con pocas corrientes de aire. Se realizaron diferentes pruebas de medición de aire atmosférico, cuyos equipos tienen los siguientes códigos: 147, 148, 149, 090. Cuentan con una medición continua de 17 días con períodos de una hora. El detector fue registrando los ciclos, mostrando resultados promedios de la concentración cada media hora. Los equipos se colocaron en el piso del laboratorio, éste se mantuvo con las puertas cerradas en el periodo de medición, se tomaron precauciones para que no existieran corrientes de aire, en este periodo no hubo actividades en laboratorio.

Después de realizar diferentes pruebas de medición de aire atmosférico, se volvió hacer una nueva medición en el observatorio del Campus Juriquilla-UNAM, Querétaro, con dos equipos cuyos códigos son: 091 y 198, de tal forma que se pudieran comparar las mediciones de aire, bajo condiciones similares a las mediciones anteriores, solo que ahora el tiempo de medición fue de 7 días y con intervalos de media hora.

### 2.4.2.2 *Actividades de campo*

Consistieron en la verificación geológica de la zona de estudio, tomando como referencia el mapa geológico del SGM en donde se reconocieron las formaciones El Doctor y Las Trancas del Cretácico Superior descritas en (Capítulo 1), que fueron tomadas como base para identificar fallas y fracturas; estos indicios sirvieron como parámetros para colocar los detectores en los sitios. Posterior a esto se establecieron los siguientes pasos:

### 2.4.2.2.1 Medición de suelos

1. Preparación del equipo (verificar baterías y programación del tiempo para la detección del radón).
2. Selección de sitio de monitoreo en suelos.
3. Sobre la superficie del suelo se escarbó un área cuadrada de aproximadamente 20 x 30 cm con una profundidad de 50-60 cm para enterrar el equipo (Figura 10).
4. Colocación del equipo (cubierto con un protector de plástico) en el área antes mencionada; se prende el equipo, posteriormente se tapó el orificio escarbado con el mismo material.
5. Georeferenciación del equipo con un GPS modelo Etrex-Garmin.
6. El equipo permaneció en el sitio durante dos intervalos de tiempo de 15 días.
7. Transcurrido el tiempo, se retira el equipo y se apaga.
8. Se procesaron los datos.



Figura 10. Foto 1. Superficie del suelo escavado y colocación del equipo.

Para volver a usar los equipos se deja un tiempo de 1 semana, con la finalidad de que los filtros que del interior se sequen y estén listos para realizar nuevas mediciones.

### 2.4.3 Técnica de medición de <sup>222</sup>Rn con Monitor RTM1688-2

Otro equipo que se utilizó en esta investigación fue el monitor RTM1688-2 (Figura 11) utilizado para mediciones de radón en interiores y exteriores. Una de las ventajas es la obtención de concentraciones de radón en corto tiempo; las mediciones se pueden realizar en campo, el equipo es portátil y de manufactura alemana, no se utiliza laboratorio para el procesado de datos.

El monitor RTM1688-2 tiene en el interior una cámara de alto voltaje donde se colecta el <sup>218</sup>Po ionizado; en la superficie del detector semiconductor, se encuentra el mecanismo de espectroscopia alfa, lo que hace posible contar exactamente cual isótopo (el <sup>218</sup>Po, el <sup>214</sup>Po,

etc.) produjo la radiación, de modo que inmediatamente se distingue el radón viejo del radón nuevo. Esta técnica es conocida como *espectrometría alfa*.

La espectrometría alfa es un método útil y sensible para la detección de núcleos radioactivos alfa debido a su resolución en energía y gran sensibilidad. Esta técnica se basa en la ionización que las partículas alfa emitidas producen en un medio o sistema detector. La ionización es proporcional a la energía de las partículas alfa. Tras colectar los iones formados y pasar los impulsos electrónicos que se generan por la electrónica asociada al detector, el resultado será un espectro de partículas alfa o representación del número de partículas detectadas en función de su energía; con ello se permite la identificación de los emisores alfa contenidos en una muestra. El fundamento de esta técnica en los detectores es el siguiente: el paso de una partícula a través de un sólido excita electrones a la banda de conducción; si se establece una diferencia de potencial en el sólido se puede llegar a detectar la corriente causada por esos electrones excitados.

El equipo tiene una sensibilidad de detección de radón 3.2/7 cpm @ 1000 Bq/m<sup>3</sup>, cuenta con un volumen interno de 135 ml, con un tiempo de respuesta de 12/120 min, puede medir rangos de 0 – 10 000 000 Bq/m<sup>3</sup>. Tiene un rango de error estadístico de (1  $\sigma$ ) 15 % por hora.



Figura 11. Foto 2. Monitor RTM1688-2.

### 2.4.3.1 Actividades de Campo

El equipo se programó con un tiempo de 20 minutos por medición, tiene una entrada en la parte frontal con un conducto que es donde se entierra en el suelo del sitio seleccionado, la muestra es llevada al interior del equipo, tiene una pantalla donde se va observando el tiempo transcurrido y se pueden ver las mediciones de las concentraciones de radón, temperatura, humedad y presión (Figura 12).

### 2.4.3.1.1 Medición de suelos

1. Selección de sitio para medir radón en suelos.
2. Se escarba un orificio en el suelo seleccionado en un área cuadrada de aproximadamente 10 x 15 cm con una profundidad de 15 -20 cm. para introducir el embebedor del espectrómetro (Figura 13).



Figura 12. Foto 3. Mediciones de radón con monitor.



Figura 13. Foto 4. Excavación – introducción - subcción.

3. Se tapa el orificio con la tierra escavada. (Figura 14)



Figura 14. Foto 5. Midiendo Rn en suelos con monitor.

4. Se prende el equipo, se comienza hacer la medición del monitor por 5 min.
5. Georeferenciación del equipo con el GPS Etrex-Garmin.
6. Una vez transcurrido los 5 minutos, se retira el embebedor del equipo y se dejan otros 15 minutos para que termine el ciclo.
7. Cuando transcurren 20 min (5min +15 min) se toman datos de humedad, concentración de radón, temperatura y presión.

#### 2.4.3.1.2 Medición de agua

Para el muestreo de radón en agua en la zona Agua de Venado, se tomó agua de la llave de las casas. Se utilizaron botellas de polietileno de alta densidad con capacidad de 1 litro; la muestra consiste en 200 ml de agua con la menor agitación posible; el envase se lava tres veces con la misma agua, el monitor RTM1688-2 tiene una herramienta que es la bomba que succiona el agua y pasa la misma al monitor para que realice las mediciones de radón. En la Figura 15 se muestra como se realiza la medición, la muestra se deja 5 minutos y posteriormente se dejan 15 minutos para que se cumpla el ciclo de 20 minutos. Cuando transcurren 20 min (5min +15 min) se hacen 3 réplicas y se toma las lecturas de radón en agua.



Figura 15. Foto 6. Medición de agua con monitor.

## 2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la medición de <sup>222</sup>Rn se presentan como la concentración de su radiactividad que es proporcional a la cantidad de este elemento presente.

### 2.5.1. Medición en suelo con detectores scout

Durante los recorridos de campos se visualizaron fracturas y estructuras geológicas de carácter activo que han empezado a afectar a la región; estas se perciben como fallas con una orientación regional NW-SE, las cuales no han sido mapeadas. A los largo de estos lineamientos se desarrollan fracturas y fallas secundarias que incrementan la permeabilidad del medio. En la Tabla 4, se presentan las concentraciones del <sup>222</sup> Rn que se midieron con los detectores scout en minas abandonadas, grutas y poblados.

Tabla 4. Datos de medición de <sup>222</sup>Rn de los equipos scout.

<b>Localidad</b>	<b>Coordenadas UTM</b>		<b>Suelo Bq/m<sup>3</sup></b>
	<b>X</b>	<b>Y</b>	
<b>El Rincón</b> (mina abandonada)	440375	2318088	630
<b>Santo Entierro</b> (mina abandonada)	437849	2314112	2500
<b>Los Herrera</b> (mina abandonada)	440063	2311082	180
<b>Toluquilla</b> (Grutas)	444658	2309389	2100
<b>Ranas</b> (Grutas)	441355	2314025	12000
<b>Hotel Doña Lupe</b> (poblado)	441390	2312862	180
<b>Ranas</b> (Grutas)	441362	2313198	1800
<b>Agua de Venado</b> (poblado)	440439	2313447	60000

En la Figura 16, se muestran las gráficas de los sitios donde se colocaron los detectores scout. *La gráfica A*, corresponde al sitio Ranas donde se puede observar que se detectó una concentración promedio de 2500 Bq/m<sup>3</sup>; en esta gráfica se observa que las variables de humedad y presión tienen una anti correlación con la medición del radón, mientras que la temperatura no presenta cambios.

*La gráfica B*, corresponde al sitio El Rincón, la concentración promedio detectada de esta mina abandonada fue de 630 Bq/m<sup>3</sup>, esto fue en el período de noviembre 2008; este sitio está muy cerca al poblado de San Joaquín; la variable presión tiene una anti correlación con respecto a la medición de la concentración de radón, mientras que la temperatura y la humedad presentan tendencia a una relación con la medición de radón.

*La grafica C*, presenta 3 mediciones de radón de 3 sitios. En la parte superior, se tiene la medición de las grutas Los Herrera; se puede observar que tiene mucho ruido debido a que

este sitio tiene mucha ventilación; el promedio de las emanaciones fue de 180 Bq/m<sup>3</sup>. En la segunda parte de la gráfica se observan las mediciones de la mina Santo Entierro, donde el promedio fue de 2100 Bq/m<sup>3</sup>. La tercera parte de la gráfica corresponde al sitio Toluquilla, la medición del gas radón se comportó uniforme, teniendo un promedio de 220 Bq/m<sup>3</sup>. En los 3 sitios sobrepasa la norma de la EPA.

La gráfica D, representa a las variables de presión, temperatura y humedad de los sitios medidos en la gráfica C; estas variables presentan un comportamiento similar a las mediciones de gas radón.

En la gráfica E, se observa que las mediciones de emanación de radón en el Hotel Doña Lupe es relativamente baja; el valor promedio obtenido fue de 180 Bq/m<sup>3</sup>. En la parte derecha de la gráfica se muestra que existe una correlación entre la medición de <sup>222</sup>Rn y la presión, mientras que con respecto a la temperatura y la humedad existe una anticorrelación.

La gráfica F, presenta las cantidades de <sup>222</sup>Rn detectadas en el sitio Ranas con un valor promedio de 12,000 Bq/m<sup>3</sup> mientras que en el hotel, el equipo 90 no registró nada, lo que se concluye que el equipo se abrió. La presión se mantuvo constante con un promedio de 765 atm., una humedad de promedio de 105 % y una temperatura promedio de 10.5 ° C.

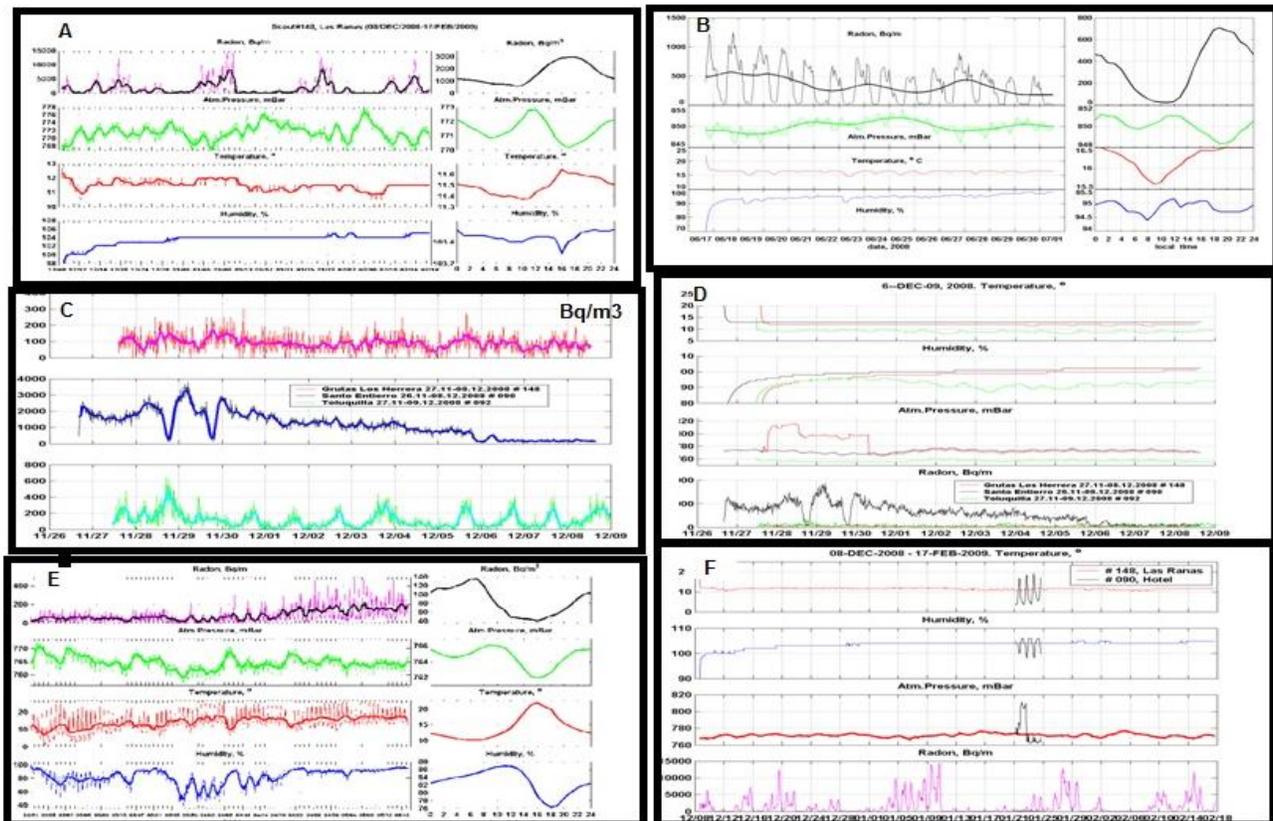


Figura 16. Gráficos de concentración de <sup>222</sup>Rn con detectores scout.

En la Figura 17 se muestra la gráfica del sitio Ranas donde se detectaron emanaciones de <sup>222</sup>Rn de 1800 Bq/m<sup>3</sup> y, en Agua de Venado 60 000 Bq/m<sup>3</sup>; el quipo se colocó en el jardín de una casa habitación; la casa habitación se encuentra a escasos 50 m de donde se dejó el equipo. Esta medición tan fue considerada como anomalía y se decidió hacer una evaluación ambiental, iniciando con un perfil a los alrededores de Agua de Venado con los detectores scout y monitor RTM1688-2.

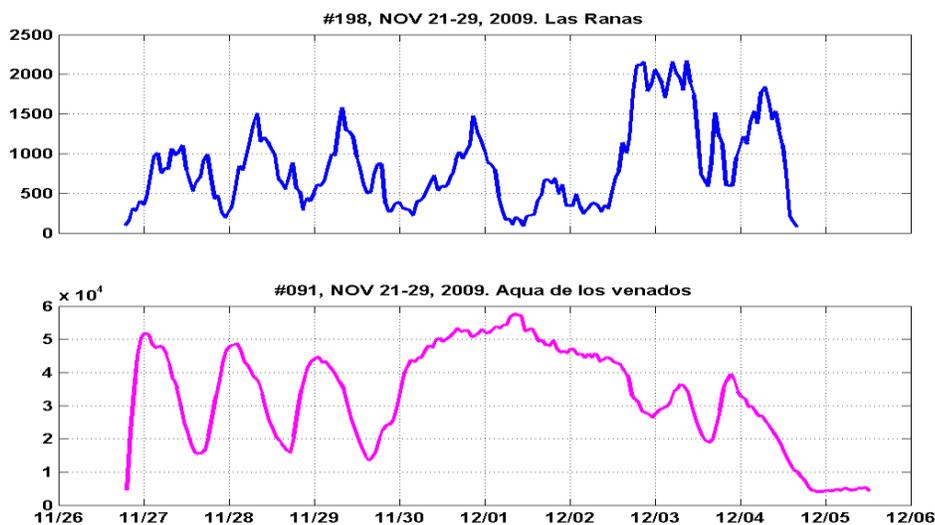


Figura 17. Gráfica de mediciones de <sup>222</sup>Rn en suelos en Ranas y Agua de Venados.

## 2.5.2 Perfil en Agua de Venado con detectores scouts y monitor RTM1688-2

### a) Detectores scout

Se hicieron lecturas de 30 min por 2 días; en la Tabla 12 se muestran la fecha, hora, concentración de radón en Bq/m<sup>3</sup> y sus coordenadas. En primer día la concentración máxima detectada fue de 703 Bq/m<sup>3</sup> la hora fue 15:34-18:03 y la concentración menor fue de 610 Bq/m<sup>3</sup> en el rango de tiempo de 17:20 – 17:50.

Para el segundo día la concentración máxima se elevó con un valor de 2137 Bq/m<sup>3</sup> la hora fue 9:20-9:35. El valor mínimo de radón detectado fue 70 Bq/m<sup>3</sup>, correspondiendo al horario de 16:50- 17:10.



Figura 18. Sitio Agua de Venado con anomalía de <sup>222</sup>Rn. Imagen Google Earth

Tabla 5. Datos de perfil en Agua de Venado con scouts.

Perfil	Fecha	Hora		Bq/m <sup>3</sup>	Coordenadas	
1er.	21-dic-09	16:43	17:05	394	440429	2313478
		17:20	17:50	662	440439	2313478
		17:34	18:25	703	440266	2313510
		18:30	19:50	610	440266	2313510
2do.	22-dic-09	09:20	09:35	2137	440266	2313510
		09:40	10:00	1611	440430	2313526
		10:10	10:30	2520	440438	2313171
		11:25	11:40	1477	440526	2313509
		11:45	12:00	1364	440613	2313785
		12:03	12:20	980	440931	2313692
		12:25	12:50	1375	441220	2313844
		13:23	13:40	304	440322	2313233
		13:55	14:25	1017	440727	2313323
		14:35	14:45	782	440842	2313077
		16:19	16:40	771	440989	2313876
		16:50	17:10	70	440932	2314214
		17:15	17:35	1057	440789	2314399

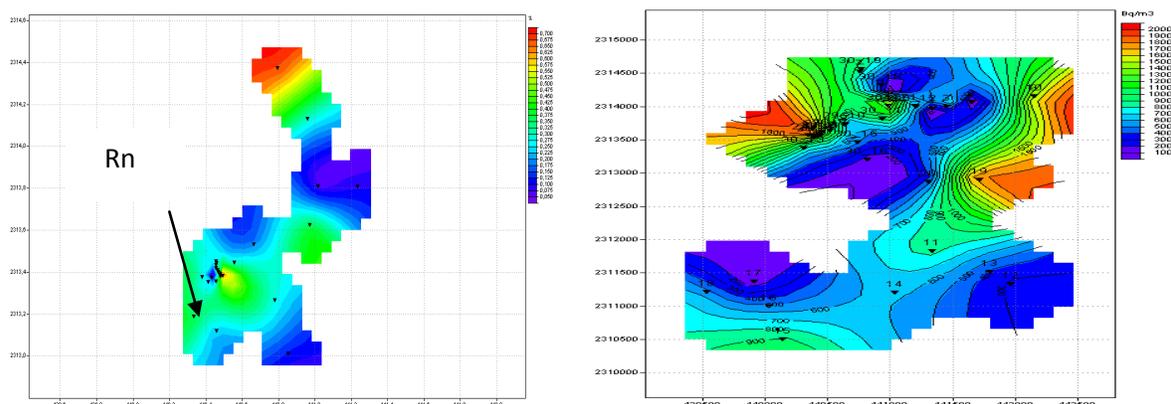


Figura 19. Gráficos de distribución de concentraciones de <sup>222</sup>Rn en el perfil Agua de Venado con scout.

En la Figura 19, se muestran dos gráficos de la distribución de concentraciones de <sup>222</sup>Rn del perfil del Agua de Venado, en el gráfico de la izquierda se muestra la máxima concentración de emanación de color azul y en el gráfico de la derecha se observa de color rojo la mayor concentración. El valor máximo fue de 2520 Bq/m<sup>3</sup>. Esta zona puede asociarse con el tectonismo que pudiera estar desarrollándose con una amplia intensidad.

**b) Monitor RTM1688-2.**

En las minas Otatal y Calabacillas se realizaron mediciones de <sup>222</sup>Rn en un intervalos de 20 min por dos días durante el período de abril del 2010. En la Tabla 6 se muestran los datos obtenidos. La mayor concentración detectada de <sup>222</sup>Rn dentro de la mina Calabacillas fue 2445.7 Bq/m<sup>3</sup> en la hora de las 10:15 – 10:35 y la menor 1980.9 Bq/m<sup>3</sup> en la hora de 13:04-13:24. En la mina El Otatal, el valor mayor de radón corresponde a 2451.8 Bq/m<sup>3</sup> en el horario de 11:37-11:57. El valor menor registrado fue en la hora 12:55-13:55 con una concentración detectada de 2020.9 Bq/m<sup>3</sup>.

Tabla 6. Datos del perfil de medición de <sup>222</sup>Rn en minas Otatal y Calabacillas con monitor RTM1688-2.

Perfil	Fecha	Hora	Bq/m <sup>3</sup>	Coordenadas	
<b>1er.</b>					
Cal1	10-abr-10	10:15	10:35	1629	44 005 8    231 35 94
Cal2		11:23	11:43	412	43 649 4    231 38 90
Cal3		11:48	12:10	1238	43 440 5    231 41 00
Cal4		12:13	12:23	201	43 450 7    231 59 88
Cal5		12:39	12:59	328	43 344 7    231 62 14
Cal6		13:04	13:24	89	43 362 4    231 58 19
Cal7		13:29	13:49	42	43 354 5    231 59 49
Cal8		13:54	14:14	100	43 365 9    231 58 98
Cal9		14:19	14:39	68	43 367 3    231 54 55
Cal10		14:46	15:04	174	43 806 2    231 35 72
<b>2do.</b>					
Ota1	11-abr-10	11:37	11:57	328	44 164 1    231 28 17
Ota2		12:03	12:23	1137	44 201 4    231 51 75
Ota3		12:30	12:50	1412	44 359 6    231 63 81
Ota4		12:55	13:15	3190	44 276 3    231 59 05
Ota5		13:49	14:09	1169	44 585 6    231 64 26
Ota7		14:14	14:24	211	44 528 7    231 49 12
Ota8		14:39	14:59	2159	44 370 2    231 34 70
Ota9		15:04	13:24	989	44 126 1    231 14 60

En la Figura 20 se observa la distribución de las concentraciones de emanación en la minas; el color rojo corresponde al valor mayor que fue de 3190 Bq/m<sup>3</sup> que corresponde al Otatal, para Calabacillas el valor máximo fue de 1629 y 3190 Bq/m<sup>3</sup>. La concentración de actividad que representa esta zona se encuentra relacionada principalmente por las betas que se encuentran en el interior de las minas, ya que la mineralización se emplazó en las fracturas persistentes con rumbo NW.

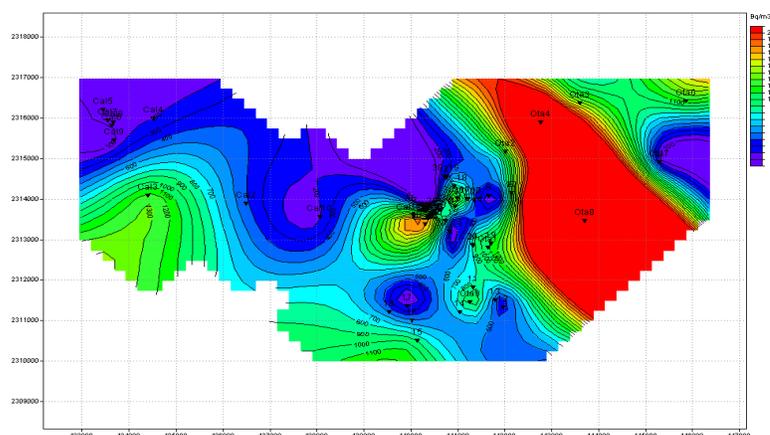


Figura 20. Gráfico de distribución de mediciones de <sup>222</sup>Rn las minas El Otatal y Calabacillas con monitor.

En la mayoría de los sitios monitriados para la evaluación de emanaciones de <sup>222</sup>Rn se han registrado altas concentraciones. Se consideró que geológicamente puede existir un intrusivo granodiorítico sin afloramiento y que esté encajonado en cualquier formación.

Continuando con la evaluación del <sup>222</sup>Rn, se realizó un estudio ambiental intramuros en 5 casas de la comunidad Agua de Venado que se encuentran ubicadas alrededor de donde se encontró la anomalía.

### 2.5.3 Estudio ambiental intramuros con monitor RTM1688-2 y con detectores scout

Este estudio se realizó en dos períodos y en temporadas diferentes. Para los detectores scout el tiempo de medición fue 15 días para el primer periodo y para el segundo periodo, 18 días. Los detectores scout se colocaron en espacios cerrados y en el piso. En lo que respecta al monitor RTM1688-2 las mediciones se realizaron con la metodología anteriormente descrita y se tomaron las lecturas de suelo y agua el día en que se colocaron los detectores scout.

Para este estudio ambiental de intramuros se seleccionaron 5 casas, éstas se definieron con un radio promedio de 100 m de la casa donde se encontró la anomalía.

#### 2.5.3.1 Mediciones primer período con monitor RTM1688-2

En la Tabla 7 se observan las mediciones de emanación de <sup>222</sup>Rn del primer período que corresponde a de junio 2010; el valor mayor detectado en <sup>222</sup>Rn corresponde a la casa 3 con 5254 Bq/m<sup>3</sup> que se encuentra ubicada a unos 50 m donde se encontró la anomalía de radón.

En lo que respecta a las muestras de agua de la llave, la casa 3 tiene un valor de <sup>222</sup> Rn de 4910 Bq/m<sup>3</sup>:

Tabla 7. Mediciones de radón con monitor en período junio del 2010.

Primer período Junio 16 2010	Coordenadas		Altura M	Nα s <sup>-1</sup>	Th s <sup>-1</sup>	Rn Bq/m <sup>3</sup>	T 0 C	Hum %
Hotel suelo	441327	2312859	2428	260	16	1375	25	51
Hotel agua del tinaco	441327	2312859	2428	257	3	1359	22	54
Hotel agua del aljibe	441327	2312859	2428	249	5	1317	21	58
Hotel agua de la llave	441327	2312859	2428	225	4	821	21	57
Casa # 1(Scout #198) suelo	440442	2313638	2411	287	40	1190	21	59
Casa #1 agua	440442	2313638	2411	191	6	1100	21	58
Casa # 2(Scout #091) suelo	440597	2313726	2439	993	33	1518	23	54
Casa # 2 agua	440597	2313726	2439	928	7	1010	22	58
Casa # 3(Scout #147) suelo	440357	2313527	2454	58	61	5254	21	62
Casa # 3 agua	440357	2313527	2454	138	6	4910	21	61
Casa #4 (Scout #090) suelo	440434	2313586	2441	80	18	306	16	83
Casa # 4 agua	440434	2313586	2441	87	8	730	19	69
casa# 5 suelo	441327	2312859	2428	142	33	423	16	81
Casa # 5 agua	441327	2312859	2428	123	1	460	18	73
Restaurant agua	442255	2312963	2427	122	4	751	16	86

Los primeros 4 datos de la Tabla 7 son mediciones del hotel que se encuentra ubicado en el centro de la cabecera municipal de San Joaquín. Estas mediciones se hicieron con la finalidad de observar si existía diferencia significativa con el resto del estudio. Las concentraciones medidas en suelo del hotel fue de 1375 Bq/m<sup>3</sup>; en lo que respecta a las muestras de agua, La mayor fue una muestra de agua de aljibe con 1317 Bq/m<sup>3</sup>.

### 2.5.3.2 Mediciones con detectores scout, primer período

Los detectores scout se colocaron solo en cuatro casas, en estas debido a que solo se tenían estos equipos disponibles para esta investigación.

En la Figura 21 se presenta la gráfica A que representa la medición de la casa 1 en cual detectó una máxima de 159 Bq/m<sup>3</sup>, teniendo un promedio de 60 Bq/m<sup>3</sup>. La gráfica B corresponde a la medición de la casa 2, la concentración mayor detectada fue de 150 Bq/m<sup>3</sup>. La gráfica C corresponde a la medición de la casa 3; se observa que la máxima concentración fue de 100 Bq/m<sup>3</sup>, con un promedio de 120 Bq/m<sup>3</sup>. Por último, la gráfica D corresponde a la casa 4 con concentraciones detectadas que van de 180 Bq/m<sup>3</sup> a 400 Bq/m<sup>3</sup>. Como se muestran en las gráficas se puede observar que las variables temperatura y humedad tienen una correlación con respecto a las mediciones detectadas de <sup>222</sup>Rn.

En la Figura 22 se muestra la gráfica de integración de mediciones de <sup>222</sup>Rn del primer período con los scout, donde se puede observar que la casa 4 detecta mayor concentración, ubicada a unos 50 m de donde se registró la anomalía.

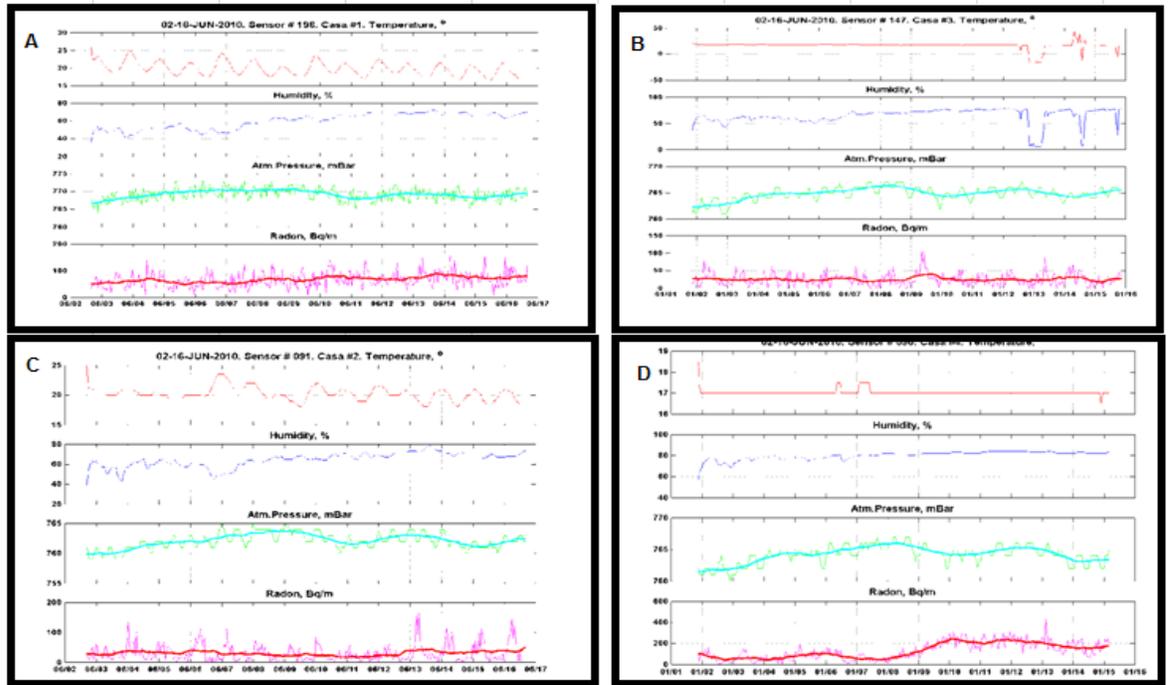


Figura 21. Gráficas de medición de <sup>222</sup>Rn con equipos scout; primer período.

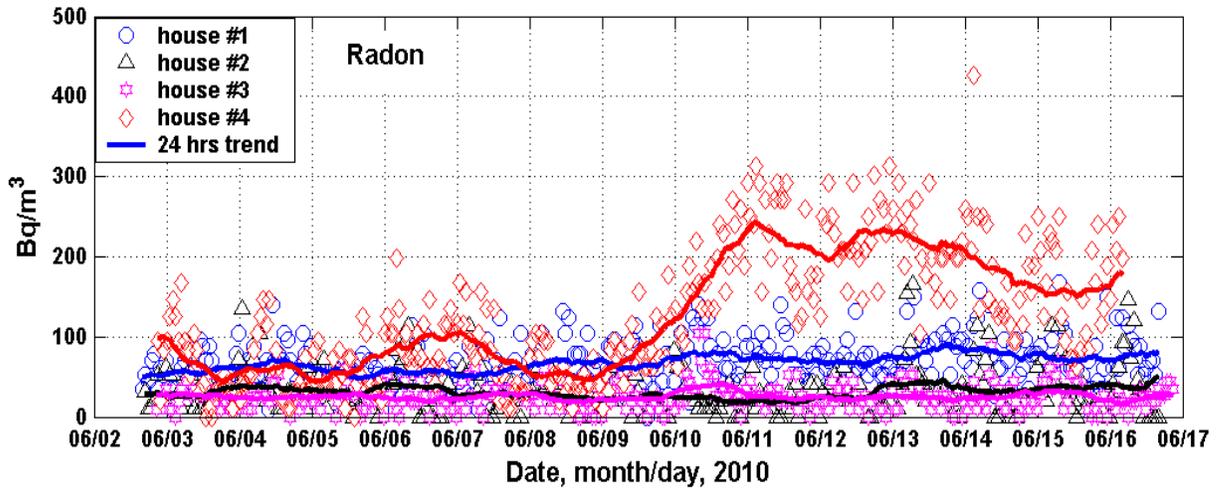


Figura 22. Gráfica de promedios del primer período con Scout.

### 2.5.3.3 Mediciones segundo período con monitor RTM1688-2.

Para este segundo período febrero 2011 se volvió a medir la concentración de <sup>222</sup>Rn en las mismas casas que que en el primer período; también se midió en la casa donde se encontró la anomalía de <sup>222</sup>Rn.

En la Tabla 8 se encuentran los datos de las mediciones realizadas en el segundo período. En la casa del Sr. Moisés (anomalía) se realizaron mediciones de suelo en el jardín, agua de la llave y aire. La cantidad de <sup>222</sup>Rn detectada es de 650 Bq/m<sup>3</sup> para suelo y 645 Bq/m<sup>3</sup> agua, mientras que para el aire solo se registró 79 Bq/m<sup>3</sup>. El valor mayor de concentración de <sup>222</sup>Rn de las 5 casas monitoreadas corresponde a la casa 3, el valor para suelos fue de 2677 Bq/m<sup>3</sup> y de agua 1999 Bq/m<sup>3</sup>.

Tabla 8. Mediciones de <sup>222</sup>Rn con espectrómetro en período febrero del 2011.

Segundo período 1 feb. 2011	Coordenadas	altura M	Na s <sup>-1</sup>	Th s <sup>-1</sup>	Rn Bq/m <sup>3</sup>	T 0 C	Hum %
Moy suelo jardín	440434 2313586	2441	15	4	650	18	71
Moy agua	440434 2313586	2441	15	1	645	18	74
Casa # 1(Scout #198) suelo	440442 2313638	2411	107	7	79	23	19
Casa #1 agua	440442 2313638	2411	85	2	137	20	23
Casa # 2(Scout #091) suelo	440597 2313726	2439	506	8	566	24	17
Casa # 2 agua	440597 2313726	2439	308	6	449	24	15
Casa # 3(Scout #147) suelo	440357 2313527	2454	144	32	2677	24	18
Casa # 3 agua	440357 2313527	2454	123	24	1999	23	23
Casa #4 (Scout #090) suelo	440434 2313586	2441	149	13	1629	21	22
Casa # 4 agua	440434 2313586	2441	36	1	762	18	27
casa# 5 suelo	441327 2312859	2428	39	6	788	18	30
Casa # 5 agua	441327 2312859	2428	24	0	190	18	32
Restaurant WATER	442255 2312963	2427	32	3	206	17	34

### 2.5.3.4 Mediciones segundo período con detectores scout

Se dejaron los equipos scout para la medición de la concentración de <sup>222</sup>Rn en las cuatro casas que se monitorearon en el primer período.

En la Figura 23 se observan las gráficas de las cuatro casas. En la gráfica A se observa las mediciones de la concentración de <sup>222</sup>Rn en la casa 1, el valor más elevado es 120 Bq/m<sup>3</sup> y un valor medio de 50 Bq/m<sup>3</sup>. En la gráfica B corresponde a la casa 2, se muestra el registro del

<sup>222</sup>Rn con concentración de 410 Bq/m<sup>3</sup> y un promedio de 180 Bq/m<sup>3</sup>. La gráfica C representa la casa 3 y se observa que se obtuvieron concentraciones de <sup>222</sup>Rn de 500 Bq/m<sup>3</sup>, con un valor promedio de 220 Bq/m<sup>3</sup>. En la gráfica D se puede observar que la concentración de radón tuvo valores máximos de 430 Bq/m<sup>3</sup> y un promedio de 210 Bq/m<sup>3</sup>.

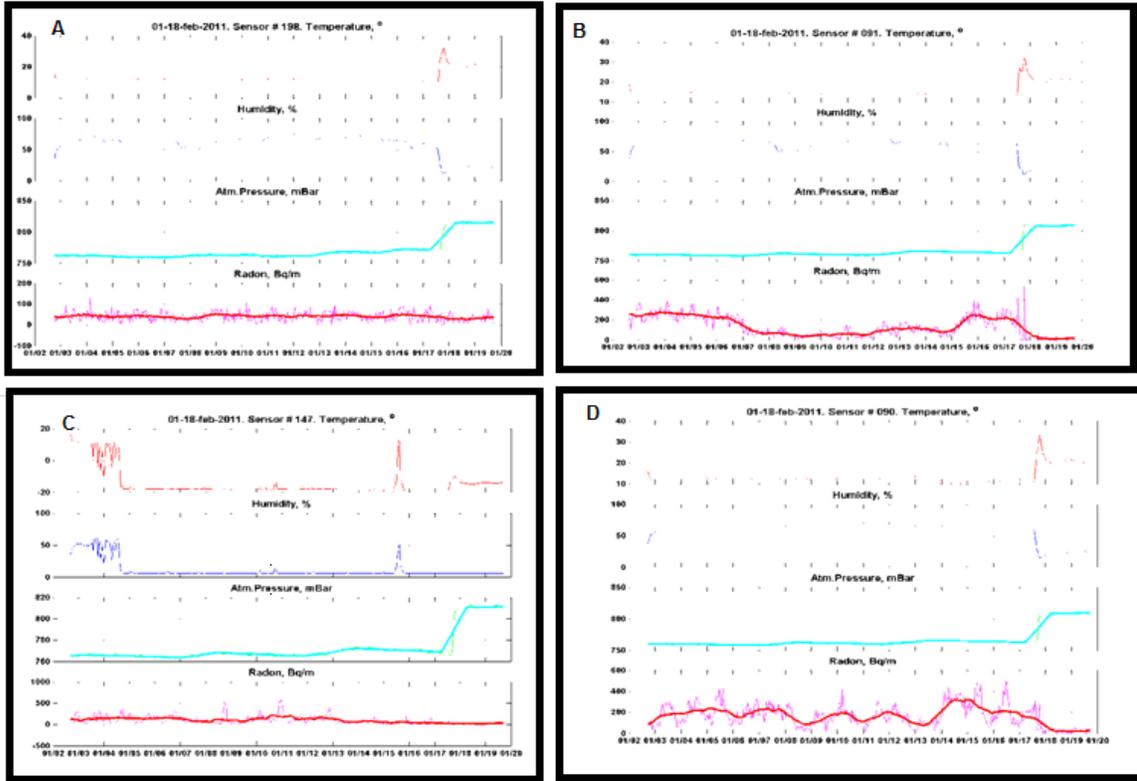


Figura 23. Gráficas de medición de <sup>222</sup>Rn con equipos scout; segundo período

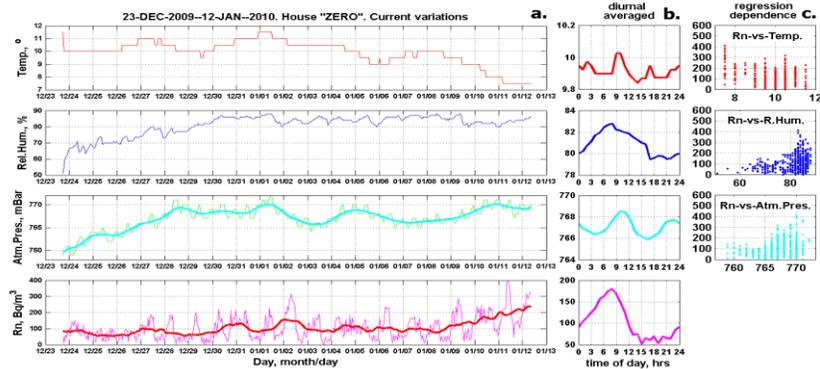


Figura 24. Gráfico de medición de <sup>222</sup>Rn con equipos scout de la casa del Sr. Moisés en Agua de Venado; segundo período.

En la Figura 24 se puede observar las mediciones de <sup>222</sup>Rn con detector scout, cuya concentración máxima registrada fue de 400 Bq/m<sup>3</sup> y una mínima de 130 Bq/m<sup>3</sup>. En la parte derecha de la gráfica se presentan los gráficos donde se hizo una relación de variables con respecto a las mediciones de gas radón, y se observa que la humedad y la presión son variables que tienen una relación con respecto a la emanación de gas radón, mientras que la temperatura no tiene relación.

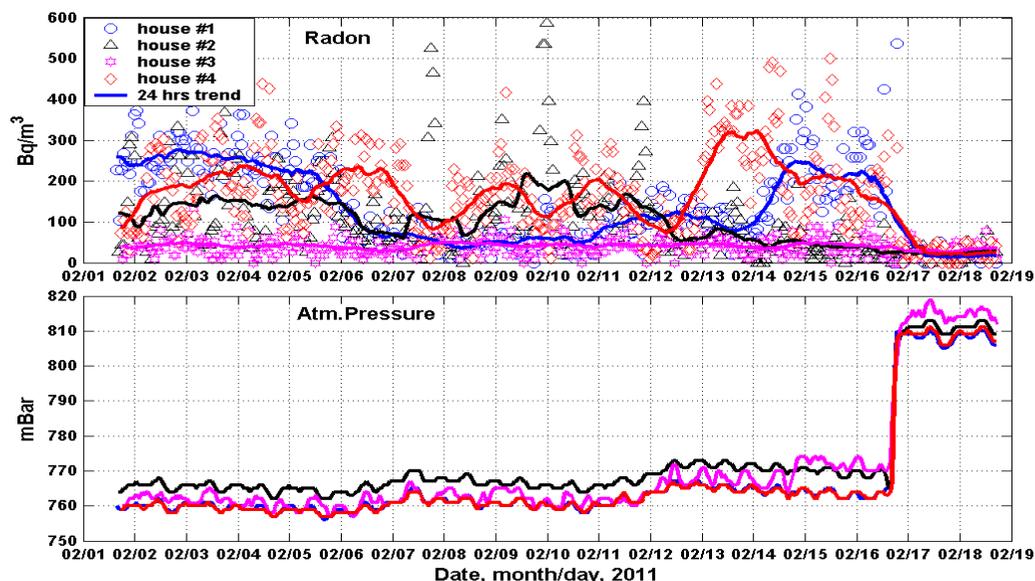


Figura 25. Gráfica de promedios del primer período con Scout.

En la Figura 25, se muestra el promedio de las concentraciones de radón que se midieron en las casas durante el segundo período. Se observa que la máxima medición corresponde a 400 Bq/m<sup>3</sup>; esta concentración corresponde a la casa del Sr. Moisés donde se encontró la anomalía de <sup>222</sup>Rn.

En el segundo período se registraron concentraciones de <sup>222</sup>Rn más elevadas que en el primero. Se considera que las concentraciones de radón fueron más elevadas debido a que es época de frío y no existe mucha ventilación en las casas por lo que se conserva la temperatura generando una depresión y creando un campo de presiones que favorece la emanación de gas radón.

#### 2.5.4 Validación de calibración de detectores

Se realizó una medición de 19 días en el observatorio del Campus Juriquilla tomando en cuenta las condiciones climatológicas para semejarlas a las del sitios de muestreo, verificando que el detector activo (scout) tuviera un espacio razonable con respectivo a las paredes, pisos, techos y que no hubiera corrientes de aire para simular una correspondencia con los lugares donde se realizaron las mediciones. No se hizo la calibración del equipo en el sitio de muestreo debido a

que, el dejar los 4 equipos originaba mayores costos; además, se tenía una investigación a la par y se complicaba mucho la salida al campo. Se tomaron 4 equipos al azar para verificar el rango de medición de los 8 que se tenían para este mismo fin. Los equipos que se utilizaron para las mediciones de radón tienen los siguientes códigos: 147, 148, 149, 090. En la Figura 26, se observa cómo los 4 equipos scout utilizados para la calibración coinciden en las mismas mediciones de humedad, temperatura y presión.

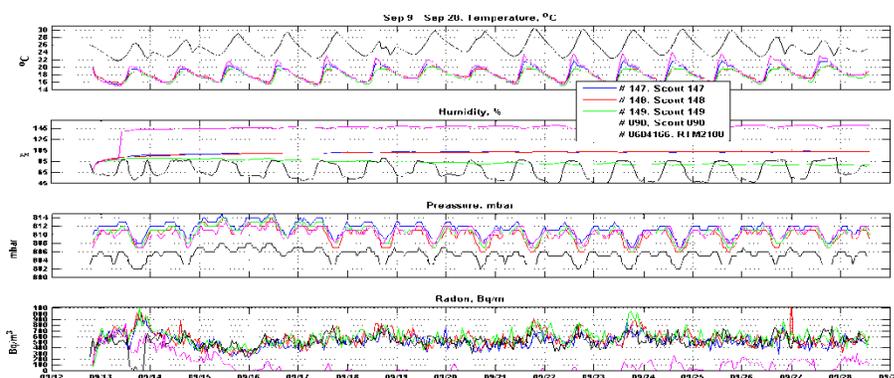


Figura 26. Calibración de equipos scout

En la Figura 27 se muestra las concentraciones obtenidas de radón, medias para un período de 7 días con los equipos 091 y 198. El sitio de medición fue en el observatorio UNAM-Campus Juriquilla, Qro. Se demuestra que los equipos que se utilizaron en el proyecto funcionan correctamente.

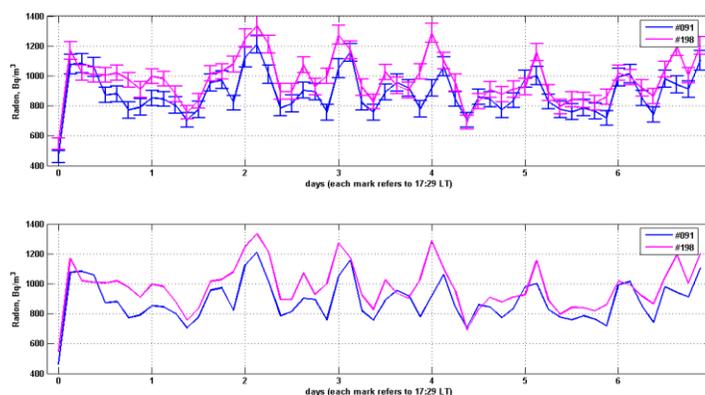


Figura 27. Medición de radón en el observatorio del Campus UNAM-Juriquilla, Qro

En el sitio Tlamacas se hizo una corrida experimental con los scout de radón, para comprobar que los detectores con código, 090, 091, 147, 148, y 198 tuvieran el mismo nivel de medición; los parámetros que se utilizaron fueron 2 días por cada media hora.

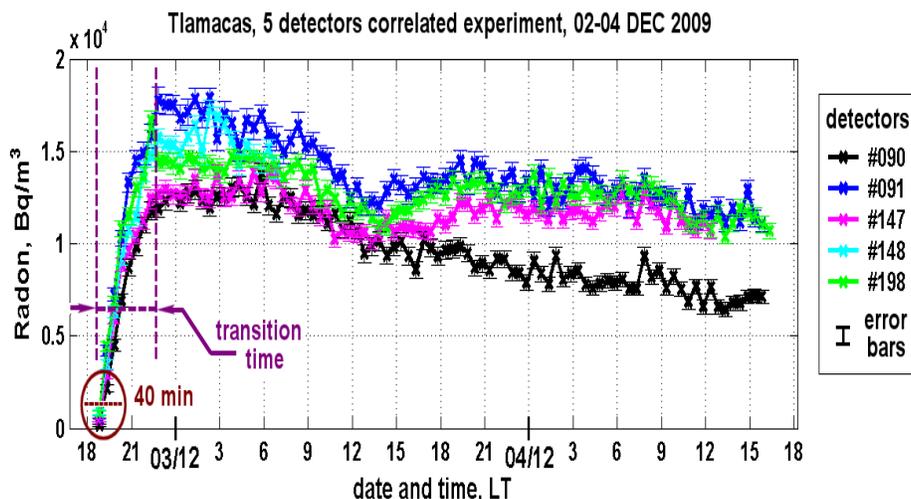


Figura 28. Medición de 5 equipos scout

## 2.5.5 Validación de calibración de monitor *RTM1688-2*

### 2.5.5.1 Pruebas de medición en el laboratorio

Para la calibración de este equipo se realizaron pruebas ambientales en el laboratorio de Edafología del Centro de Geociencias Campus UNAM-Juriquilla, Querétaro, lugar cerrado con pocas corrientes de aire. Se realizaron diferentes corridas de medición de aire atmosférico para diferentes intervalos de tiempo. El tiempo de medición del monitor fue 20 min a la misma hora todos los días (13:00 hrs). Se hicieron 3 réplicas por día durante 5 días. Este equipo se debió someter a una cámara hermética que almacenaba mineral <sup>238</sup>U con la finalidad de ver el rango de respuesta con respecto a este detector y su comportamiento. Este paso no se realizó por falta de tiempo. Pero esto no indica que el monitor no esté calibrado o dé resultados erróneos; este paso se hace solo para corroborar que los datos sean confiables.

En la Figura 29 se muestra la gráfica con la línea de tendencia cuyo valor de la  $R^2$  es de 0.747, lo que significa que tiene una confiabilidad del 72%, considerada como aceptable. Además de estas mediciones, al adquirir el equipo este viene con un certificado de validación de las mediciones que se anexa al final de la tesis.

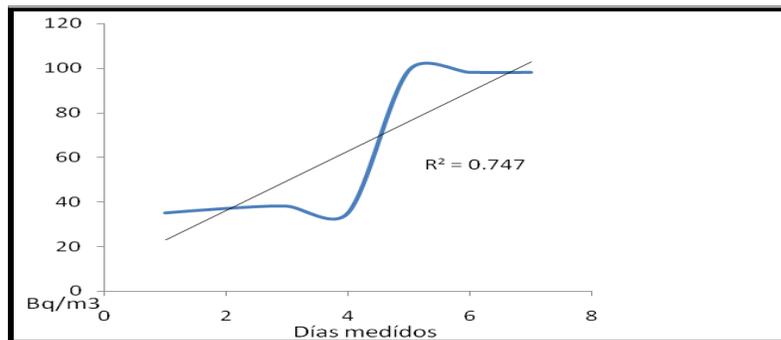


Figura 29. Grafica de calibración de monitor.

### 2.5.6 Relación de concentración de <sup>222</sup>Rn con respecto a la geología de la zona de estudio

Se realizó un estudio de variación estacional de las concentraciones de radón en aire atmosférico en el Distrito Minero de San Joaquín con relación al marco geológico local. Como lo muestra el mapa de la Figura 30, la geología del área está representada por formaciones marinas mesozoicas jurásicas (Formación Las Trancas) y cretácicas (Formaciones El Doctor, Cuesta del Cura-Tamaulipas y Soyatal-Mezcala), así como pequeños cuerpos intrusivos paleógenos (Granodiorita Santo Entierro, por ejemplo) encajonados en las formaciones mesozoicas. El muestreo realizado impactó especialmente las formaciones Cuesta del Cura-Tamaulipas y Soyatal-Mezcala.

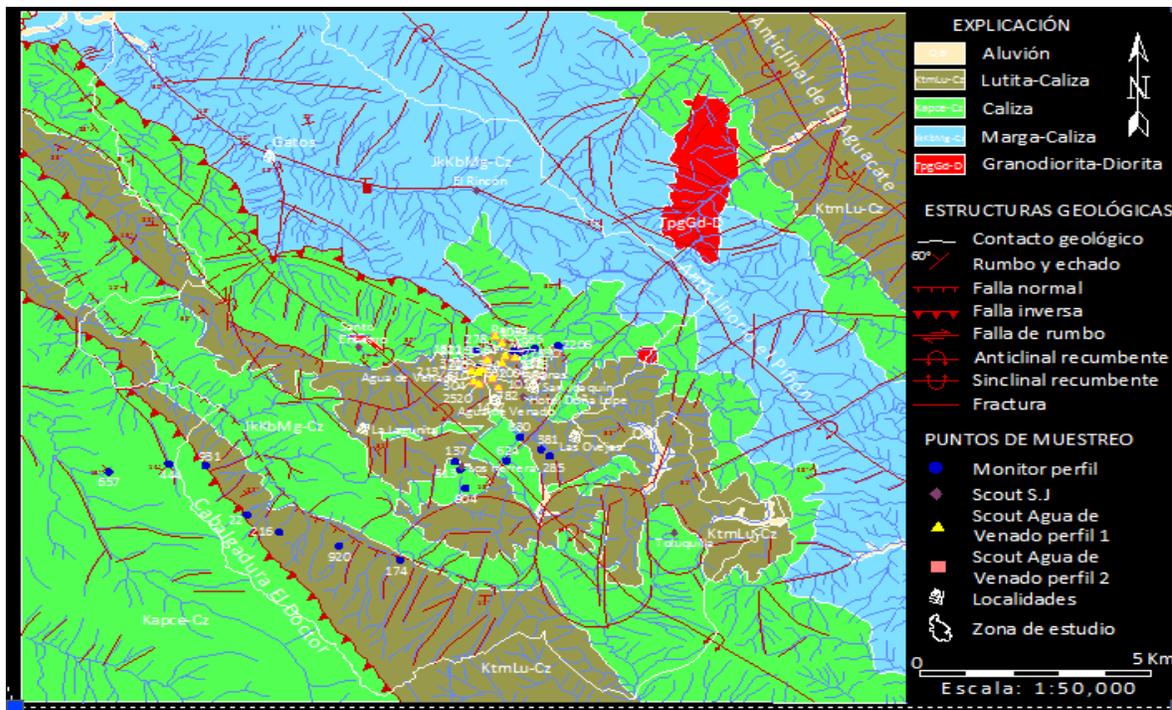


Figura 30. Mapa geológico con puntos de muestreo con scout y monitor RTM1688-2

Desde el punto de vista estructural, además de los plegamientos (anticlinales y sinclinales) en las rocas marinas mesozoicas, el área está afectada por estructuras tectónicas posteriores que se presentan como fallas normales y un intenso fracturamiento subvertical. La mineralización del área está relacionada directamente con el magmatismo paleógeno. Fue favorecida por el fracturamiento y fallamiento para generar los dos tipos de yacimientos hidrotermales que existen: hidrotermal y skarn. La mineralización del mercurio se encuentra en los yacimientos tipo hidrotermal (epitermal). El oro, la plata, el cobre y el zinc entre otros, pertenecen a los yacimientos de tipo skarn, cuyo único yacimiento está relacionado con la granodiorita de Santo Entierro.

En el mapa geológico Figura 30, se puede observar que existen varias fracturas y fallas donde se hicieron las mediciones con los detectores scout y monitor, teniendo mediciones de <sup>222</sup>Rn a una concentración elevada. Se puede relacionar la geología con las concentraciones detectadas y se puede inducir que el tectonismo se está desarrollando con mayor intensidad y a ello se asocia una mayor permeabilidad del sitio.

En la Figura 30, se observa que existe afloramiento del intrusivo granodiorítico; éste tiene relación con la radiactividad natural que forma parte del medio ambiente y existe la posibilidad que las concentraciones elevadas de radón detectadas estén asociadas a este intrusivo y por ende, a una mayor radiactividad, La latitud es determinante de la dosis recibida y quienes viven en las grandes alturas reciben dosis mucho más elevadas de radiación (Puig, 2006)

Se registraron valores de detección de 1006 hasta valores de 230 Bq/m<sup>3</sup>, que pueden tener asociación por el sistema de fracturamiento localizado en esta zona.

Las mediciones de concentración de <sup>222</sup>Rn que se detectaron en las minas abanadas están situadas en las dos formaciones geológicas anteriormente mencionadas, que se encuentran ubicadas en dos tipos de yacimientos minerales; de tipo hidrotermal y tipo skarn. La mineralización del mercurio se encuentra en los yacimientos tipo hidrotermal como es el caso de la mina El Rincón en la que se detectó una concentración de 850Bq/m<sup>3</sup>. Otro ejemplo es la mina Santo Entierro San Juan Nepomuseno de tipo skarn en donde se registraron concentraciones de 2400Bq/m<sup>3</sup>; estos dos tipos de yacimientos podrían tener una relación con el magmatismos granodiorítico que se encuentra en esta región ya que en la aureola de metamorfosis es donde se encuentra la mineralización del cinabrio y por ende, existe un mayor fracturamiento de las vetas de los minerales encajonados a éstas.

La población Agua de Venado y el sitio arqueológico Ranas son los sitios donde se detectaron mayor concentración de radón con valores que van desde 22150 a 60000 Bq/m<sup>3</sup>. Es posible que el magmatismo de origen Paleogeno-Neogeno que constituye el vulcanismo de la región sea generador por las concentraciones detectadas de radón debido a la composición química del intrusivo. Los intrusivos granodioríticos están enriquecidos con Sn radiactivo y con algunos elementos de tierras raras como lo es el Uranio que es radiactivo que da el origen del radón.

### 2.5.7 Con un modelo teórico se determinó la velocidad de los gases en el subsuelo mediante las variaciones de la concentración de gas radón

De la superficie terrestre se escapan emisiones gaseosas que son el resultado de la difusión o del transporte convectivo debido a las diferencias de presión. Estas emisiones se componen principalmente por vapor de agua, dióxido de carbono y algunas especies químicas volátiles, presentes a nivel de trazas como es el helio y el radón. Se han realizado algunas investigaciones en la relación a estos gases que coinciden con el estudio de la concentración de los mismos a profundidades, con el fin de encontrar una relación con eventos de origen sísmico o volcánico (García-Vindas et al., 2000, Notsu et al., 1991, King, 1984). Cuando se mide directamente la componente convectivo del flujo total existe una gran dificultad debido a la baja sensibilidad de los instrumentos de medida, ya que no son capaces de medir la velocidad de los gases presentes en el subsuelo que es de orden de  $10^{-4}$  -  $10^{-6}$   $\text{ms}^{-1}$ . Con este modelo teórico se propone calcular la velocidad de los gases en el subsuelo, utilizando el gas radón como trazador. Se pretende mostrar cómo, a través de las variaciones de la concentración de radón, se puede determinar teóricamente la velocidad del flujo que lo transporta. Se tomó como referencia el estudio de (García-Vindas et al 2000). En esta investigación se estableció que las anomalías en la concentración de radón se debe a cambios de flujo convectivo de éste, que es producto de la migración de fluidos presurizados que lo transporta a la superficie.

Como aplicaciones de este método se utilizan dos zonas geológicas diferentes: Soyatal-Mezcala y El Doctor en San Joaquín, Querétaro.

#### Cálculo de la velocidad a partir de las variaciones en la concentración de radón

Se consideró al suelo como un medio poroso, homogéneo e isotrópico a través del cual el radón se transporta por difusión y por convección hacia la superficie. Considérese entonces que en un intervalo de tiempo dado, el flujo total (convectivo + difusivo) se encuentra en estado estacionario, de manera que la concentración de radón se rige por la siguiente ecuación (Clements y Willkening, 1974):

$$\frac{D}{\varepsilon} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{V}{\varepsilon} \frac{\partial C}{\partial z} - \lambda C + Q \quad (1)$$

**Donde:**

**C**= representa la concentración de radón ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ), **D**=es el coeficiente de difusión ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ), **V**=velocidad de Darcy ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ),  **$\varepsilon$** = la porosidad del medio y  **$\lambda$** =la constante de desintegración de radón ( $\text{s}^{-1}$ ). Las variaciones en la concentración se dan en la coordenada z, siendo ésta la coordenada vertical de manera que se considera que hay simetría en XY.

Para resolver la ecuación (1), se consideran las condiciones fronteras

$$C(z=0) = 0, \quad (z = 0 \text{ representa la superficie del suelo}) \quad (2)$$

$$C(z=\infty) = C_{\infty}$$

De la ecuación (2) se establece que la concentración de radón en la superficie del suelo (interface suelo-atmósfera) es siempre nula debido a que ahí es varios órdenes de magnitud más pequeña que la concentración del suelo. También se considera que a grandes profundidades ésta permanece constante de acuerdo con el trabajo de (Fleischer and Mogro-Campero 1979).

La solución de la ecuación (1) tomando en consideración las condiciones fronteras determinadas en (2) se da de la siguiente manera.

$$C(z) = C_{\infty}(1 - e^{-Az}) \quad z > 0 \quad (3)$$

Donde A es:

$$A = \frac{V}{2D} + \sqrt{\frac{(V)^2}{(2D)^2} + \frac{\lambda \varepsilon}{D}} \quad (4)$$

Se considera que en un intervalo de tiempo la concentración de radón en cada punto z satisface la ecuación (3) con una velocidad constante  $v=v_1$  de manera que la concentración medida en un punto tal como  $z = -1$  m (a esta profundidad se acostumbra medir generalmente la concentración de radón en el suelo) se expresa como:

$$C_1 = C_{\infty}(1 - e^{-A_1}) \quad (5)$$

En la ecuación (5)  $A_1$  es función de  $V_1$ :

$$A = \frac{V_1}{2D} + \sqrt{\frac{(V_1)^2}{(2D)^2} + \frac{\lambda \varepsilon}{D}} \quad (6)$$

Si el sistema permanece en este estado durante un largo tiempo de manera que la concentración en  $z = -1$  m presenta únicamente fluctuaciones estadísticas alrededor de un valor medio igual a  $C_1 = C(z = -1 \text{ m})$  y, si en un instante dado, la componente convectiva de flujo total varía debido a una fluctuación en la velocidad de transporte, la concentración de radón en cada punto y por consiguiente en  $z = -1$  m, entonces cambiaría (Fleisher and Mogro-Campero, 1979). Por lo tanto, la concentración en  $z = -1$  m pasa de  $C_1$  a un nuevo valor  $C_2$  y de la ecuación (3) se obtiene:

$$C_2 = C_{\infty}(1 - e^{-A_2}) \quad (7)$$

Donde  $A_2$  se determina a partir de la ecuación (6) al sustituir  $V_1$  por  $V_2$ .

El sistema permanece como anteriormente en este estado, durante un largo período, con su concentración en  $z = -1$  m oscilando estadísticamente alrededor de valor  $C_2$ . El problema

consiste en determinar  $V_2$  a partir de  $V_1$ ,  $C_1$  y  $C_2$ . Esto se logra combinando las ecuaciones (5) y (7) para obtener:

$$V_2 = D|B| - \frac{\lambda\varepsilon}{|B|} \quad (8)$$

Dónde:

$$B = \ln \left[ 1 - \frac{C_2}{C_1} (1 - e^{-A_1}) \right] < 0 \quad (9)$$

En la ecuación (9) las cantidades de  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $D$ ,  $\varepsilon$  y  $\lambda$  se pueden estimar o medir; además, se parte de que la velocidad  $V_1$  es una cantidad conocida.

Si se considera ahora el caso más simple, cuando  $V_1 = 0$  el flujo inicial sería puramente difusivo, entonces  $A_1$  estaría dado como:

$$A_1 = \sqrt{\frac{\lambda\varepsilon}{D}} \quad (10)$$

y la velocidad  $V_2$  se expresa de la siguiente forma:

$$V_2 = D \left| \ln \left[ 1 - \frac{C_2}{C_1} \left( 1 - e^{-\sqrt{\frac{\lambda\varepsilon}{D}}} \right) \right] \right| - \frac{\lambda\varepsilon}{\left| \ln \left[ 1 - \frac{C_2}{C_1} \left( 1 - e^{-\sqrt{\frac{\lambda\varepsilon}{D}}} \right) \right] \right|} \quad (11)$$

De la ecuación (9) se toma el argumento de que el logaritmo será menor que 1 siempre y cuando  $C_2 < C_1$ , la razón entre el coeficiente de difusión y la porosidad deben de satisfacer la siguiente condición:

$$\frac{D}{\varepsilon} > \frac{\lambda}{\left[ \ln \left( 1 - \frac{C_1}{C_2} \right) \right]^2} \quad (12)$$

Cuando se conoce el valor de la porosidad, la ecuación (12) suministra una condición necesaria que debe cumplir el coeficiente de difusión cuando se realizan los cálculos.

De acuerdo con la ley de Darcy, la velocidad de transporte se expresa en función del gradiente de presión como:

$$V = -\frac{k\partial P}{\mu\partial z} \quad (13)$$

Dónde:  $k$  es la permeabilidad del medio en  $\text{m}^2$ ,  $\mu$  la viscosidad del fluido en (Pas); en este caso es una mezcla gaseosa y por último,  $P$  representa la presión del fluido (Pa).

Si combinamos las ecuaciones (11) y (13) se tiene:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\mu}{k} \left\{ \frac{\lambda\varepsilon}{\ln\left[1 - \frac{C_2}{C_1}\left(1 - e^{-\sqrt{\frac{\lambda\varepsilon}{D}}}\right)\right]} - D \ln\left[1 - \frac{C_2}{C_1}\left(1 - e^{-\sqrt{\frac{\lambda\varepsilon}{D}}}\right)\right]} \right\} \quad (14)$$

La ecuación (14) permite calcular el gradiente de presión al cual está sometido el fluido, conociendo de antemano la permeabilidad y la viscosidad.

### 2.5.7.1 Aplicación del método utilizando datos de campo

Para la aplicación del modelo teórico que se describió anteriormente se escogieron dos casos de zonas diferentes en las cuales se midió la concentración de radón en el suelo, a casi un metro de profundidad y en intervalos de 1 hora. Estas mediciones se realizaron con detectores scout.

Se presenta el primer caso con los datos obtenidos de la mina El Rincón que corresponde a la Formación El Doctor, que se encuentra ubicada en una cabalgadura de fracturas y fallas con rumbo NS. Los yacimientos están encajonados en rocas calizas cuya mineralización se aloja en las fracturas y fallas formando vetas, por lo que ésta ocurre por los fluidos hidrotermales calientes relacionados con el magmatismo Paleógeno–Neógeno. Para este caso  $C_1 = 950 \text{ Bq/m}^3$ ,  $C_2 = 650 \text{ Bq/m}^3$  (Fig. 31). Estos valores fueron obtenidos promediando los datos en cada uno de los intervalos mostrados en la Figura 35. La porosidad del suelo se calculó en el Laboratorio de Edafología, del Centro de Geociencias, Campus UNAM-Juriquilla, Querétaro (Anexo 1). El valor obtenido de los promedios de la porosidad fue de 0.23. El valor del coeficiente de difusión corresponde a  $8.5 \times 10^{-6}$  (Anexo 2. Cálculos). Se asume que la concentración  $C_1$  obedece a un estado puramente difusivo ( $V_1=0$ ); de la ecuación (11) se obtiene el valor de  $V_2 = -1.6 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ . El signo negativo indica que la dirección de flujo es hacia el interior de la superficie del suelo.

Para el segundo caso se muestra una serie de datos bajo las mismas condiciones del ejemplo anterior. Recordando que la comunidad de Agua de Vendados es donde se encontró la anomalía de la emanación de gas radón con los valores  $C_1=370 \text{ Bq/m}^3$  y  $C_2=250 \text{ Bq/m}^3$  de la Gráfica 32. Para este sitio se tomaron las mismas condiciones de porosidad y difusividad el cual

está en concordancia de la ecuación (12). Partiendo de la suposición de que el estado inicial es un estado puramente difusivo ( $v_1=0$ ) se obtiene el valor de  $V_2= -1.6 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ .

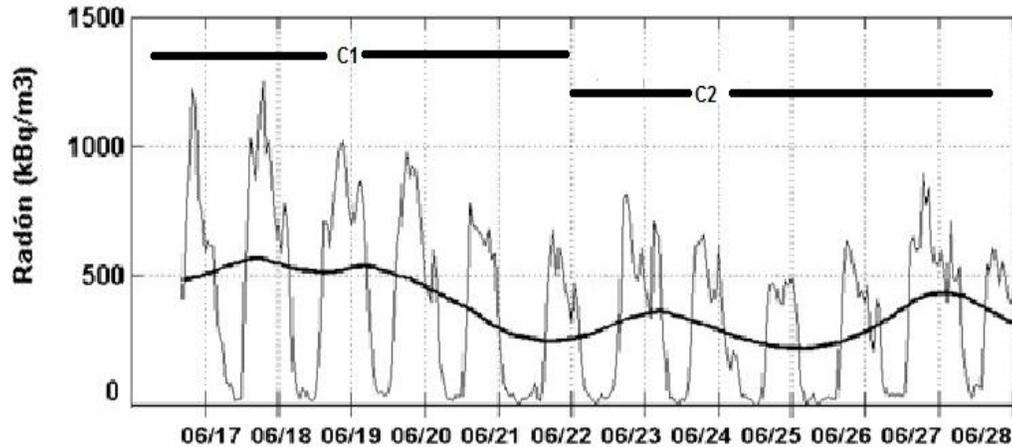


Figura 31. Concentración de radón de la mina El Rincón, se presenta la gráfica con tendencia de datos calculados con el método de media móvil para un período de 12 días en lapsos de 1 hora.

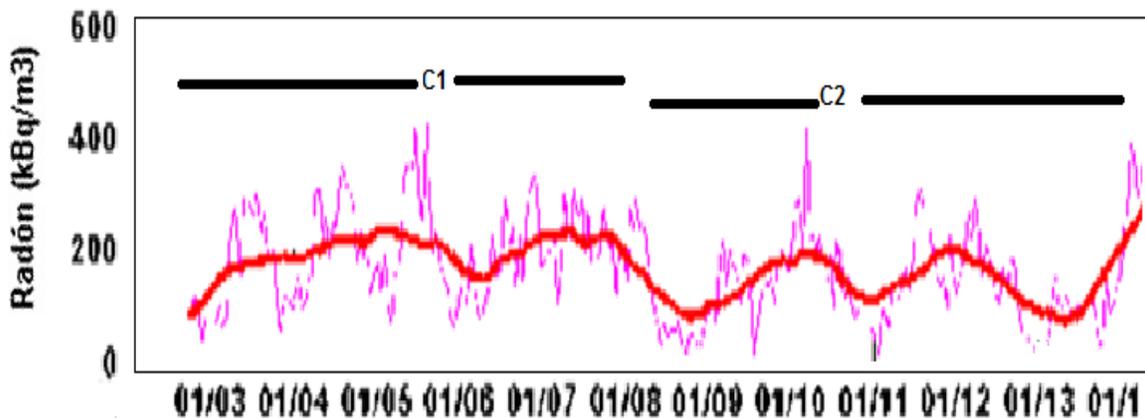


Figura 32. Concentración de radón del sitio Agua de Venado, se presenta la gráfica con tendencia de datos calculados con el método de media móvil para un período de 12 días en lapsos de 1 hora.

El método expuesto en este trabajo constituye una herramienta práctica para solventar el problema de la medición de las velocidades de transporte de los gases en el suelo. Como se menciona en al inicio del apartado 2.5.7 este tipo de mediciones es casi imposible de realizar, debido a que las velocidades de los gases son muy pequeñas ( $10^{-4} - 10^{-6}$ ) para que puedan ser medidas con precisión.

Si se dispone de los valores de la porosidad del suelo y del coeficiente de difusión es factible obtener la velocidad del gas, si se consideran que estos parámetros no cambian con el tiempo y que además, el sistema se encuentra en estado estacionario. Si se asume un estado inicial puramente difusivo, entonces la velocidad del gas viene dada por la ecuación (11). Por otro lado, si se conocen los valores de permeabilidad y viscosidad del medio, es posible calcular el gradiente de presión que origina el movimiento de gas, esto se hace con la ecuación (14)

La ecuación (12) constituye una restricción importante al valor del coeficiente de difusión y es un indicativo para valorar si la condición de estado difusivo puro se puede aplicar a un caso dado. Además mediante un análisis más detallado, basado en la restricción, se puede obtener también la velocidad  $V_1$ .

De los dos casos estudiados se encuentran dentro del intervalo de las velocidades mencionadas. El gas puede viajar hacia dentro o afuera de la superficie transportando al radón e la misma velocidad.

## CAPITULO III

### 3. MERCURIO DERIVADO DEL CINABRIO

El cinabrio (HgS) es el mineral de mena más importante para la obtención de mercurio. El metaloide se obtiene triturando el cinabrio (contenido de Hg 86,2%) y posteriormente calentando en un horno a unos 700<sup>o</sup> C en una corriente de aire. El mercurio representa el 8,5x10<sup>-6</sup> % en peso de la corteza. ([www.helios3000.net/me](http://www.helios3000.net/me))

El mercurio se conoce desde la antigüedad. Era conocido por los griegos y las minas de cinabrio existentes en España han sido explotadas por todos los pueblos que, históricamente, han habitado la península ibérica. Los alquimistas lo conocían también con el nombre de plata líquida. Fue descubierto como elemento, por el químico francés Antoine Laurent Lavoisier en sus experimentos sobre la composición del aire.

“Los fenicios (700 años A. C.) Utilizaban el mercurio para extraer y purificar el oro. En la India, existía la creencia de que el mercurio tenía propiedades afrodisíacas y como tal, fue utilizado en ese país. Los incas también conocían el cinabrio (al que denominaban “llampi”) y lo utilizaban como pintura. En Egipto, el mercurio fue empleado por la dinastía faraónica (1600-1500 a.C.), como lo prueba el hecho de haber encontrado mercurio- líquido-cinabrio como pintura (bermellón). Algunos de los más renombrados médicos de la antigüedad como Hipócrates lo utilizó en forma de unguento, por vía dérmica al no considerarlo tóxico (Gaona 2004).

Durante más de veinte siglos, el mercurio ha sido conocido y utilizado por diversas culturas. Su consumo se inició a finales del siglo XV. Se utilizaba en la fabricación de pinturas y medicamentos. En el siglo XVI Paracelso utilizó el mercurio como tratamiento de la sífilis; Torricellila en 1643, lo empleó en la fabricación del barómetro (Environment Health Criteria, 1991).

#### 3.1 PROPIEDADES DEL MERCURIO

Es un elemento químico con el símbolo **Hg**, número atómico 80 y peso atómico 200.59. Es un líquido blanco plateado a temperatura ambiente (punto de fusión -38.4 °C; su punto de ebullición es 357 °C. Es mal conductor del calor y buen conductor de corriente eléctrica. Es el único metal común en estado líquido a temperatura ambiente. Tiene una elevada tensión superficial, por lo que no humedece a la mayoría de las sustancias. Es bastante estable frente a los ácidos sulfúrico y clorhídrico diluidos; se disuelve en ácido sulfúrico caliente, nítrico y agua regia. Físicamente es parecido a los metales preciosos, forma fácilmente aleaciones con muchos metales, como oro, plata y estaño, denominadas amalgamas. Precisamente, la facilidad con que se amalgama con el oro se utiliza para obtener el metal precioso de sus menas. Se usa en los laboratorios, en termómetros, barómetros, bombas de difusión y otros instrumentos.

El mercurio tiene siete isótopos naturales (196, 198, 199, 200, 201, 201, 202, 204) y cuatro isótopos radioactivos inestables (194, 195, 197, 293). Tiene 3 valencias; Hg<sup>0</sup> (metálico), Hg<sup>1+</sup> (mercuroso) y Hg<sup>2+</sup> (mercúrico). Los números de oxidación del mercurio pueden formar un gran número de compuestos orgánicos e inorgánicos; sin embargo, cuando trabaja con la

valencia de +1 raramente es estable bajo condiciones ambientales normales (Fergusson 1990; (DERA Report, 2000).

El mercurio se genera de manera natural en el medio ambiente y se da en una gran variedad de sales orgánicas e inorgánicas. La mayoría de los compuestos inorgánicos están unidos por enlaces covalentes tendiendo las especies más comunes al cloruro de mercurio II ( $\text{HgCl}_2$ ), Hidróxido mercúrico ( $\text{Hg}(\text{OH})_2$ ) y sulfuro de mercurio ( $\text{HgS}$ ). Los compuestos orgánicos más comunes son: metil mercurio ( $\text{CH}_3\text{HgCl}$ ) y dimetilmercurio o fenilmercurio (EPA, 2001).

### 3.2 CICLO DEL MERCURIO

Tiene un flujo continuo entre la atmósfera, tierra y agua. Este ciclo está basado en el comportamiento del Hg en los diferentes medios, en las reacciones químicas implicadas, así como en parámetros de transporte y su destino final. En cualquier punto de la Tierra, la cantidad de mercurio presente será función de:

- El ciclo global natural
- El ciclo global perturbado por la actividad humana
- Fuentes regionales de mercurio
- Fuentes locales de mercurio

Para dar valores cuantitativos a dicho ciclo, es necesario conocer las cantidades de mercurio presentes en las diferentes reservas terrestres. Se conoce que los océanos son las mayores reservas de mercurio, con alrededor de  $10^{17}$  g de mercurio principalmente en forma de  $\text{HgS}$ . Las aguas oceánicas contendrían alrededor de  $10^{13}$ g, la misma cantidad que suelos y sedimentos conjuntamente; la biosfera, principalmente en forma de biota terrestre, contendrían  $10^{11}$ g;  $10^8$ g la atmósfera y  $10^7$ g las aguas terrestres en forma de mercurio elemental. En este balance quedaría sin embargo excluido el mercurio presente en minas y otras reservas subterráneas (Fitzgerald et al., 1994).

“La cuantificación del mercurio antropogénico es especialmente difícil debido a su gran movilidad en el medio ambiente. La comunidad científica arroja datos, muy poco coincidentes entre sí. Estudios recientes indican por ejemplo que de las aproximadamente 200,000 toneladas de mercurio emitidas a la atmósfera desde 1890, aproximadamente el 95% de encuentran en suelos terrestres, alrededor de un 3% en aguas oceánicas y un 2% en la atmósfera. También se estima que entre el 40 y el 75% del mercurio atmosférico actual tiene como origen fuentes antropogénicas”.

Mason et al., 1994, proponen los siguientes diagramas de flujo post y pre era industrial (Figura 33 a y b respectivamente).

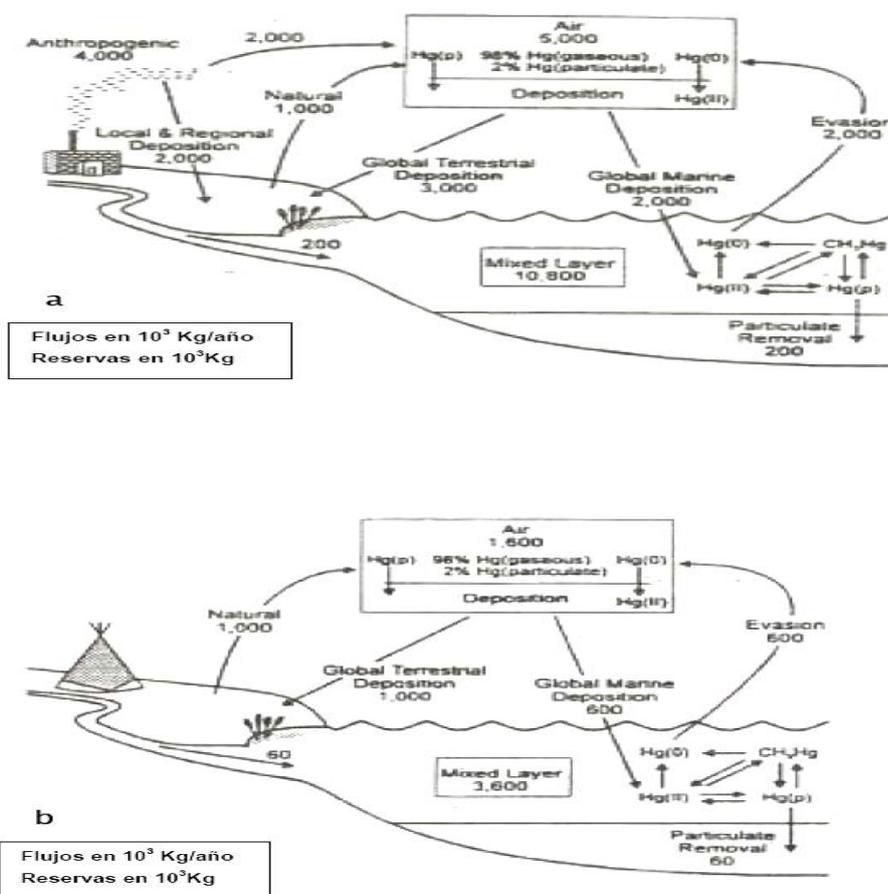


Figura 33. Diagrama de flujo de mercurio post (a) y pre (b) era industrial (Mason et al., 1994).

### 3.2.1 Distribución del mercurio

El mercurio es un contaminante global, se puede encontrar en cualquier punto de la Tierra en cantidades diferentes. En minas y otras reservas subterráneas, suele localizarse en zonas de actividad volcánica previa y está normalmente en forma de cinabrio, que es la mena más importante para la obtención de este metal. Los depósitos más famosos y extensos, que han representado la mayor reserva de mercurio en el mundo, se encuentran en Almadén (España) como primer lugar, así como en Idrija (Eslovenia) y Monte Amiata (Italia). Hay otros depósitos naturales también importantes que se encuentran en la antigua Unión Soviética, Argelia, México, EEUU (Jiménez y Gutiérrez, 1995).

### 3.2.2 Mercurio en suelos

Las especies del mercurio se derivan de las reacciones químicas y biológicas en el ambiente. Algunas condiciones son derivadas del suelo como: el pH, la temperatura, los ácidos húmicos, la materia orgánica, entre otras. Estas características son favorables para compuestos inorgánicos de Hg como  $HgCl_2$  y  $Hg(OH)_2$ . Sin embargo, no está establecido si el mercurio en los sedimentos tiene algunas formas inorgánicas. Cuando se encuentra en

sustancias orgánicas o en formas menos reactivas como HgS o HgO tienen una menor tendencia a la metilación.

Algunos compuestos inorgánicos del mercurio son bastante solubles y en consecuencia móviles; suelen formar complejos con la materia orgánica sobre todo en ácidos fúlvicos, húmicos y en las arcillas del suelo; este comportamiento limita en gran medida la movilidad del mercurio en los suelos, haciendo que éstos actúen como grandes reservas de mercurio antropogénico.

El metil-mercurio es otra especie de mercurio presente en proporciones muy pequeñas en suelos y sedimentos, pero de gran importancia en sistemas acuáticos debido a su toxicidad y capacidad para la bioacumulación. Su formación viene dada por varios procesos microbianos actuando sobre compuestos de mercurio II; su proporción media respecto al total de mercurio presente en suelos y sedimentos suele ser inferior al 1%. El metil-mercurio presenta gran afinidad por la materia orgánica; esto limita su movilidad en el medio ambiente (Bailey et al., 1999).

### 3.3 ANTECEDENTES CONTAMINACIÓN POR MERCURIO

La revolución industrial y tecnológica de los siglos XIX y XX trajo consigo un gran número de nuevas aplicaciones para el mercurio y muchos de sus compuestos, pero también otras tantas posibles vías de contaminación medioambiental y exposición ocupacional.

La primera gran señal de alarma se dio con el desastre de la bahía de Minamata (Japón), donde la planta de cloruro de vinilo y acetaldehído estuvo liberando de manera incontrolada grandes cantidades de mercurio en sus aguas residuales durante el período 1953-1960. El resultado fue un gran número de personas intoxicadas y muertas por la ingestión de pescado contaminado con metil-mercurio. Años más tarde, entre 1971-1972, más de 400 personas murieron en Irak por intoxicación con metil-mercurio (Environmental Health Criteria 101). En este caso el origen del metil-mercurio se encontraba en el grano que se había utilizado para hacer pan, el cual había sido tratado con un fungicida basado en este compuesto órgano-metálico de mercurio.

Toda esta serie de desastres sensibilizaron a la comunidad internacional, de tal forma que la Organización Mundial de la Salud (OMS) publicó en 1977 el primer libro de la serie Environmental Health Criteria (Critères d'hygiène de l'environnement) dedicado exclusivamente al mercurio (Critères d'hygiène de l'environnement 1). A éste siguieron otros tres más dedicados al mercurio en el medio ambiente (Environmental Health Criteria 86), al metil-mercurio y al mercurio inorgánico (Environmental Health Criteria 118).

El interés científico por el tema quedó también reflejado por el inicio en 1990 de la serie de conferencias 'Mercury as a Global Pollutant (Mercurio como Contaminante Global) que se llevaron a cabo en Ljubljana (Eslovenia) en el año 2004.

El mercurio metálico es escasamente absorbido por ingestión. Experimentos realizados con ratas arrojan valores de absorción inferiores al 0.01%. La absorción en humanos de compuestos inorgánicos de mercurio presentes en alimentos se estima alrededor del 15%.

Aunque la variación individual es considerable, la proporción de la dosis excretada durante los primeros 4-5 días a partir de la ingestión se sitúa entre el 75% y el 92%.

En cuanto a intoxicación por vía cutánea, es muy probable que el Hg pueda atravesar la piel, pero no se dispone en la actualidad de cifras cuantitativas. Es dudoso sin embargo, que esta vía de absorción juegue un papel importante en comparación con otras. Es también muy probable que el metil-mercurio pueda penetrar al cuerpo humano a través de la piel. Existe un gran número de intoxicaciones atribuidas a la aplicación local de pomadas conteniendo metil-mercurio, aunque no se pueda estimar, a partir de los trabajos actuales, hasta que punto hay absorción (Gaona, 2005).

Los primeros efectos de la intoxicación son síntomas no-específicos como parestesia (sensación de hormigueo), malestar y visión borrosa. En dosis altas, el metil-mercurio afecta al sistema nervioso periférico dando lugar a síntomas de debilidad neuromuscular. Hay que recalcar además que, en casos de intoxicación crónica, estos síntomas son irreversibles debido a la destrucción de células neuronales (Horvat et al., 1987).

Observaciones realizadas tanto en animales como en humanos indican que el sistema nervioso central en desarrollo, es mucho más sensible a ser dañado por el metil-mercurio que el sistema central nervioso adulto. En Minamata (Japón) se observó cómo mujeres embarazadas que habían sido intoxicadas levemente, daban sin embargo a luz a bebés con parálisis cerebrales severas. Autopsias realizadas en Japón indicaban que el daño es generalizado en todo el cerebro en el caso de exposición pre-natal, en contraste con las lesiones localizadas que se dan en adultos expuestos (Gaona, 2005).

## **3.4 METODOLOGÍA**

### **3.4.1 Selección de lugar de muestreo**

Para establecer el lugar de muestreo se utilizó un mapa topográfico de INEGI, carta F 14C58. Se consideraron aspectos geológicos para el muestreo de suelos, como: tipo de roca, yacimiento tipo hidrotermal, yacimiento tipo skarn y posibles fallas activas, se tomo como referencia la Norma oficial Mexicana Nmx-AA-132-SCFI-2006. Además de reconocer la zona de estudio geológicamente, se distinguieron el tipo y uso del suelo para su muestreo. El muestreo de suelos fue el siguiente:

### **3.4.2 Actividades de campo de muestreo suelos**

Las muestras de suelos se tomaron de 4 sitios cardinales más el centro de referencia del lugar inicial de muestreo y a una distancia aproximada de 50 m uno de otro. Todos los sitios de muestreos están georreferenciados. Las 5 muestras de cada sitio fueron tomadas a una profundidad de 0-20 cm; se cuartearon y se homogenizaron, tomándose al final una muestra representativa de 2 Kg. Ésta se etiquetó y se guardó inmediatamente a una temperatura de 4<sup>0</sup> C para evitar posibles alteraciones.

### 3.4.3 Actividades del laboratorio

Con el propósito de evitar contaminar el área de análisis, la actividad de preparación se realizó en un local independiente al laboratorio.

- Los suelos, sedimentos y terreros se colocaron en charolas de plástico o metálicas protegidas con cartón para que se realice el secado a temperatura ambiente, las muestras se dejaron secar al aire y a la sombra, evitando corrientes de aire, con el fin de eliminar el exceso de agua y la actividad biológica.
- Con un mazo de madera se molieron las muestras se disgregaron los terrones para facilitar el proceso de tamizado.
- Las muestras de suelo se pasaron por un tamiz de malla de 2mm, para separación de gravas, fragmentos de roca, etc.
- Se utilizaron botes y bolsas de plástico para envasar las muestras y evitar reacciones y/o contaminar la muestra.
- Se almacenaron y se clasificaron los suelos, sedimentos y terreros para inicio de los análisis. Los suelos se guardarán por un período de cinco años para poder verificar resultados y posibles repeticiones a solicitud del especialista.

En el laboratorio de Edafología del Centro de Geociencias se realizaron los análisis físico-químicos establecidos por Procedure for Soil Analysis, FAO/ISRIC, Fifth Edition 1995.

**Los análisis físico-químicos que se determinaron fueron:**

**Textura** por método Bouyoucos, **pH** se midió en una relación 1:2 suelo-agua, se determinó con potenciómetro Beckman 390, **Materia orgánica** con la técnica Walkley y black, **Capacidad de Intercambio Catiónico** se cuantificó por el método de Versanato.

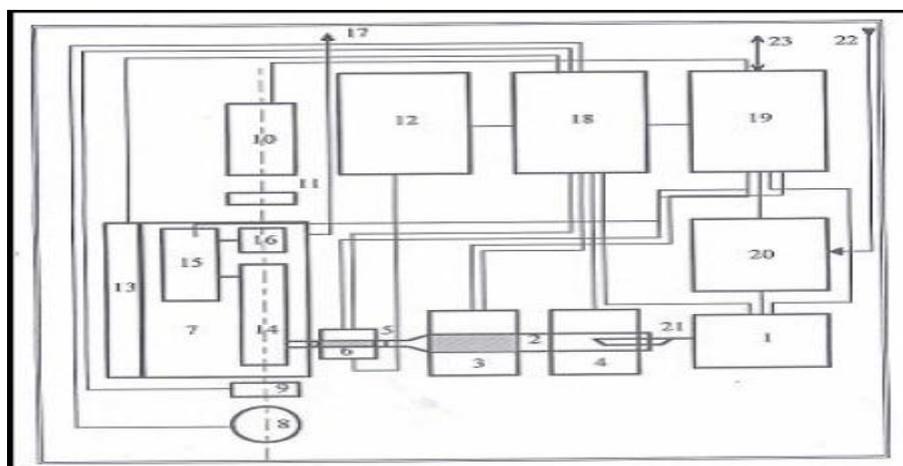
### 3.5 MEDICION DE MERCURIO TOTAL EN SUELOS (AMA-254)

Las muestras se molieron y se tamizaron en malla 10 (2mm) para obtener las muestras homogéneas y finas. De cada muestra se pesó 0.1 g por triplicado y se situaron en el analizador de mercurio AMA-254 con una medición directa, este equipo emplea la técnica de incinerado ocasionando un vapor de mercurio. El mecanismo es el de un espectrómetro de adsorción atómica. Así este equipo determina el mercurio en muestras sólidas o líquidas sin tratamiento previo. Se utilizó una solución patrón de mercurio la cual se registró solución mono elemental de BDH, grado reactivo.

El equipo se calibró con estándares de MONSTAR Hungarian stream sediment standardx, Slovakian reference material (ISE 982) y WEPAL monitor simple (ISE 921). Los parámetros de medición que se utilizaron son: 253.65 nm longitud de onda, detector de diodo de silicio UV, oxígeno como gas portador, la presión de entrada 200-250 kpa, una velocidad de flujo de 200ml/min, con 5 min de tiempo de análisis (Barta y Varga-Barna, 2002)

### 3.5.1 Funcionamiento del equipo AMA 254

Para comprender el funcionamiento del equipo AMA 254 se muestra un esquema de los componentes del equipo. (Figura 34 y Tabla 9)



1 dosificador	9 obturador	17 emisión de oxígeno
2 tubo catalítico	10 detector	18 electrónica analógica
3 horno de catálisis	11 filtro de interferencias	19 microprocesador 8051
4 horno de descomposición	12 bomba de frío	20 regulador del caudal de oxígeno
5 amalgamador	13 calentador	21 navetilla de muestra
6 horno de emisión	14 cubeta de medida de mayor tamaño	22 entrada de oxígeno
7 bastidor de cubetas de medida	15 nave de retardo	23 conexión con el equipo informático
8 lámpara de mercurio	16 cubeta de medida de menor tamaño	

Figura 34. Esquema de los componentes del equipo AMA 254.

Tabla 9. Parámetros utilizados para la medición de mercurio total.

Parámetro		Parámetro	
Muestra	Individual	Primer rango	0.05 a 50 ng Hg
Fuente de luz	lámpara de mercurio de baja	Segundo rango	50-60 ng Hg
Longitud de onda:	253.65 nm	Reproducibilidad	<1.5%
Filtro de interferencia	254 nm, ancho medio 9nm	Tiempo de análisis	5 minutos
Detector:	UV diodo Silicio	Tratamiento de la muestra	Programable
Límite detección	0,01 ng Hg en el caso de la	Calibración	Material de referencia

	muestra de 0.100g: 0,1 ppb		
Trabajo rangos	Cambio automático en el punto de conmutación de A=0,8	Serie de normas	Ilimitado
Muestra	Material sólido	Gas portador	Oxígeno
Volumen	Muestreo externo, max: 500 l, 1000µl Interna de muestreo: depende de dispositivo de muestreo	Peso de la muestra	max: 300 mg, 700 mg
La presión de Intel	200-250 kpa	Caudal	200ml/min

### 3.6. SOFWARES

Programa mat-lab: gráficos de gas radón. Excel gráficos, gráficas de mercurio.

Programa winlink: gráficos de radón y mercurio.

Sas system versión 9.0. : Estadística descriptiva de Pearson.

Navegador google eart.

Programa Arg Gis 9.1:

### 3.7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El muestreo se llevó a cabo en función de varios usos del suelo dentro del Distrito Minero de San Joaquín. El objetivo del muestreo de suelos fue correlacionar sus propiedades físico-químicas con el contenido del mercurio total y conocer su dispersión en la zona. En total se tomaron 59 muestras de suelos agrícolas.

En la Tabla 10, se presentan los sitios muestreados con las localidades correspondientes. En la Figura 35 se presenta la localización georeferenciada de los sitios que sirvieron de referencia para el muestreo.

Tabla 10. Sitios de muestreo de suelos.

No.	Localidad	No.	Localidad	No.	Localidad
1	Maravillas	21	SW Platanito	44	Los Hernández
1a	Maravillas	22	N Azogues	45	Mesa del Niño
1b	Maravillas	23	Tierr Colora	46	Mesa del Niño
2	Calabacillas	24	El Durazno	47	El Campamen
3	Santa Rita	25	SE C Mag Ve	48	Las Lomas
4	Vergel	26	Los Herrera	49	SW Lom Gpe
5a	Sto. Entierro	27	W El Pacífico	50	NW El Suspiro
5b	Mesa de Niño	28	El Doctor	51	S. Agua Fría
6	Lagunita	29	Sta Ana	52	La Carbonera
7	Las Ovejas	30	N Los Pozos	53	La Carbonera
8	La Fe	31	NW Los Pozo	54	Los Arteaga
9	Mes Platanito	32	Sn Cristobal	55	N.M Los Periq
10	.Agua Fría	33	El Rincón	56	La Guadalupe
11	El Socavón	34	La Frontera	57	S. Joaquín
12	El Pacífico	35	M.El Otatal	58	S. Joaquín
13	Ranas 1	36	La Zahuada	59	La Cañada
14	Ranas 1	37	El Huizacal		
15	Ranas IV	38	El Socavón		
15	Trinch/Paleta	39	El Socavón		
17	ToluquiMina1	40	Sta Ma Gracia		
18	Toluq Edif 54	41	La Escalera		
19	Toluq 47y48	42	La Escalera		
20	NW Ranas	43	Campo Alegre		

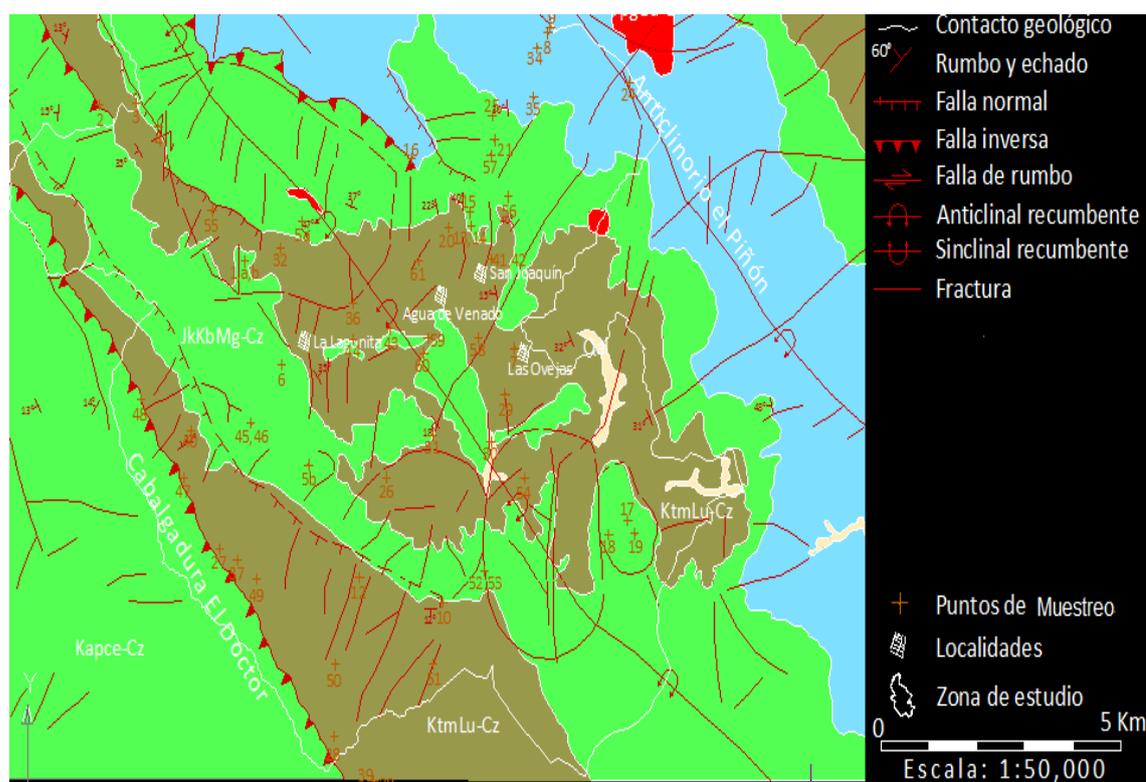


Figura 35. Mapa y sitio de localización de suelos muestreados para Hg total.

### 3.7.1 Concentración de mercurio total en suelos

Hernández-Silva et al., 2009b, explican que la minería y la agricultura están asociadas a las actividades cotidianas de los habitantes prehispánicos, con una probable incorporación de mercurio en los suelos agrícolas cercanos a las minas. Las concentraciones de mercurio total en los suelos del Distrito Minero de San Joaquín son muy variadas. El sitio donde se encontró un mayor contenido de Hg total, corresponde a Las Ovejas con 2000 mg/kg. Este sitio se encuentra ubicado en la formación Las Trancas, donde predominan los yacimientos de origen hidrotermal. En contraste, el sitio Loma de Guadalupe registró la menor concentración de mercurio total en suelos con 0.27 mg/kg.

Una de las características más importantes de un suelo, es su contenido de materia orgánica y, es bien conocido que, a un alto contenido de ésta, se tiene una mayor capacidad de retención de mercurio; así mismo, los procesos edáficos intervienen para favorecer la sorción del mercurio evitando su transformación y volatilización hacia la atmósfera (Ettler et al., 2007).

Por otro lado, el relieve es un factor importante para la distribución y /o acumulación del mercurio. Duchaufour (1970) y Levine (2001), explican que la topografía de la superficie de un paisaje, tiene efectos de acumulación de humedad en el perfil del suelo, permitiendo un desarrollo en función de la inclinación del terreno y, en consecuencia, un desarrollo de vegetación favorable y un contenido de materia orgánica de media a alto si la pendiente es suave. En la región de San Joaquín con frecuencia existen pendientes con ángulos que van

de 10 a 45 %. A medida que la pendiente del terreno aumenta, la energía cinética del escurrimiento superficial se incrementa, favoreciendo la re-movilización del mercurio en las capas superficiales del suelo.

Como ya se mencionó, las concentraciones detectadas de mercurio total están en el rango de 0.206 mg/kg a 2000 mg/kg. De acuerdo con la NOM-147 2004, el 30 % de las muestras analizadas sobrepasan los límites permisibles de los suelos agrícolas cuyo valor es 23 mg/kg.

En la Fig. 36 se aprecia que, las mayores concentraciones de mercurio se ubican al noroeste y este de la zona de estudio (color rojo), coincidiendo con la ubicación de los yacimientos hidrotermales donde se encuentran las vetas de cinabrio. Casi al centro de la Fig. 36 se puede apreciar una figura elíptica (color rojo). Esta zona de alta concentración, implica la agrupación de varias minas de cinabrio de origen prehispánico, colonial y presente. Además, se observa el cambio de color según la disminución de niveles de Hg (de amarillo, verde, azul claro y magenta).

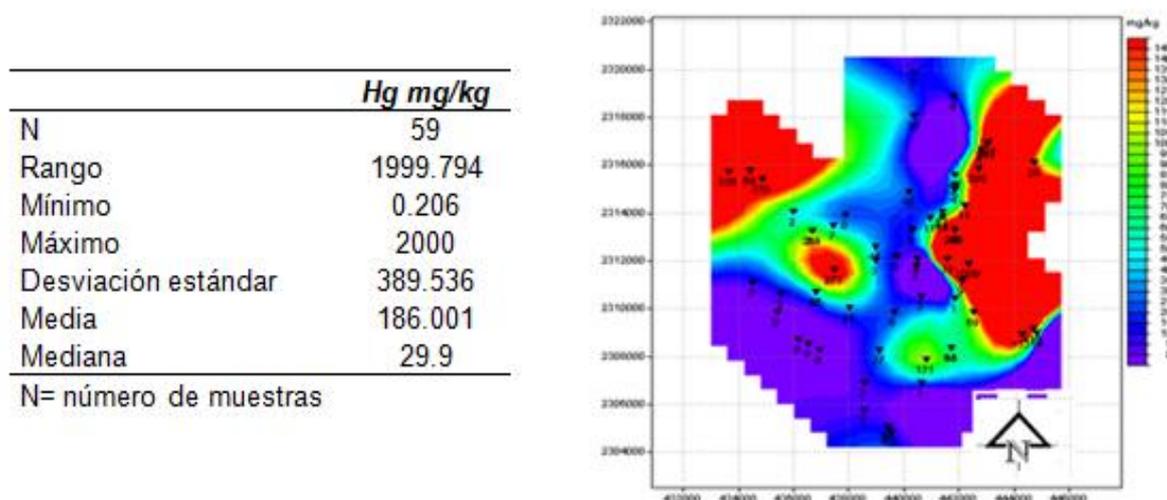


Figura 36. Distribución y estadística descriptiva de la concentración del mercurio total en suelos.

### 3.7.2 Propiedades químicas

Las propiedades químicas más importantes que afectan al comportamiento y disponibilidad de metales en el suelo son las relacionadas con la adsorción de metales de la fase líquida, por la fase sólida. Estos procesos controlan las concentraciones de metales iónicos y complejos en la solución del suelo y ejercen gran influencia en la adsorción por las raíces y plantas.

### 3.7.2.1 pH

Como ya se mencionó, la roca madre, el clima, la latitud, la vegetación constituyen los factores básicos de donde derivan las propiedades químicas y físicas del suelo. La región del Distrito Minero de San Joaquín, está conformado por rocas sedimentarias como lutitas y calizas arcillosas, aflorando algunos intrusivos (granodiorita-diorita). Estas calizas originan suelos carbonatados, produciendo una lixiviación particular conocida como decarbonatación. Este proceso representa la movilización de los carbonatos, que se disuelven bajo la forma de bicarbonatos solubles y migran con las aguas de percolación. La carbonatación se produce cuando los bicarbonatos pasan nuevamente a carbonatos insolubles y se acumulan. La disolución de los carbonatos se realiza por la acción de  $\text{CO}_2$  disuelto en el agua, según la siguiente ecuación:



De esta ecuación se obtiene la solubilidad de los  $\text{CaCO}_3$  y depende de la cantidad de agua (precipitación) que infiltre y de la cantidad de  $\text{CO}_2$  que esté disuelto. Al aumentar cualquiera de ellos aumenta la cantidad de carbonatos disueltos.

La dirección de vientos provenientes del Golfo de México y la variación de altitudes que van de 900 m a 3050 m ocasiona la existencia de tres climas diferentes; al centro y sur se tiene un clima templado con temperaturas promedios anuales ( $12$  a  $18^\circ \text{C}$ ), al suroeste existe un clima semiseco con promedios anuales de ( $18$  a  $22^\circ \text{C}$ ) y al norte clima semicálido con temperaturas promedio anuales ( $18$  a  $22^\circ \text{C}$ ); las lluvias en los tres climas suceden en verano. La precipitación media anual al centro y sur es superior a 800 mm y al norte de 600 mm (García, 1998).

Palacio et al., 2000, reportan que la vegetación está determinada por bosque de pino encino, matorral xerófilo, bosque de táscate con especies Junípero y Cupressus. La mayor parte del área tiene vocación forestal; sin embargo, a través del tiempo los pobladores han transformado el uso del suelo, introduciendo áreas de cultivo, especialmente maíz, frijol y árboles frutales.

Los valores registrados de pH en los suelos en la zona de estudio van de neutros ( $6.6 < 7.5$ ) a básico o ligeramente alcalino ( $7.6 > 8.5$ ). Solo 3 sitios de los 61 muestreados no caen en estos rangos, tiene valores de  $4 > 5.5$  clasificados como ligeramente ácidos. Según (Dokuchaev, V.V 1989) los suelos cambian gradualmente del norte al sur y los factores que afectan el cambio son las temperaturas, la altitud y la relación precipitación-evaporación. El sitio con el valor de pH más alto es Los Pericos cuyo un valor de pH es de 7.99; este lugar se encuentra en la parte media de la zona de estudio con un clima templado.

Por otra parte, la carbonatación puede provocar una disolución del  $\text{CO}_2$  disuelto y provocar un aumento de pH en los suelos; además, un aumento de la temperatura, puede provocar una disminución de humedad a través de mecanismos de evapotranspiración o, por causas físicas que impidan la circulación del agua a través del suelo, originando la acumulación de  $\text{CO}_3$ ; el resultado, es la existencia de suelos neutro-alcalinos. Los suelos con un balance de lixiviación y acumulación de humus como los Luvisoles (parte de suelos en zona de estudio)

tienen una formación más intensa de carbonatos en el perfil; el contenido de humus en la capa superficial de los suelos disminuye hacia la profundidad, asociándose esta característica a los carbonatos de calcio que se encuentran en mayores concentraciones cerca de la superficie.

El pH es factor fundamental en el comportamiento del Hg porque controla la movilidad de los metales pesados en los procesos que tienen lugar en el suelo. Puede considerarse como un complejo coloidal que incluye una mezcla de ácidos y de sales. El hidrógeno absorbido y los cationes metálicos que rodean las micelas insolubles tienden a permanecer en equilibrio dinámico con la solución del suelo; por ello, el pH de la solución es afectado por los cationes absorbidos. Los procesos de descomposición de la materia orgánica, las acciones microbianas y el lavado de bases son considerados como precursores de la acidez del suelo. Por el contrario, cualquier proceso que tienda a aumentar las bases, disminuirá la acidez.

Un cambio de pH indica una modificación en el ambiente que rodea al suelo. Los metales pesados son más móviles bajo condiciones ácidas. En condiciones de fuerte acidez, aumenta la proporción de Al y Mn en el complejo de cambio y en la solución del suelo, produciéndose así su toxicidad. (Casanova, 1999.)

En la Fig. 37 se muestran los datos estadísticos descriptivos del pH en los suelos muestreados y su relación con el mercurio total. En la zona de estudio no existe una variabilidad preocupante del pH ( $7 \pm 0.6\%$ ). Solo existe un valor mínimo de 4.5 que se encuentra al centro sur. El pH máximo fue de 7.95 (Hacer lo mismo, contenidos de M.O. y Hg total y ver si hay relación entre ellos). En lo que respecta al mercurio el valor promedio fue de 186 mg/kg, sobrepasando (incluir el % de muestras) el límite máximo permitido establecidos por la NOM-147-2004, ya que los valores establecidos para uso agrícola es de 23 mg/kg.

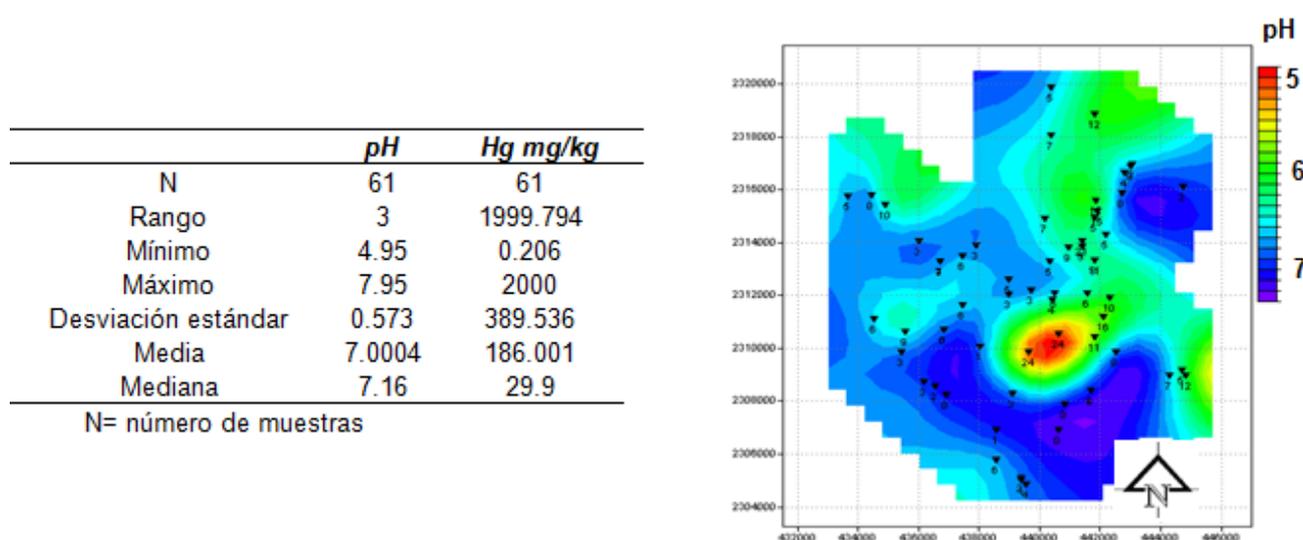


Figura 37. Distribución y estadística descriptiva de Concentración del Mercurio total con pH.

En la misma Fig. 37 se observa la de distribución del los valores de pH en el centro de la zona de estudio se encuentran representados de color rojo con el rango de pH ácido (4-5) y alrededor de la zona de estudio se representa con el color azul los valores de neutroa a alcalinos, se registró una desviación estandar de 0.573.

La relación que tiene el Hg total con respecto a los valores de pH encontrados y, de acuerdo a una amplia literatura sobre el tema, muestra una baja movilidad del Hg en los suelos. Jin et al., 2007, indican que la sorción máxima del Hg está entre los valores de pH ácidos (4-5), y los valores mínimos para la desorción se encuentran entre valores de 5 y 7; por consiguiente, la desorción incrementa con los valores entre 7 y 9. Higuera et al., 2003, mencionan que un pH neutro o cercano a él, no contribuye a movilizar el mercurio y tampoco favorece a las transformaciones mineralógicas. Por lo tanto, de acuerdo a estos valores de pH en suelos, existe una baja disponibilidad del Hg en la región.

El pH es un parámetro importante junto con las concentraciones del ión  $\text{Cl}^-$  para determinar la especiación del Hg. Jing et al (2007) mencionan que muchos factores ambientales interfieren en los procesos de adsorción y desorción del Hg, los cuales incluyen la especiación del Hg, además de otros factores como el contenido de materia orgánica (Gabriel y Williamson 2004).

### 3.7.2.2 Materia orgánica

La materia orgánica es el rasgo fundamental que distingue a un suelo; es la presencia de organismos vivos, restos orgánicos y humus. La mayoría de los suelos contienen materia orgánica; la cantidad y calidad es muy variable. La materia orgánica coloidal tiene influencia en las propiedades químicas de los suelos, cuya fuente principal son los restos vegetales y animales. Estos constituyentes son sometidos a procesos de descomposición, después a otros de síntesis y polimerización dando lugar al humus. Los componentes del humus son: ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas (Ettler et al., 2007cita).

La materia orgánica es muy importante en la génesis y morfología de un suelo, ya que influye en el estado de agregación del suelo, en su color, en la capacidad de retención de agua, en la capacidad de intercambio catiónico, regulación del pH y, en consecuencia, contribuye en sus características morfológicas, químicas y mineralógicas y se encuentra relacionada estrechamente con la fertilidad del suelo (Liu et al., 2007cita).

El Distrito Minero de San Joaquín, ubicado en la Sierra Madre Oriental, posee laderas orientadas hacia el Golfo de México por lo que, los vientos provenientes de este mar, provocan corrientes húmedas y semi húmedas, dando origen a bosques mesófilos. Del otro lado del macizo montañoso; es decir, la sombra montañosa, el clima es seco debido a que la humedad no puede traspasar las zonas altas de la sierra.

Krasilnikov et al., 2007, mencionan que el clima está regulado por el relieve y que la existencia de rocas calizas de la Sierra Madre Oriental originan suelos azonales (Leptosoles y Regosoles) formados por procesos de erosión, con la posibilidad de cambiar completamente la cobertura edáfica. Por otro lado, las condiciones ambientales de estas áreas montañosas, originan en ocasiones, la formación de suelos ácidos ricos en humus

como resultado de una alta precipitación, temperaturas bajas y un buen drenaje. La combinación de la cantidad de lluvias con el buen drenaje en laderas inclinadas, influye en la formación de bosques, provocando hojarasca y a la vez procesos químicos que llevan a una descomposición relativamente rápida y por ende, a una concentración alta de materia orgánica en los suelos (Álvarez Arteaga et al., 2008).

Etter et al., 2007 mencionan que entre mayor sea el contenido de materia orgánica, el suelo tendrá mayor capacidad de retención de mercurio. Los resultados obtenidos de las muestras analizadas señalan que el contenido de materia orgánica presentes en los suelos de la zona de estudio tiene altos contenidos de M.O.

La estadística descriptiva y las medias aritméticas de las muestras analizadas pueden verse en la Fig. 3; tienen un promedio de 5.595%, lo que indica que los suelos tienen altos contenidos de materia orgánica según la NOM-021-RECNAT 2000. Se registran valores que van de 0.12 % (Santa Rita) a 21.86 % (Los Pozos). En lo que respecta al mercurio, el valor promedio fue de 186 mg/kg sobrepasando el límite máximo permitido establecido por la NOM-147-2004. La misma figura muestra la distribución de la materia orgánica, cuyos valores mínimos se encuentran en el centro y centro-norte de la zona de estudio (0 - 7.5 %). Los mayores contenidos de materia orgánica se ubican al noreste-noroeste (15 a 25 %).

	% M.O	Hg mg/kg
N	59	59
Rango	21.74	1999.794
Mínimo	0.12	0.206
Máximo	21.86	2000
Desviación estándar	4.3425	389.536
Media	5.595	186.001
Mediana	5.009	29.9

N= número de muestras

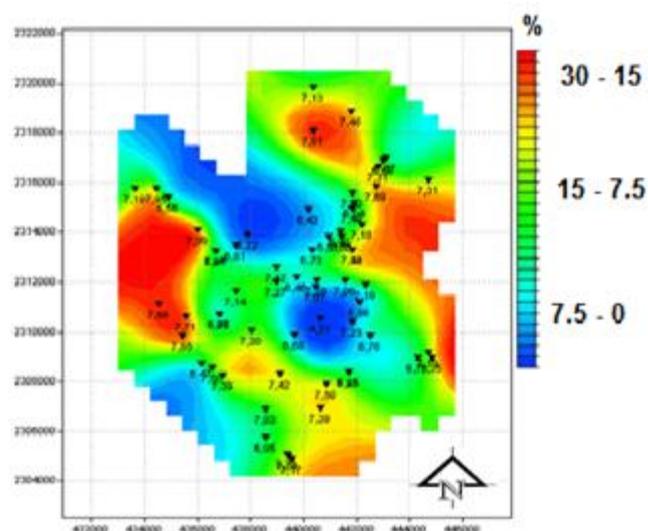


Figura 38. Distribución y estadística descriptiva de concentración del mercurio total con MO.

En la región de San Joaquín el clima es predominantemente templado con un promedio anual que oscila entre 18 y 20 °C; con temperaturas extremas que oscilan entre -10 a 34 °C. Por lo tanto, las velocidades de reacción en el suelo pueden ser de medias a bajas (Ritter, 2000). La vegetación de la región aporta materia orgánica que, de acuerdo a los principios enunciados por Liu et al., 2007, no se mineraliza tan rápido; por lo tanto, su acumulación es

visible en la superficie del suelo. Los resultados que se obtuvieron de la materia orgánica en suelos es alta y esto provoca que exista acumulación, fijación e inmovilización del mercurio en el suelo (Desauziers et al., 1997).

### 3.7.2.3 Carbón Orgánico (CO)

El carbono orgánico del suelo (CO) es un compuesto importante del ciclo global del C, ya que ocupa un 69,8 % del C orgánico de la biosfera (FAO, 2001). Desde que se incorporan nuevos suelos a la agricultura hasta el establecimiento de sistemas intensivos de cultivo, se estiman pérdidas de CO que fluctúan entre 30 y 50%, con respecto al nivel inicial (Reicosky, 2002). El CO se vincula con la cantidad y disponibilidad de nutrientes del suelo al aportar elementos como el N cuyo aporte mineral es normalmente deficitario. Además, al modificar la acidez y la alcalinidad hacia valores cercanos a la neutralidad, el CO aumenta la solubilidad de varios nutrientes (Carter, 2002, Wander *et al.*, 2002).

El CO asociado a la materia orgánica del suelo proporciona coloides de alta capacidad de intercambio catiónico (Martínez et al., 2002). Su efecto en las propiedades físicas se manifiesta mediante la modificación de la estructura y la distribución del espacio poroso del suelo. La cantidad de CO no solo depende de las condiciones ambientales locales, sino que es afectada fuertemente por el manejo del suelo (Moreno *et al.*, 1999).

El CO del suelo se encuentra en forma de residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos, en forma de humus y en formas muy condensadas de composición próxima al C elemental (Jackson, 1964). En condiciones naturales, el C orgánico del suelo resulta del balance entre la incorporación al suelo del material orgánico fresco y la salida de C del suelo en forma de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera así como por erosión y lixiviación (Swift, 2001 y Aguilera, 2000). El CO<sub>2</sub> emitido desde el suelo a la atmósfera, no solo se produce por la mineralización de la MO donde participa la fauna edáfica y los microorganismos del suelo, sino también se genera por el metabolismo de las raíces de las plantas (Fortín *et al.*, 1996).

La MO y el CO se vinculan con la cantidad y disponibilidad de nutrientes en el suelo. La relación que tiene el mercurio con estos parámetros es la acumulación, fijación e inmovilización del mercurio en el suelo (Desauziers et al., 1997). Estudios realizados por Álvarez y Lavado (1998) encontraron que, el contenido de carbón orgánico en los 50 cm de la superficie del suelo se correlacionaba de forma positiva con la relación precipitación/temperaturas. En este sentido, la presencia del CO se ve favorecida por las condiciones climáticas y orográficas de la región de estudio, a través de los constantes cambios de humedad, temperatura y precipitación.

La Fig. 39 muestra la estadística descriptiva indicando que los suelos de la región tienen un contenido adecuado de CO. El valor promedio es de 4.28 %; el mínimo de 0.06 % correspondiente al sitio Santa Rita; el máximo es de 15.08 % en el sitio Los Herrera. Casi al centro de la zona de estudio se encuentra la mayor concentración de CO, que coincide con la existencia de un bosque mesófilo.

	% C Orgánico	Hg mg/kg
N	59	59
Rango	15.01	1999.794
Mínimo	0.0696	0.206
Máximo	15.08	2000
Desviación estándar	3.004	389.536
Media	4.28	186.001
Mediana	3.71	29.9

N= número de muestras

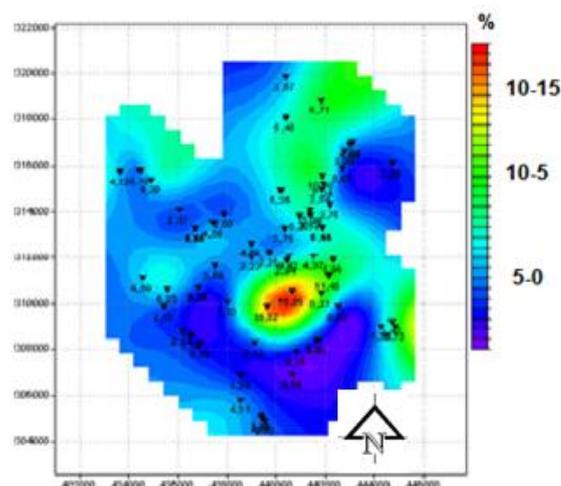


Figura 39. Distribución y estadística descriptiva de la concentración del Hg total y su relación con CO. .

### 3.7.2.4 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Jenny y Leonard (1953) estudiaron la relación entre la precipitación y la capacidad de intercambio catiónico en suelos derivados de loess alrededor de una isoterma de  $11^{\circ}\text{C}$ ; encontraron que la CIC y la precipitación se relacionan de forma directa, disminuyendo los cationes básicos intercambiables después de los 600 mm de precipitación; en cambio el  $\text{H}^{+}$  intercambiable aumentó. Otro estudio que realizaron Jenny y Leonard (1953), se basó en encontrar la relación entre la temperatura y el porcentaje de arcilla, estableciéndose diferencias según el tipo de roca, pero con la misma tendencia positiva.

El suelo tiene la capacidad de retener o liberar iones (aniones y cationes) propiedad que se le define como capacidad de intercambio catiónico. Esta propiedad se relaciona estrechamente con la materia orgánica y la cantidad y tipo de arcilla. Los sitios de intercambio de la materia orgánica, solo enlazan en forma débil a los cationes. Las arcillas con gran capacidad de intercambio tienden a enlazar los cationes bivalentes como el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{3+}$  con más energía que el  $\text{K}^{+}$ . Esta característica puede afectar la disponibilidad de los nutrientes (Eiora, 2012). La CIC de un suelo varía de horizonte a horizonte y cada uno de ellos dependerá del contenido y tipo de minerales de arcilla y de componentes orgánicos (Porta et al., 2003).

La estadística descriptiva registra un promedio de CIC de  $29 \text{ Meq}/100\text{g}$  en los suelos de la región. La Fig. 40 señala que, aproximadamente el 80 % de los suelos muestran una distribución homogénea en el centro-sur, centro y norte de la zona de estudio con valores que alcanzan un máximo de  $50 \text{ Meq}/100\text{g}$ . En la misma figura se puede ver que el valor máximo corresponde al sitio 35 de nombre El Otatal con  $122.59 \text{ Meq}/100\text{g}$ , localizado al noreste (color rojo); el valor mínimo se ubica en el sitio Santa Rita con  $7.57 \text{ Meq}/100\text{g}$ . De acuerdo a los valores de referencia de la NOM-0221-RECNAT 2000, estos suelos se clasifican como altos en su capacidad de intercambio catiónico ( $7.59 - 122-59 \text{ Meq}/100\text{g}$ ). Al este y oeste, los valores fluctúan entre 50 y  $100 \text{ Meq}/100\text{g}$ .

	<i>CIC meq/100g</i>	<i>Hg mg/kg</i>
N	59	59
Rango	115	1999.794
Mínimo	7.59	0.206
Máximo	122.59	2000
Desviación estándar	20.52	389.536
Media	29.84	186.001
Mediana	24.61	29.9

N= número de muestras

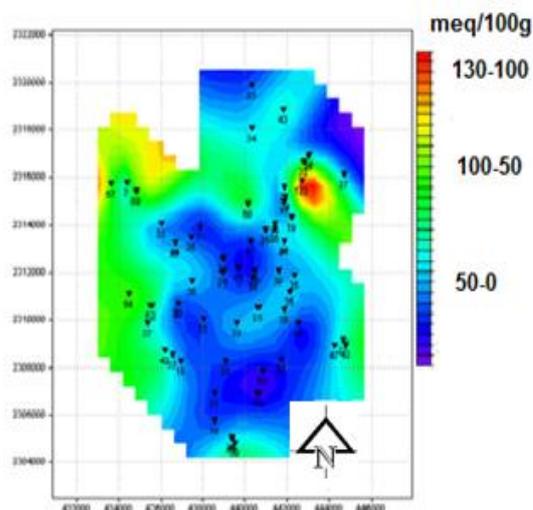


Figura 40. Distribución y estadística descriptiva de Concentración del Mercurio total con C.IC.

### 3.7.3 Propiedades Físicas

Las propiedades físicas del suelos determinan la rigidez, la fuerza de sostenimiento, la aireación, la capacidad de drenaje, almacenamiento de agua, plasticidad y retención de nutrientes (Álvarez y Velozo, 1974).

#### 3.7.3.1 Textura de suelos

La vegetación, el clima y el medio pedológico son factores que condicionan la naturaleza del humus. El suelo puede enriquecerse con humus cálcico y estabilizarse o descalcificarse y ser lixiviado. Según sea el caso, la porción de arcilla disminuye en la superficie y aumenta en la profundidad. El humus da origen a las migraciones y es capaz de transformar radicalmente la textura (Baver, 1956).

La textura del suelo, depende de la roca madre y de los procesos de evolución; de estos depende los resultados de los procesos y formación del suelo. Estos se separan por 3 clases de tamaños; arena, limo y arcilla.

En este apartado solo se enfoca a la arcilla, ya que la arena y el limo no tienen relevancia significativa con respecto al mercurio, debido a que carecen de plasticidad y tenacidad; la capacidad de retención es escasa y como existen grandes espacios entre sus partículas, el paso del agua es rápido; facilitando el drenaje y movimientos de aireación. (Baver et al., 1973). El Departamento de Agricultura de U.S.A. dictamina que el diámetro de la arcilla es <0.002mm.

La Fig. 41 muestra la estadística descriptiva con el contenido de arcilla; los valores son variables y van de 10 a 54 %, aunque predomina el contenido de arcilla con un promedio de 30.82 %. El sitio con mayor contenido de arcilla corresponde a la Zahuda con un valor de 54 % y un mínimo de 10% correspondiente al sitio El Otatal. En esa misma figura se muestra la distribución del contenido de arcilla. Por otro lado, los valores promedio se encuentran en el

centro y suroeste de la zona de estudio; el máximo registrado se encuentra hacia el sur y el valor mínimo esta ubicado al norte .

Los altos contenidos de arcilla muestran que los suelos favorecen a la acumulación, fijación e inmovilización del mercurio.

	% arena	% limo	% arcilla	Hg mg/kg
N	59	59	59	59
Rango	72.4	40.8	44	1999.794
Mínimo	6.4	8.4	10	0.206
Máximo	78.8	49.2	54	2000
Desviación estándar	19.23	11.97	11.06	389.536
Media	42.79	26.38	30.82	186.001
Mediana	42.6	24.8	30	29.9

N= número de muestras

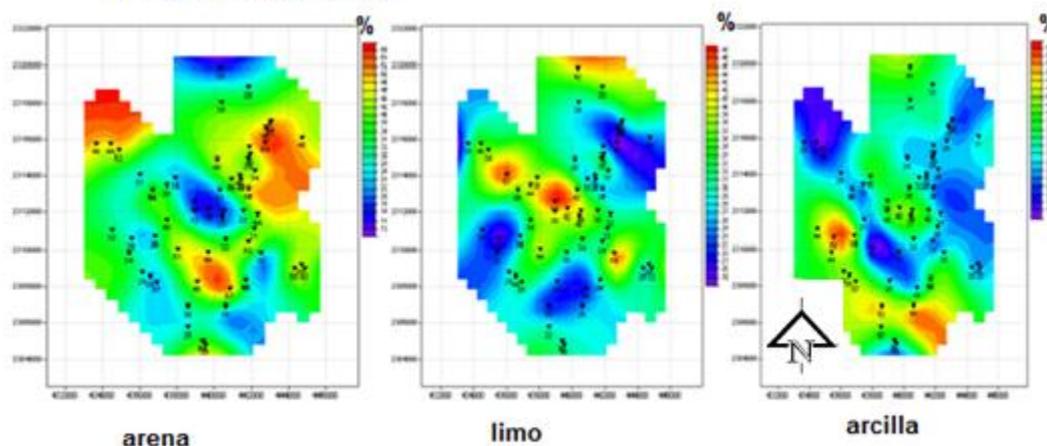


Figura 41. Estadística descriptiva general de la textura y el contenido de mercurio total. Mapa de la distribución de los diferentes diámetros de partículas de suelos.

### 3.8 ESTADÍSTICA

Se realizó un análisis de Pearson con el objetivo de correlacionar algunas propiedades físicas y químicas con respecto al contenido mercurio total en suelos. En la Tabla 11 se observa los resultados del análisis estadístico, donde se demuestra que no existe ninguna correlación significativa entre las propiedades fisicoquímicas tomadas en cuenta, con los valores de mercurio total en suelos.

El promedio del mercurio total fue de 100.38 mg/kg; este valor sobrepasa los límites permisibles según la NOM - 147 - 2004. En cuanto a los valores obtenidos de pH según la NOM - 021 - RECNAT 2000. Indican que en su mayoría son suelos neutros - alcalinos, con valores promedio de 7.36. Así mismo los valores de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y arcilla, muestran que sus valores promedios son altos según la NOM - 021 - RECNAT 2000. Los valores obtenidos son (6.84 %, 34.04  $\text{cmol/kg}$ , 35.21 %) respectivamente. En lo que respecta al carbón orgánico total también se obtuvieron altas concentraciones de valor promedio (5.82%).

En la Tabla 11 se muestran algunas correlaciones negativas, como es el pH, carbón orgánico, capacidad de intercambio catiónico y arcilla; estas variables indican una correlación inversamente proporcional con el mercurio. La única variable que mostró dato positivo fue la materia orgánica; aunque esta variable pueda ser correlacionarse con la inmovilización del mercurio total, el valor resultante es tan pequeño que no es posible tomar en cuenta.

Tabla 11. Resultados de estadística de Pearson de las propiedades físicas y químicas con mercurio total en suelos.

Variable	N	Desviación			Mínimo	Máximo	Correlación de P (r)	Grado de significancia
		Media	típica	Suma				
Ph	59	7.36915	2.93765	434.78	4.22	29	-0.01562	0.9065
MO	59	6.8461	5.38513	403.92	0.17	25	0.0571	0.667
Corg	59	5.82983	7.72802	343.96	0.1	44	-0.03199	0.8099
Are	59	35.4729	16.226	2093	4	68	0.27019	0.0385
LI	59	32.6229	14.6443	125	5	84	-0.2402	0.0669
AR	59	35.2171	37.602	2078	2.43	309	-0.06015	0.6509
CIC	59	34.0403	35.1519	2008	7.59	273	-0.0121	0.9251
Hg	59	100.38	282.35018	522	0.2	2000		

### 3.9 CONCLUSIONES

#### a) Gas radón

Las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  de los 8 sitios muestreados en suelos con los equipos scout, mostraron valores que van de 60000 a 180 Bq/m<sup>3</sup>, sobrepasando los límites permisibles de la EPA (148 Bq/m<sup>3</sup>). Estos resultados pueden deberse a las diferentes características geológicas del subsuelo, ya que se reportan algunas anomalías gravimétricas en la región.

En la comunidad Agua de Venado se registraron valores de  $^{222}\text{Rn}$  hasta 60,000 Bq/m<sup>3</sup> en suelos. Esta anomalía se registró en el mes de noviembre considerada como un período seco. Es necesario validarla.

En los 17 puntos muestreados en el transecto que se realizó en la zona de Agua de Venado con los detectores scout, las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  estuvieron en un rango de 304 a 2520 Bq/m<sup>3</sup>. En los 19 sitios monitoreados en los transectos alrededor de las minas El Otatal y Calabacillas con el detector monitor, se obtuvieron valores de  $^{222}\text{Rn}$  que van de 45 a 3190 Bq/m<sup>3</sup>. Para los detectores scout la concentración fue de 400 Bq/m<sup>3</sup>. Se concluye que estas concentraciones obtenidas en el transecto de Agua de Venado así como las minas Otatal y Calabacillas, pueden tener una correlación con la permeabilidad de las fracturas y fallas que se asocian a la geología de la zona.

La máxima concentración detectada de  $^{222}\text{Rn}$  para agua, realizada durante el primer período de estudio intramuros, correspondió a la casa 3, cuyos valores correspondieron a 4190 Bq/m<sup>3</sup>; mientras que para suelos fue de 5254 Bq/m<sup>3</sup>. Para el segundo período los valores

máximos detectados, también correspondieron a la casa 3; el valor del agua fue de 1999 Bq/m<sup>3</sup>, mientras que para suelos fue de 2677 Bq/m<sup>3</sup> (con el monitor). Para los detectores scout la concentración fue de 500 Bq/m<sup>3</sup>. Estas mediciones pueden tener una relación con los intrusivos granodioríticos que se encuentran en la zona de estudio.

Se concluye que los detectores scout y monitor RTM1688-2 son una herramienta confiable para futuras investigaciones y que se pueden utilizar como técnicas rápidas de medición de radón ya que tienen una velocidad de integración rápida.

Se encontraron algunas concentraciones elevadas en la zona de estudio, ya que sobrepasan el límite de emanación de <sup>222</sup>Rn según la agencia de protección del medio ambiente EPA con un valor permitido 120 Bq/m<sup>3</sup> para casa habitación. Estas comunidades presentan exposición de este gas lo que puede ocasionar un serio problema de salud.

## **b) Mercurio**

La región mineralizada de San Joaquín tuvo su mayor bonanza de mercurio en las décadas de los sesenta y setenta del siglo pasado. El largo historial de explotación del cinabrio en la región (desde el siglo III de nuestra era), ha originado la dispersión de este elemento en los ecosistemas y en los sistemas terrestres (agua, aire, suelo y biota).

Algunas concentraciones de mercurio total obtenidas en suelos del Distrito Minero de San Joaquín, son consideradas como altas, según la NOM-147, ya que sus valores llegan hasta los 2000 mg/kg. Sin embargo, los valores encontrados en la región de San Joaquín se encuentran por debajo de los valores hallados en otros lugares, como es el caso de Idrija, Eslovenia, donde las concentraciones detectadas llegan hasta 2759 mg/kg (Gnamus et al., 2000) y Almadén, España con valores máximos registrados de 8889 mg/kg (Higueras et al., 2003).

Los sitios con mayor concentración de mercurio total en suelos son: Las Ovejas con un valor registrado de 2000 mg/kg; le siguen Mesa del Platanito con 687 mg/kg, Toluquilla con 416 mg/kg, La Fe con 363 mg/kg, Calabacillas 336 mg/kg y Maravillas con 314 mg/kg. Los suelos de estos sitios se encuentran cercanos a dicha minas (un promedio de 100 m); además, existe una relación con la geología del lugar, ya que se encuentran ubicados en la Formación Soyatal, caracterizada por la presencia de una zona de mineralización hidrotermal de baja temperatura. En lo que respecta a los sitios con menor concentración de mercurio total en suelos fueron: Tierras Coloradas con una concentración de 4.7 mg/kg, siguiendo los sitios Azogues con 3.6 mg/kg, Santa María con 2.45 mg/kg, El Doctor con 1.09 mg/kg, La Cañada con 1.03 mg/kg, La Loma 0.67 mg/kg, Santo Entierro con 0.5 mg/kg y El Pacífico con 0.2 mg/kg. Estos suelos mostraron bajas concentraciones de Hg debido a su lejanía con las bocaminas de cinabrio. La mayoría de estos sitios se ubican en la Formación Tamaulipas y El Doctor, formaciones no muy propicias para la mineralización del Hg.

Las rocas calizas que se encuentran en la zona de estudio dan origen a suelos carbonatados. La altitud, el clima templado, la vegetación de bosques mesófilas, la altitud y el relieve ocasionan la formación de suelos con alto contenido de materia orgánica, así como valores de pH que van de ligeramente alcalinos a ligeramente ácidos.

Las propiedades físico-químicas afectan al comportamiento y disponibilidad del mercurio en el suelo; el pH propicia una baja movilidad del mercurio en los suelos con una disminución en la adsorción de este elemento. Debido a los altos contenidos de materia orgánica, se propicia que el mercurio sea retenido en los suelos; además, los altos contenidos de carbón orgánico, de la capacidad de intercambio catiónico y de la textura de suelos (arcilla) se vinculan con la materia orgánica concluyendo que, el mercurio se fija, se acumula y se inmoviliza por estas características del suelo. Por lo tanto, se puede considerar en general que el Hg es estable al transporte como contaminante en la región.

Con el análisis estadístico y la correlación de Pearson, se demostró que no existe ninguna correlación del mercurio con respecto a las propiedades físico-químicas que se tomaron en cuenta en el trabajo. El 30 % de la zona de estudio mostró concentraciones de mercurio total superior a la NOM-147.

Los mapas de distribución indican que las concentraciones más altas de mercurio se ubican al noreste; los valores de pH que van de ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos y se distribuyen de manera heterogénea; las cantidades altas de materia orgánica están distribuidas al noreste-noroeste; los valores altos de carbón orgánico se localizan en el centro; los valores de capacidad de intercambio catiónico muestran una distribución homogénea y los valores altos de arcilla se encuentran en el centro y sur oeste.

### **c) (Rn-Hg)**

El radón es un gas noble por lo que químicamente no puede combinarse con otros elementos para formar compuestos. La peligrosidad de éste es el decaimiento de isótopos que dan origen a la reactividad, provocando contaminación en el ser humano y en el ambiente. El mercurio es un metal pesado que en su último orbital tiene 2, 1 electrones de valencia, lo que hace posible combinarse con otros elementos y formar compuestos más tóxicos. Por otro lado, el mercurio y radón no tienen ninguna relación química ni física debido a que estos elementos se encuentran en diferente estado de la materia.

La población de San Joaquín y sus comunidades aledañas presentan una exposición constante al mercurio y a las emanaciones de radón, lo que puede ocasionar problemas en su salud y en el medio ambiente.

## CAPITULO IV

### IV. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abu-Jarad F., And Fremlin J.H., 1994.** Effect of internal wall covers on radon emanation inside houses. *Health Phys.* 44, p. 243-248.
- Aitchison J., Brown J.A., 1969.** The lognormal distribution with special reference to its uses in economics . Cambridge, United Kingdom, Cambridge at the University Press
- Aguilera S.M., 2000.** Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo. Boletín N° 14. Valdivia, Chile, p. 77-85.
- Alvarez A. Vega J., Calderon V.,Gonzalez F. 2008.** Introducción al Medio Ambiente.
- Amorós R., Bolta J.M., Navarro E., Roldán C., 1995.** Radon levels in the Valencian Community (Spain). I. Results in the Province of Valencia (1990-1991). *Journal of Environment Radioactivity*, 27 (2), p. 125-131.
- Ayala Estrada Alicia. 2009.** TESIS, Medición de Radón-222 en Ambientes Geohidrológicos en la Fracción Central de México. p 15-35.
- Azorín J., 1997.** Introducción a la Física Nuclear. Ediciones Científicas, AZÜEG, México, D.F.
- Bailey S.E., Olin T.J., Bricka R.M., Adrian D.D., 1999.** A review of potentially low-cost sorbent for heavy metals. *Water Research* 33, p. 2469-2479.
- Bartha A, Varga-Barna Zs. 2002.** Foregs Geochemical Baseline Programme: mercury determination from soil samples. Repot for the Foregs Geochemical Baseline Programme. Geological Institute of Hungry, Hungarian Geological Survey. Budapest, Hungary.
- Bernabé-Martínez María Guadalupe, 1994,** Microfacies de la Formación Las Trancas en el anticlinal de Bonanza, Hidalgo, México: Univiversidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Revista de Investigación, PANCROMO 23, Vol. 1, Núm. 1, p. 50-55.
- Bird, R.B., Stewart, W.E. Lightfoot, E.W., 1992.** Fenómenos de Transporte. Editorial Reverte, S.A., México, D.F. p. 22-234.
- Bornemisza, E., 1982.** Introducción a la química de suelos. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, secretaria General de la organización de los Estados Unidos Americanos, programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Monografía no.25. p. 21-47.
- Buckman, H., and Brady, N.C., 1996.** The Nature and properties of soils. The Macmillan company. p. 590.

- Carbonell M., Zamora S., Langenscheidt A. y Franco C., 1970.** Minería Prehispánica en la Sierra de Querétaro: Secretaría del Patrimonio Nacional, Consejo de Recursos Naturales No Renovables, p. 133.
- Carrasquero-Durán Armando y Adams M., 2003.** Fraccionamiento de mercurio en suelos de áreas contaminadas de El Callao, estado Bolívar-Venezuela, *Agronomía Tropical*, Vol. 53, No. 3, p. 331-345.
- Carrillo-Martínez Miguel., 1981 (1983).** Contribución al estudio geológico del macizo calcáreo El Doctor, Querétaro: Univ. Nal. Autón. México, *Inst. Geología, Revista*, Vol. 5, Núm. 1, p. 25-29.
- Carrillo-Martínez Miguel, 1989.** Estratigrafía y tectónica de la parte centrorienta del estado de Querétaro: Univ. Nal. Autón. México, *Inst. Geología, Revista*, Vol. 8, Núm. 2, p. 188-193.
- Carrillo-Martínez Miguel, 1997.** Hoja Zimapán 14Q-e(7) con Resumen de la Geología de la Hoja Zimapán, Estados de Hidalgo y Querétaro: Univ. Nal. Autón. México, *Inst. Geología, Carta Geológica de México, Serie de 1:100,000*, Núm. 24.
- Carter, M.R., 2002.** Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agron. J.* 94, 38-47.
- Casanova Rosalba 1999.** Modeling of the quality of water of river tula, state of Hidalgo Mexico. *Dyna* vol. 75, no.174, p.5-18.
- Clements W., and Wilkening M., 1974.** Atmospheric pressure effects on Rn222 transport across the Earth air interface. *J. Geophys. Res* 29 (33)c. p. 5035-5029.
- Consejo de Recursos Minerales. 1992.** Geological-Mining Monograph of the State of Querétaro.
- Cortés A., Espinosa G., Cardona A., Golzarri J.I., 2006.** Radón-222 in groundwater studies in two volcanic zones of central Mexico. Reporte interno.
- Cothorn C. Richard, et al. 1987.** Environmental Radon Ed. Springer. 1ª ed.
- Cuapio-Pérez C.A., Morales A., y Núñez-Regalado J.C., 2004.** La explotación de mercurio en el distrito minero de San Joaquín, Querétaro, *Mineralogía e Historia. IX, Coloquio de Mineralogía.*, GEOS, Vol. 24, No. 2, p. 202.
- Deetjen P. 1987.** Epidemiology and biological effects of radón. E:N: H:G Pratzel y P. Deetjen; *Radon in kurortmedizin*. P. 33-39.
- Desauziers V., Castre N., and Le Cloirec P. 1997.** Sorption of methylmercury by clays and mineral oxides. *Environ. Technol.* 18: 1009-1018.

- Dokuchaev V.V.** 1989. La contribución a la teoría de las zonas naturales: zonas edáficas horizontales y verticales. St. Petersburgo.
- Environmental Protection Agency.** 2001. Cost and Emission Reduction Analysis Of HFC and PFC Emissions From Fire.
- Espinosa G.,** 1994. Trazas Nucleares en Sólidos. IF/UNAM, México, D.F.
- Etiopie G.,** and Martinelli., 2000. Migration of carrier and trace gases in the geosphere, and overview. *Phys. Earth Plan. Int.*,129, p. 185-204.
- Ettler V., Rohovec, J., Navrátil T., Mihaljevic M.** 2007. Mercury distribution in soil profiles polluted by lead smelting. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 78: 12–16.
- Fennell S.G., Mack G.M., Madden J.S., McGarry A.T., Duffy J.T., O'Colmáin M., Colgan P.A., Pollard D.,** 2002. RPII-02/01.Radon in dwellings. The irish national radon survey. The department of the environment, heritage & Local Government. Radiological Protection Institute of Ireland. Disponible en Internet en: <http://www.rpii.ie/download/radon02.pdf>
- Fergusson J.F.,** 1990. The heavy Elements. Chemistry, Environmental Impact and Health Effects. Pergamon Press.
- Fitzgerald W.F., Vandal G.M., Mason R.P., Dulac F.,** 1994. Air-water cycling of mercury in lakes. In: C.J. Watras and J.W. Huckabee (Eds), mercury as Global Pollutant. Towards integration and Synthesis, Lewis publishers, p. 203-220.
- Fleischer R.L., Price P.B., Walker R.M.,** 1965. Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications. University of California Press, Berkeley.
- Fleischer R.L., and Mogro-Camperio A.,** 1979. Radón enhancements In the earth evidence for intermittent upflow. *Geophys. Res. Lett.* 6 (5). p.361-364.
- Fortín, M.C, Rochette, P., Pattey, E.,** 1996. Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no-tillage small-grain cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 1541-1547.
- Gallego Díaz. Eduardo.,** 1987. Riesgos por exposición a radiaciones ionizantes, p. 18.
- Gabriel C. Mark y Williamson D.G.,** 2004. Principal biogeochemical factors affecting the speciation and transport of mercury through the terrestrial environment. *Environmental Geochemistry and Health* 26, p 421-424.
- Garage R. B y Espinosa G.,** 1997. Digital imaging system for track measurement. *Radiation Measurements*, vol 28 N° 3 p. 835 – 838.
- García E.** 1998. Información climática de México, escala 1:1,000,000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México, D.F.

- García M.R., Kotsarenco A., Pérez R., López Cruz A., 2007.** Estimación de concentraciones de <sup>222</sup>radón en 40 casas del estado de Querétaro. Ciencias de la atmósfera, UNAM. B-ole.
- García –Vindas R., Loria L.G., Jiménez R., 2000.** Ejemplos de anomalía de radón <sup>222</sup> como precursores de eventos sísmicos en Costa Rica. Rev. Geol. Americana Central, 23 p. 87-96.
- Gaona X., 2004.** El mercurio como contaminante global: Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente. Tesis para obtener el grado de Doctor, Universidad Autónoma de Barcelona, Departamento de Química, Unidad de Química Analítica, p. 38.
- Geological Mining Monograph of the State of Queretaro, 1992.** Consejo de Recursos Minerales, publishing number: M-4e, Secretaria de Energía, Minas e Industria paraestatal subsecretaria de minas e industria básica, p. 24-74.
- George, C.A., 1996.** State-of the-art instruments for measuring radon, thoron and their progeny.
- Gnamus A., Byrne A.R., Horvat M. 2000.** Mercury in the Soil-Plant-Deer-Predator food chain of a temperate forest in Slovenia. Environmental Science & Technology 34: 3337-3345.
- Gochfeld M., 2003.** Cases of mercury exposure, bioavailability and absorption. Ecotoxicology and Environmental Safety. 56, p. 174-179.
- Hair, Terry L., Baldwin A., Dwight Jr., al. 1995.** The Determination of Radon Activities in Ground Water from Wisconsin Tills in Southwestern Ohio and Southeastern Indiana. Ohio J. SCI. 95 (3). p. 248-253.
- Herrera, M.A., 1985.** Zona Arqueológica Ranas. Centro INHA. Querétaro, Qro.
- Hess C.T., 1985.** The occurrence of radioactivity in public water supplies in the United States. Health Phys. 48. p. 553-586.
- Higueras P., Oyarzun R., Biester H., Lillo J., Lorenzo S. 2003.** A first insight into mercury distribution and speciation in soils from the Almadén mining district, Spain. Journal of Geochemical Exploration 80: 95-104.
- Hines L.A., y Maddox R.N., 1987.** Transferencia de masa Y Fundamentos y Aplicaciones. Prentice Hall, México, D.F. Horvath A. Bohus L.O Urbani F. Marx G. Piroth A. Greaves E.D 2000. Radon concentrations in hot spring waters in northern Venezuela. J. Environ, Rad, 47. p. 127-133.
- Horvat M., Zvonaric T., Stegnar P., 1987.** Determination of mercury in seawater by cold vapour atomic absorption spectroscopy. Acta Adriaca 28 (1-2), p. 59-63.

- Huerta Cantera Hilda Edith., 2010. Tesis** Determinación de propiedades físicas y químicas de suelos con mercurio en la Región de San Joaquín, Qro y su relación con el crecimiento bacteriano. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ciencias Naturales
- Igarashi G., and Wakita H., 1995.** Geochemical and hydrological observations for earthquake prediction in Japan. *J. Phys. Eart.*, 43 p. 585-598.
- INEGI, Hoja F14-C58.** Carta Edafológica San Joaquín, 1974.
- Jackson M.L., 1964.** Análisis químico de suelos (Traducido por J. Bertrán). Ediciones Omega, S. A. Barcelona, España. 662 p.
- Jiménez O., y Gutierrez D. A., 1995.** Estudios de los niveles de plomo, cadmio y mercurio en aguas del Centro de Ecuador. *Heavy metals* vol. 39 p. 166-172.
- King C.Y., 1980.** Episodic radon changes in subsurface soil gas along active faults and possible relation to earthquakes. *J. Geophysics. Res.*, 85, p. 3065-3078.
- King C. Y., 1984.** Impulsive radon emanation on creepingserment of the San Andreas fault California. *Pa geoph 122.* p. 340-251.
- King C.Y., Koizumi N., Kitagawa T., (1995).** Hidrogeochemical anomalies and the 1995 Kobe earthquake. *Science*, 269 p. 38-39.
- King C.Y., 1980.** Episodic radon changes in subsurface soil gas along active faults and possible relation to earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 85, p. 3065-3078.
- King C. Y., 1984.** Impulsive radon emanation on creepingserment of the San Andreas fault California. *Pa geoph 122.* p. 340-251.
- King C.Y., Koizumi N., Kitagawa T., (1995).** Hidrogeochemical anomalies and the 1995 Kobe earthquake. *Science*, 269 p. 38-39.
- Lippmann J. et. al. 2005.** On the geochemistry of gases and noble gas isotopes (including  $^{222}\text{Rn}$ ) in deep crustal fluids: the 4000 m. KTB-pilot hole fluid production test 200203. *Geofluids.* 5, 56-66.
- Linn, D.M., Carski. T.H., Brusseau, M.L., Chang, F.H., 1982.** Sorptions and Degradation of Pesticides ond Organic Chemical in soils. *SSSA Sepec. Pub. No. 32*, Soils Science Society of America, Madison, WI.
- Liu S.L., Guo X.D., Fu B.J., Lian G., Wang J. 2007.** The effect of environmental variables on soil characteristics at different scales in the transition zone of the Loess Plateau in China. *Soil Use Management* 23: p. 92-99.
- Lobo A.1997.** Principios de Transferencia de Masa. UAM4, México, D.F.
- Low A, 1996.** Radon as a natural groundwater trace in the chalk aquifer, UK. *Environ, int*, 22, p. 333-338.
- Martinelli G., 1998.** Gas geochemistry and  $^{222}\text{Rn}$  migration processes. *Radiat. Prot. Dos.* /8, p.77-82.

- Martínez-Reyes, J., Mitre-Salazar, L.M., Hernández-Silva, G., Hinojo-Alonso, N.A. 2009.** La Mineralización de Mercurio (Hg) en la Sierra Gorda, región de San Joaquín, Qro. México. Marco Geológico. Centro de Geociencias. Universidad Nacional Autónoma de México. Campus Juriquilla. p 1-15.
- Mérida-Cruz Amador, 1988.** Trend Estructural de la Sierra de Querétaro favorable para encontrar yacimientos de oro, plata, plomo, zinc, mercurio y antimonio en los municipios de San Joaquín, Pinal de Amoles y Peña Miller, Querétaro: Consejo de Recursos Minerales, Reporte Técnico (inédito).
- Monnin M., and Seidel J.L., 1992.** Radon in soil-air and in ground water related to major geophysical events: A survey. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., A314, p. 316-330.
- Moreno I., Orioli, G., Bonadeo E. y Marzari R., 1999.** Dinámica de C y N en suelos bajo diferentes usos. Proceed. XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. (Texto completo en CD Rom.) Pucón, Chile.
- Nazaroff W., Feustel H., Nero A., Revzn K., Grimsrud D., Essling M., Toohey R., 1985.** Radon Transport into a detached one-story house with basement. Atoms Environ. 19-31.
- Nazaroff W. 1990.** Indoor radon, Exploring U.S. Federal policy for controlling human exposures Environ. Sci Technol; 24-774-782.
- Navarrete, M. y Cabrera, L., 1993.** Introducción al Estudio de los Radioisótopos. F UNAM, México, D.F.
- Nishizawa S., Igarashi G., Sano A., 1989.** Radon  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^-$  anomalies in hot spring water associated with A the 1995 earthquake swarm of the east coast of the Izu Peninsula, central Japan. App. Geoch, 13. p. 89.94.
- Notsu K., Wakita H., Igarashi G., and Sato T., 1991.** Hydrological and geochemical changes related to the 1989 sismic and volcanic activities of Izu Peninsula – J Phys, Earth, 39, 245-254.
- NOM-021.RECNAT. 2000.** Establece las especificaciones de fertilidad, sanidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreados y análisis. Diario Oficial de la Federación. México, D.F.
- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.** Establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Diario Oficial de la Federación. México, D.F.
- Núñez Lagos Roglá Rafael., 2003.** Revista de la Sociedad Nuclear. Las Redes de Vigilancia de la Radiología Ambiental. p. 13-14.
- Peña García Pablo. 2003.** TESIS Cambios de Radón en suelos y elementos Químicos Mayores y Traza en Agua Subterránea Asociados a Actividad Sísmica. UAM

- Pane M.B., 1995.** Utilization des elements en trace Cmne tracers des circulations subterraines en Milieu karstique. These Ooctorat, Universite de Mont, oelier Fiance.
- Papastefanou C., 2003.** An overview of instrumentation for measuring radon in soil gas and groundwater. J. Environ. Rad., In press,
- Porta-Casanellas J., López-Acevedo M., Roquero De Laburu C., 2003.** Edafología para la agricultura y el medio ambiente, Tercera edición; Impreso en España, Ediciones Mundi-prensa, p. 929.
- Puig-Diva E. 2006.** Apuntes de Energía Nuclear. [http://: noticiasjuridicas.com/articulos/00-Generalidades](http://noticiasjuridicas.com/articulos/00-Generalidades). Disponible Marzo 2012.
- Quindós L.S., Soto J., Fernández P.L. 1992.** Geología y niveles de radón en viviendas españolas. Revista Española de Física, 6 p. 1.
- Reicosky D.C, 2002.** Long - Term Effect of Moldboard Plowing on Tillage - Induced CO<sub>2</sub> Loss, in J. M. Kimble, R. Lai and R. F. Follet: Agricultural Practices and Polices for Carbon Sequestration in Soil. Lewis Publishers. Papers form symposium held July 1999 at Ohio State University, Columbus, Ohio, p. 87-96.
- Ritter M.E. 2000.** The physical environment: an Introduction to Physical Geography. Chapter 11: The soils system. [http://www.uwsp.edu/geo/faculty/ritter/geog101/textbook/soil\\_system/soil\\_development\\_soil\]-forming\\_factors.html](http://www.uwsp.edu/geo/faculty/ritter/geog101/textbook/soil_system/soil_development_soil]-forming_factors.html).
- Rowe E.J., Kelly M., Price L.E., 2002.** Weather system scale variation in radon -222 concentration of indoor air. The science of the total environment, 284, p.157-166.
- Schumann R.R. and Gundersen C.S.L., 1996.** Geological and climatic controls on the radon emanation coefficient. Environ. Int., 22, S4393446.
- Segovia N., and Bulbulian S., 1992.** Radon determination in groundwater. Rev. Mex. Fh., 38, p. 242-248.
- Segovia N., Tamez E., Morin J.P., Monnin M., Seidel J.L., 1993:** Recommendations for the setting up a radon in soil network based upon a decennial study. F/ucl. Tracks,?adiat. Meas., 22, p. 41-44.
- Segovia N., Tamez E., Peña P., Gaso M.I., Mireles F., Davila I., Juiriiilo L., 1994.** Atmospheric radon: Origin and transfer. Radiat. Prut. Dosim., 56. p. 157-1601.
- Segovia N., Tamez E., Peña P., Salazar S., Men M., Seidel J.L., Monnin M., (1997a).** Fluctuations of groundwater radon and chemical species in basaltic aquifers. Radiat. Meas., 28, 741.74.edit), GuruNanak Dev University, Amritsar, p. 167.1 74.
- Segovia N., Tamez Peña E.P., Carrillo J., Acosta E.A, Armienta M.A., Iturbe J.L., 1999c.** Groundwater flow system in the Valley of Toluca: An assay of natural radionuclides specific activities. Appl. Radiat. /sot., 50. p. 589-598.

- Sesana Raineri L.S., Valsecchi R., Facchini V., 1999.** Study on Rn.222 concentration in the soil. // *Nuovo Cimento*, 22 C. p. 457-462.
- Shwerkanni R., Graddui T.G., Durrani S.A., 1995.** The effect of soil parameters on the radon concentration values in the environment. *Radial Meas.*, 25. p. 581-588..
- Singer, M.J. y Ewing, S., 2000.** Soil Quality. *En Handbook of Soil Science. Chapter 11* (ed. Sumner, M. E.), 271-298, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Shing, B., Singh, N.p, Singh, S., Virj. H.S., 1984.** Radon-thoron estimation in soil using LR 115 plastic track detector. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, 8, p. 415-418.
- Smogy, 1990.** Natural Radioactivity Measurements in soils samples from Hamipur Districtic, Hiamachal Pradesh India. *Radiation Measurements*, 36 (2003) p. 546-549
- Soto J., Delgado M.T., Fernandez P., Gómez P., 1999.** Medida de Radiactividad en el Agua de Manantiales de Cantabria, España. *Nucleus*, No.27.
- Swift R. S., 2001.** Sequestration of carbon by soil. *Soil Sci.*, 166, 858-871.
- Tan K. H., 1993.** Principles of soils Chemistry. Academic Press, San Diego.
- Tanner A.E. and Olsen C.R. , (1964).** Technical highlights uf tie availability and entry projects of the US Department of Energy's radon research program. *Radar Prot. Dosi*, 45, p. 367-372.
- Tso M.W., Li C.,1987.** Indoorandoutdoor <sup>222</sup>Rn daughtersin HongKong. *Health Phys.*53(2), p. 175–180.
- Thomas J.H., Welch A.H., Lico, M.S., Hughes J.L., Whitney R., (1994).** Radionuclides in groundwater of the Carson River Basin, western idevada and eastern California, USA. *Appl. Geochem.*, 8, p. 447-471.
- Ulomov U.I., and Mavashev B.Z., (1967).** A precursor of strong tectonic earthquakes. *Dokl. Acad. Sci. USSR, Earth Sci. Sect.*, 176, p. 911.
- Vence G.F., Mokma D.L. Boyd S.A., 1985.** Phenolic compouds in soils of hydrosequence and developmental sequence of spodsols, *Soils Scs. Soc. Am. J.*, 50 p. 992-96.
- Volke T., et al., 2005.** Suelos contaminados por metals pesados y metaloides, muestreo y alternativas para su restauración. SEMARNAT –INE, 11.
- Wakita H., Nakamura Y., Sano Y., 1986.** Background fluctuations in groundwater radon observation. *J. Phys. Earth.*, 34, SE: S89.
- Wysocka M., Skowronek J., Xhalupnik K., Skubacz., 2001.** Changes of radon concentration in soil gas over some main fault in upper Silesian Coal Basin. *Proc.*

Yh/nt. Conf Rare Gas Geochemistry, (LHunyadi, I.Csige, J.Hakl, edit.), Debrecen, p. 61-700.

[www.helios3000.net/mercurio/vol\\_01\\_num\\_01.shtml](http://www.helios3000.net/mercurio/vol_01_num_01.shtml)