



Universidad Autónoma del Estado de México

---

---

Facultad de Ciencias

Emanaciones de Radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en aguas termales  
del Estado de México: Premonitor Geofísico

T E S I S

Para obtener el título de

Licenciatura en Física

Presenta:

Isahic González Martínez

Directores:

Dr. Pedro Guillermo Reyes Romero, Facultad de  
Ciencias, UAEM.

Dr. Faustino Juárez Sánchez, Instituto de Geofísica,  
UNAM.



El Cerrillo, Piedras Blancas

Marzo del 2017



### 8.5 Voto Aprobatorio : Evaluación Profesional

Facultad de Ciencias  
Subdirección Académica  
Departamento de Evaluación Profesional



Versión Vigente No. 06

Fecha: 23/01/2015

## VOTO APROBATORIO

Toda vez que el trabajo de evaluación profesional, ha cumplido con los requisitos normativos y metodológicos, para continuar con los trámites correspondientes que sustentan la evaluación profesional, de acuerdo con los siguientes datos:

Nombre del pasante	Isahic González Martínez		
Licenciatura	Física	N° de cuenta	1027469 Gen: Masculino
Opción	Tesis	Escuela de Procedencia	Facultad de Ciencias
Nombre del Trabajo para Evaluación Profesional	Emanaciones de Radón ( <sup>222</sup> Rn) en aguas termales del Estado de México: Premonitor geofísico		

	NOMBRE	FIRMA DE VOTO APROBATORIO	FECHA
ASESOR	Dr. Pedro Guillermo Reyes Romero		30/01/2017
COASESOR ASESOR EXTERNO (Sólo si aplica)	Dr. Faustino Juárez Sánchez		20/I/2017

	NOMBRE	FIRMA Y FECHA DE RECEPCIÓN DE NOMBRAMIENTO	FIRMA Y FECHA DE ENTREGA DE OBSERVACIONES	FIRMA Y FECHA DEL VOTO APROBATORIO
REVISOR	Dr. Aarón Gómez Díaz	 11/Enero/2017	 23/Enero/2017	 30/Enero/2017
REVISOR	Dr. Jorge Mulia Rodríguez	 11/Enero/2017	 23/Enero/2017	 30/Enero/2017

Derivado de lo anterior, se le **AUTORIZA LA REPRODUCCIÓN DEL TRABAJO DE EVALUACIÓN PROFESIONAL** de acuerdo con las especificaciones del anexo 8.7 "Requisitos para la presentación del examen de evaluación profesional".

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
ÁREA DE EVALUACIÓN PROFESIONAL	M. en C. Adriana Miranda Cortado		8 de marzo 2017

## **Agradecimientos**

Al Dr. Pedro Guillermo Reyes Romero por asesorarme durante la elaboración de este trabajo, por su apoyo y confianza.

Al Dr. Faustino Juárez Sánchez por enseñarme el mundo de las Geociencias, así como su apoyo y tiempo brindado durante este trabajo.

A los balnearios en el estado de México que se visitaron por permitirnos realizar trabajos de campo en sus instalaciones.

A la beca otorgada por el consejo interno IGEF de la facultad de Geofísica de la UNAM.

Al instituto de Geofísica de la UNAM, en especial al Laboratorio de Radiactividad Natural por facilitarme trabajar en sus instalaciones.

A mis padres por apoyarme todo el tiempo durante la carrera y durante la elaboración de este trabajo, por sus consejos regaños, en fin no tengo como pagarles.

A mis profesores compañeros y amigos por las ratos de risas así como sus consejos y palabras de apoyo.

A Araceli Gaspar Martínez por ser mi compañera de mis travesías por aconsejarme y soportarme, gracias por estar a mi lado.

# Índice

## Contenido

Resumen.....	6
Introducción .....	7
Objetivos .....	9
Capítulo 1. ....	10
Aspectos Generales.....	10
Estructura de la materia.....	10
Radiaciones e interacción con la materia. ....	11
Serie de desintegración del Uranio. ....	13
Decaimiento radiactivo y velocidad de desintegración. ....	15
Radón .....	18
Transporte de Rn en fuentes geológicas.....	20
Detectores.....	21
Detector Geiger Müller .....	21
Detector RDA-200 .....	21
Detector Rad-7 .....	22
Capítulo 2 .....	24
<b>Geología de México.</b> .....	24
Región Noroeste.....	25
Región Norte y Noreste.....	25
Región central de México.....	25
Región sureste.....	27
Fallas geológicas y emanación de Radón .....	28
Tipos de fallas.....	29
Geofísica.....	33
Métodos Geofísicos.....	33
Zonas de estudio. ....	34
Composición Geológica del Estado de México.....	34
Aguas Termales en el Estado de México .....	36
Capítulo 3 .....	38
Metodología .....	38
Actividades de campo .....	38

Medición en agua .....	38
Lecturas medidas en salidas de campo .....	39
Medición en fallas geológicas. ....	40
Medición con el Rad-7 en Fallas Geológicas .....	40
Medición en laboratorio .....	41
<b>Capítulo 4</b> .....	<b>42</b>
Resultados .....	42
Medición de Radón en fuentes termales .....	42
Actividad sísmica .....	45
Análisis de U en las aguas termales por ICP .....	46
Capítulo 5 .....	49
Análisis de Resultados y Conclusiones .....	49
Conclusiones .....	54
Bibliografía .....	56

## Resumen

El Radón es un gas radiactivo presente en la naturaleza, que emana de las rocas a través de fallas y/o fisuras.

Las aguas termales son aguas minerales que salen del suelo, provenientes de las capas subterráneas de la tierra, son usadas por los seres humanos para relajación y curación al sumergirse en ellas, como están en contacto con la naturaleza es evidente que haya concentraciones de Radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), es por esto que se debe de conocer la cantidad de Radón que hay en estas fuentes naturales.

En el estado de México hay fuentes naturales de agua (ojo de agua, aguas minerales), al estar emanando a la superficie del subsuelo en su trayectoria están en contacto con rocas y diferentes minerales lo que produce el deterioro de estos macizos rocosos. El agua que se mueve en el subsuelo lleva consigo una velocidad  $v$ , una fuerza  $F$ , una temperatura  $T$  y una presión  $P$ , siendo estos fenómenos físicos lo que permite el deterioro de estos minerales, estas corrientes de agua se encuentran por lo general en líneas de fallas, ya que a lo largo de los planos de fallas pueden introducirse las aguas subterráneas formando una mezcla con los gases que se van liberando al fracturar las rocas con las que se impactan.

La liberación de Radón dentro de las rocas se lleva a cabo cuando estas se rompen o fracturan parcialmente, este proceso es originado por eventos tectónicos, sísmicos o volcánicos que provocan fracturamiento de rocas. Estos cambios que ocurren en la naturaleza pueden dar lugar a fallas geológicas.

Los balnearios dan información físico-química (temperatura,  $pH$ , conductividad eléctrica, entre otros). En este trabajo se realizó un estudio de la zona con un detector Geiger Müller y se recolecto muestras líquidas de estos lugares con botellas esterilizadas, para su posterior análisis en el laboratorio con ICP (Inducción Acoplada por Plasma).

En el estado de México también podemos encontrar fallas geológicas activas cercanas a los balnearios, como lo es el graben de Acambay. Saber el tipo de geología que posee cada municipio es importante para denotar el tipo de suelo por el que esta emanando la fuente termal.

Lo anterior sirve para aplicar este gas como un indicador natural de un evento de fracturamiento, por lo que el monitoreo de la concentración de este elemento y otros parámetros pueden servir como herramienta geofísica para la prospección minera, petrolera y como precursor de actividad tectono-sísmica-volcánica.

## Introducción

La radiactividad es la inestabilidad de los núcleos de ciertos elementos, es decir que se mantienen en un estado excitado en sus capas electrónicas, esto es una forma de manifestar la energía nuclear. Para alcanzar estabilidad en el núcleo los isotopos pesados deben decaer en uno más ligero a través de la emisión de energía electromagnética y de partículas con determinada energía cinética.

Las radiaciones emitidas por los elementos radiactivos son principalmente partículas alfa, partículas beta y rayos gamma, un ejemplo donde se puede observar la radiación es en medicina (radioterapias) que consiste en que algunos átomos como el Uranio, Radio y Torio que son inestables y pierden constantemente partículas alfa, beta y gamma (rayos X).

La radiación es un fenómeno físico de origen natural o artificial (radiactividad inducida).

Elementos ligeros pueden convertirse en radiactivos si se les bombardea con partículas nucleares, por ejemplo una sustancia puede ser bombardeada con neutrones provenientes de un reactor nuclear y un núcleo puede absorber un neutrón volviendo el átomo inestable y alcanzando la estabilidad a través de la desintegración radiactiva, este evento es mejor conocido como radiactividad inducida.

La distribución de los elementos radiactivos en la corteza terrestre, es debido a la geología propia de la tierra. En el caso de la actividad geológica, los procesos tectónicos y de vulcanismo, son los principales factores en contribuir y exponer los minerales radiactivos durante su actividad en diferentes partes del planeta.

Un elemento radiactivo de origen natural es el Radón, es producto de la desintegración del Radio ( $^{226}\text{Ra}$ ) de la cadena radiactiva del uranio ( $^{238}\text{U}$ ). El Radón tiene un isotopo el  $^{222}\text{Rn}$ , es un radionúclido cuyo periodo de semidesintegración es de aproximadamente 3.8 días, es un gas inodoro e incoloro, su transporte en ambientes geológicos puede describirse por procesos físicos como flujos de advección, difusión, entre los más importantes.

Los átomos del Radón tienen un retroceso muy pequeño ( $3,0 \times 10^{-8} \text{ cm}$ ) por ello solo los que están en la superficie de los granos de las rocas logran emanar fácilmente, facilitando con ello se transporte en aguas subterráneas circundantes. Así las concentraciones de Radón en aguas subterráneas dependen de la superficie de contacto de las rocas con el acuífero, el origen propio de las rocas es proporcional a las concentraciones de Uranio dentro de las rocas.

Los hijos del  $^{222}\text{Rn}$  son:

$^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ .

Y estos elementos tienen un semiperiodo relativamente pequeño en comparación con la del  $^{222}\text{Rn}$ , esto permite que el Radón pueda recorrer grandes distancia antes de desintegrarse por completo.

Las aguas subterráneas afectan de dos maneras en el comportamiento de las rocas, la primera que tiene lugar en rocas porosas (areniscas), que es gobernada por la tensión efectiva, la segunda que se da en macizos rocosos formado por materiales poco porosos que es la mayor parte de la roca.

Los acuíferos cercanos a las zonas magmáticas, principalmente de origen termal (mejor conocidos como aguas termales que emergen a la superficie), recorren grandes distancias antes de llegar a la superficie. La velocidad es un factor muy importante en el transporte del gas Radón, si el transporte de las aguas subterráneas es muy pausado hay mayor probabilidad que el Radón se desintegre, en otro caso si la velocidad del agua subterránea que transporta este elemento es mayor permitirá que no se desintegre por completo antes de emanar a la superficie, entonces se podría encontrar una cantidad medible de Radón en el lugar.

Las aguas termales son un sitio de interés para realizar mediciones de concentraciones de Radón al llevar más rápidamente la señal geoquímica a la superficie, el estudio de estas es esencial para la salud de las personas ya que puede a ver grandes concentraciones de este gas.

Este tipo de aguas son usadas por los seres humanos como atracciones turísticas. Sin embargo como es radiación es dañina en grandes cantidades para los humanos, siendo el Radón el segundo causante de cáncer pulmonar.



## Objetivos

- Determinar las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  en aguas termales del Estado de México.
- Determinar si hay una relación entre el pH, temperatura (T) y la concentración de  $^{222}\text{Rn}$ .
- Determinar la posible correlación entre las emanaciones de radón en aguas termales y una actividad geológica (sísmica y/o subsidencia).

## Capítulo 1.

### Aspectos Generales

El Radón, un elemento de la tabla periódica de los elementos químicos, es un gas de origen natural que se encuentra en la naturaleza debido a la geología propia de la tierra, conocerlo y saber sus características es esencial para el ser humano, la Física de radiaciones explica el decaimiento radiactivo de este y algunas de sus características de sus isotopos, es transcendental conocer el comportamiento de los radioisótopo del Rn en un ambiente geofísico.

Las aguas minerales al provenir del subsuelo tienden a disolver rocas a su paso. Al haber fracturas en las rocas provoca la salida de los gases que se encuentran en estos minerales y tienden a mezclarse con el agua emanando a la superficie, al ser una fuente de atracción turística a la que el ser humano está expuesto todo el tiempo, conocer las concentraciones de gas Radón es esencial para saber a qué cantidad de radioisótopos estamos expuestos.

### Estructura de la materia.

El átomo es la unidad más pequeña de la materia, fue nombrada por Demócrito (450 años antes de Cristo), quien afirmó que la materia estaba compuesta por átomos. Después de Demócrito vino Dalton, en 1803 dio a conocer su teoría atómica, sin embargo al igual que Dalton dijo que el átomo era indivisible lo cual se sabe hoy en día que es un error, no fue hasta el año 1906 que J.J Thomson quien descubrió el electrón una parte fundamental del átomo. En 1911 Rutherford fue el primero en proponer la teoría de la estructura del átomo.

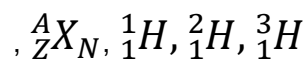
La teoría de Rutherford nos permite entender el comportamiento y estructura del átomo, él planteó que los átomos están compuesto por un núcleo donde se encuentran neutrones y protones (nucleones), alrededor de este núcleo orbitan los electrones de acuerdo a su nivel energético. Los electrones tienen carga negativa, los protones carga positiva y los neutrones no tiene carga alguna. Sin embargo el modelo de Rutherford no explica los niveles de energía. En 1913 Niels Henrik David Bohr propuso el modelo cuantizado del átomo es decir que la órbita que describe el electrón no puede tener cualquier radio, y solo están permitidas aquellas orbitas cuyo momento angular está cuantizado. A diferencia de Bohr, el modelo de Rutherford considera un número infinito de orbitas. <sup>[2]</sup>

De esta manera el núcleo define las propiedades físicas y las orbitas propiedades químicas, lo que mantiene unido al átomo son las fuerzas de atracción y repulsión (carga positiva y negativa).

Un átomo tiene un número atómico determinado por el número de protones generalmente representado por Z, y un número de masa, que es igual al número de protones, más el número de neutrones que viene representado por A. Por tanto el número de neutrones representado por N, es la diferencia entre el número de masa y el número atómico (A-Z).

El número atómico representa la naturaleza química de un elemento, los isotopos que son una especie nuclear con igual número atómico pero diferente número de masa y número de neutrones.

Ejemplos de isotopos de Hidrogeno:



Radiaciones e interacción con la materia.

La radiactividad es la inestabilidad de los núcleos atómicos. La materia es radiactiva cuando el núcleo emite partículas subatómicas, o radiación electromagnética. En el transcurso de degradación por el cual los núcleos emiten partículas o rayos, perdiendo masa o energía, convirtiendo el elemento original en otro, esto es conocido como decaimiento radioactivo. El empleo de radiación tiene dos aspectos fundamentales: penetración de la materia y depósito de energía. <sup>[6]</sup>

Las radiaciones emitidas por los núcleos atómicos son principalmente: partículas alfa, partículas beta, partículas gamma y radiación con neutrones. <sup>[6]</sup>

### **Radiación alfa ( $\alpha$ ).**

Las partículas alfa representado por la letra griega  $\alpha$ , formado por dos protones y dos neutrones, considerada como núcleos de átomos de helio, tienen un gran número másico, su capacidad de penetración en un material es muy corto, poseen una masa de cuatro una (unidad de masa atómica) y dos cargas positivas.

Las partículas alfa al penetrar la materia atraen eléctricamente a los electrones cercanos a su paso ionizando a los átomos, perdiendo una pequeña cantidad de energía al ionizar frenándose lentamente hasta llegar al reposo. Cuando su velocidad ya se ha reducido de manera perceptiva, atrapan electrones del material y finalmente se detienen produciendo restos de helio dentro del material.

Como su masa es mucho mayor que la de los electrones que se encuentra a su paso tiene una trayectoria recta. El alcance de estas partículas es mayor si tienen

una gran energía. Las partículas alfa provenientes de una fuente radiactiva tienen el mismo alcance en virtud de que son monoenergéticas.

Si un núcleo emite partículas alfa, este pierde dos unidades en carga y cuatro en masa, ahora bien este átomo se convierte en otro elemento con número atómico menor. Estos significan que el elemento radioactivo que decae por la emisión de partículas alfa, pasan a ocupar dos lugares a la izquierda de la posición original en la tabla periódica de los elementos.

### **Radiación beta ( $\beta$ ).**

Las radiación beta está representada por la letra griega  $\beta$ , se presenta en partículas beta negativas ( $\beta^-$ ) y partículas beta positivas ( $\beta^+$ ).

Partículas  $\beta^-$

Las partículas  $\beta^-$  también conocidas como negatrón, es un electrón que es emitido por el núcleo, debido a que un neutrón se convierte en un protón dando lugar a una partícula beta y aun antineutrino del electrón (conservación de la masa energía).



Al llevarse a cabo esta desintegración el núcleo resultante tiene el mismo número de nucleones, pero diferente número atómico al aumentar un protón. Donde  $\bar{\nu}$  es un neutrino sin carga (antineutrino), llevándose parte de la energía de desintegración.

Partículas  $\beta^+$

Las partículas  $\beta^+$  también llamados positrón, esta se lleva acabo cuando un protón se transforma en un neutrón y en una partícula de la misma masa que el electrón pero esta con carga positiva es expresada por el núcleo.



Un neutrón fuera del núcleo puede convertirse en protón por una desintegración beta, esto porque su masa es mayor que la del protón. Sin embargo un protón solo podrá transformarse en un neutrón dentro del núcleo.

## Radiación gamma ( $\gamma$ )

Los rayos gamma ( $\gamma$ ), son radiaciones de tipo electromagnético, parecidos a los rayos x, la luz u ondas de radio, pero con menor longitud de onda y por tanto con mucho mayor energía, al no tener carga no pueden ser frenados por la ionización al atravesar por el material.

Los rayos gamma pueden atravesar un material solido varios centímetros sin sufrir ningún cambio y sin afectar la materia que atraviesan, después sufren alguno de los tres fenómenos físicos que son: efecto Compton, efecto fotoeléctrico y producción de pares.

Serie de desintegración del Uranio.

El Uranio es el único combustible nuclear para generar energía, pero al contrario que los hidrocarburos, el Uranio no contribuye al efecto invernadero.

El Uranio, Torio y Potasio junto con sus productos de decaimiento radiactivos se encuentran presentes en todos los tipos de rocas. Los suelos que están formados de esta geología contienen cantidades de radioelementos.

El Uranio al estar en las rocas, aguas naturales y los minerales, se encuentra constituido por tres isotopos radiactivos como son:

- $^{238}\text{U}$ , con una abundancia del 99.28% con una vida media ( $t_{1/2}$ )  $4.5 \times 10^9$  años
- $^{234}\text{U}$ , con una abundancia de 0.0054% con una vida media de ( $t_{1/2}$ )  $2.5 \times 10^5$  años
- $^{235}\text{U}$ , con una abundancia de 0.71% con una vida media de ( $t_{1/2}$ )  $7 \times 10^8$  años

El  $^{238}\text{U}$  y  $^{235}\text{U}$ , son cabezas de serie de dos familias radiactiva, algunos autores los describen como radioisótopos primarios porque existen desde que se formó la tierra o más (la vida del universo). Estos van decayendo en otro elemento más estable. El  $^{234}\text{Th}$  es un sucesor (hijo) del  $^{238}\text{U}$ , dando como producto estable final isotopos de Plomo [1].

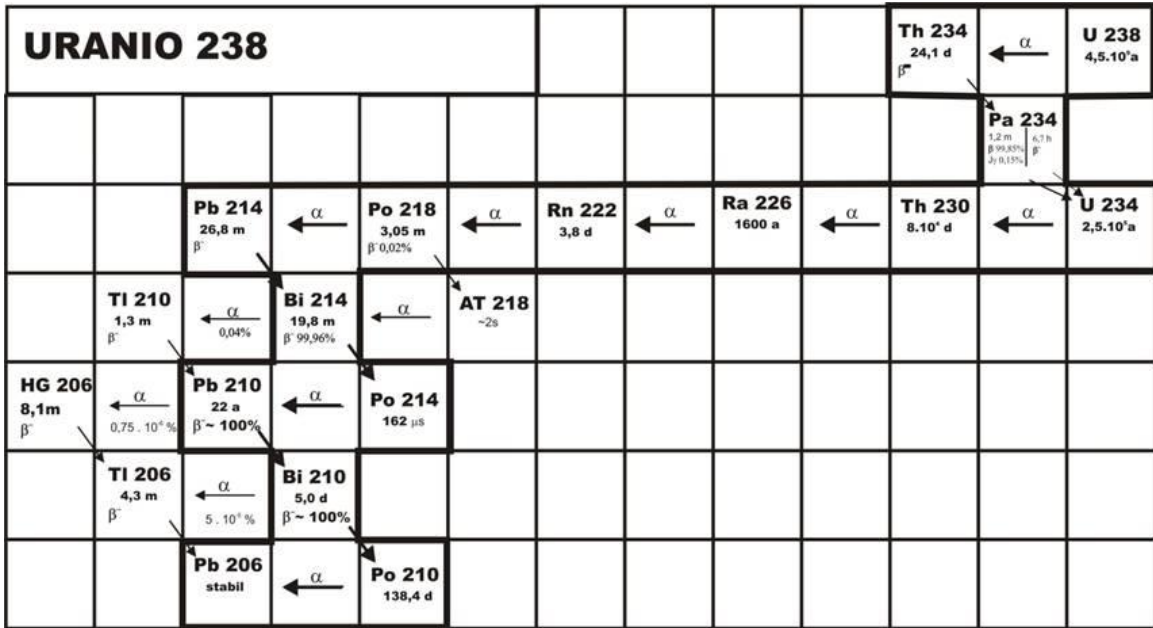


Figura 1: Cadena de desintegración del <sup>238</sup>U [1].

En la figura anterior (Figura 1), los productos de desintegración del Uranio muestran dos grupos los llamados de “vida corta” como son: <sup>218</sup>Po (3.05 min), <sup>210</sup>Tl (1.3 min), <sup>214</sup>Bi (19.8 min), <sup>214</sup>Pb (26.8 min), <sup>206</sup>Hg (8.1 min), <sup>206</sup>Tl (4.3 min), todos con una vida media pequeña, y los llamados de “larga vida” como son: <sup>234</sup>Th (24.1 días), <sup>226</sup>Ra (1600 años), <sup>222</sup>Rn (3.8 días) entre otros.

Al decaer la serie radiactiva en <sup>222</sup>Rn (Radón), los sucesores se aproximan rápidamente al equilibrio, debido a sus vidas cortas.

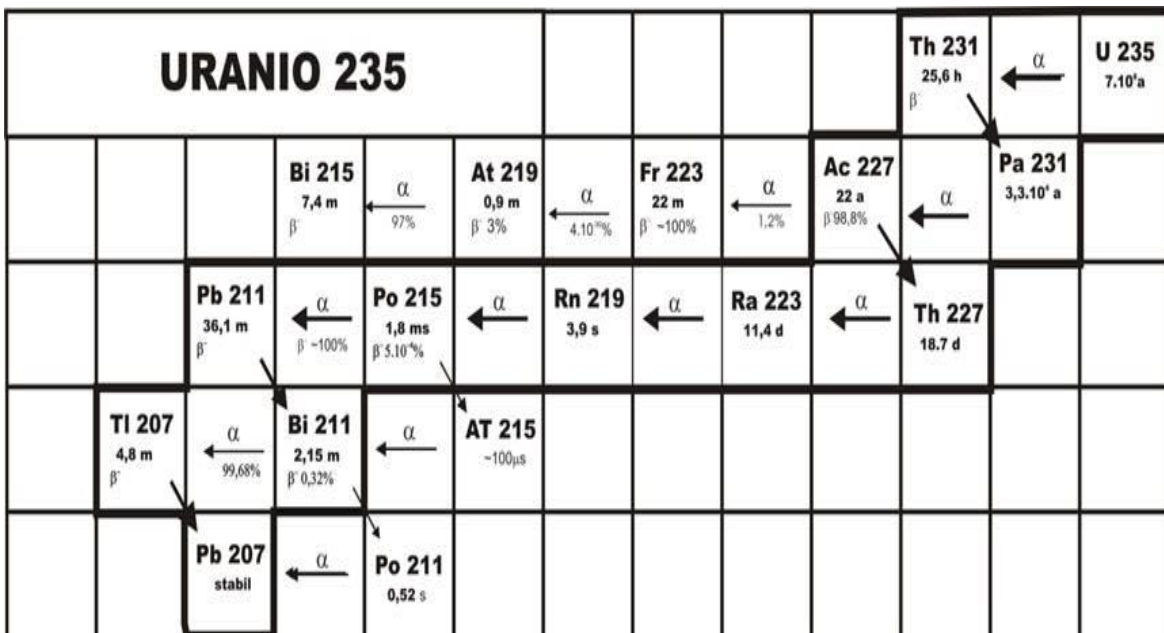


Figura 2: Cadena de desintegración del <sup>235</sup>U [1].

El  $^{235}\text{U}$  al ser una cabeza de serie va decayendo a otro elemento y perdiendo energía en el camino (partículas alfa), hasta llegar a un isotopo del Radón que es el  $^{219}\text{Rn}$  denominado actinon proveniente del actinio (Figura 2).

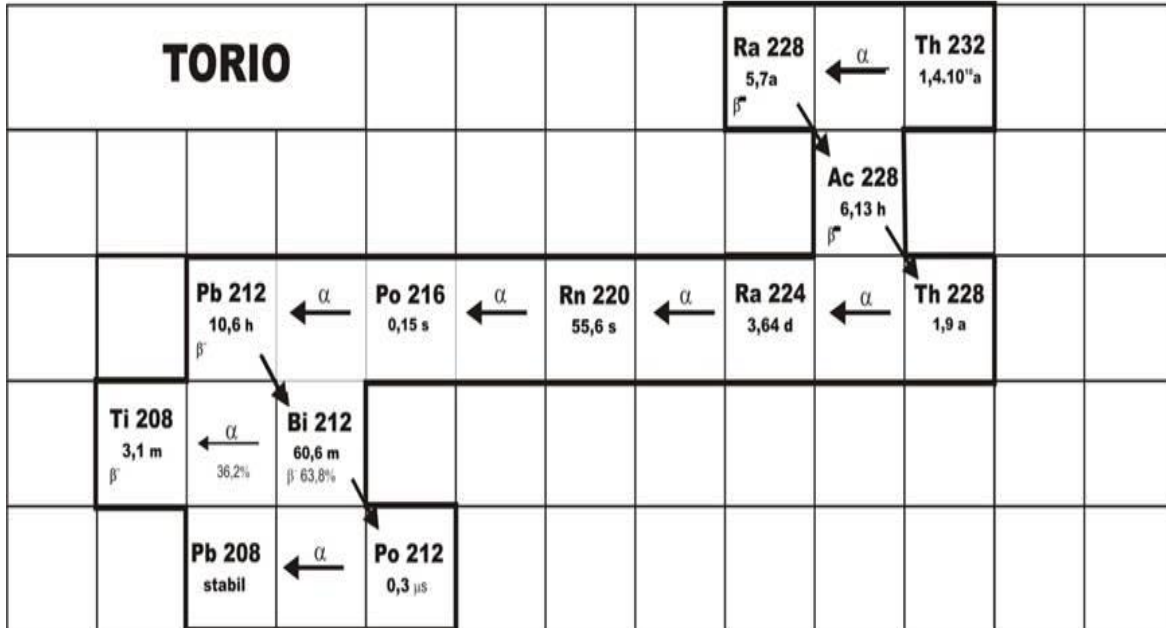


Figura 3: Cadena de desintegración radiactiva del Torio ( $^{232}\text{Th}$ ) [1].

La cadena del Torio al igual que las anteriores nos muestra la vida que va siguiendo cada uno de sus hijos y su vida media que tiene cada uno de estos, hasta llegar al  $^{208}\text{Pb}$  que es un elemento estable, en el camino se encuentra a otro de los isotopos del Radón, este es el  $^{220}\text{Rn}$  denominado Torón proveniente del torio con una vida media de 55.6 s (Figura 3).

Decaimiento radiactivo y velocidad de desintegración.

La actividad radiactiva de un isotopo o velocidad de desintegración es el número de desintegraciones que experimenta un isotopo en una unidad de tiempo, donde cada núcleo radiactivo tiene su propio rango de inestabilidad (vida media). En el sistema internacional (SI) se utilizan las unidades de Becquerelios (Bq), donde los Becquerilos son las desintegraciones que ocurren en un segundo aunque frecuentemente se utilizan el Curie o curio que equivale a  $3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$  [3].

Experimentalmente se puede afirmar que la actividad de un isotopo radiactivo solo depende del tiempo y no de otro factor disminuyendo de forma exponencial. El

proceso de desintegración está determinado por probabilidades estadísticas, ya que no se puede predecir cuándo se desintegrara un determinado núcleo.

La constante de decaimiento está representado por “ $\lambda$ ” que es característica para cada especie radiactiva, la velocidad de desintegración de una sustancia radiactiva es proporcional al número de átomos presentes, y está determinado por la siguiente ecuación:

$$dN = -\lambda N dt \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2)$$

Donde:

$\lambda$ : Cte. de decaimiento, característica de cada núclido.

$\frac{dN}{dt}$ : Desintegración de núcleos  $N$  en un tiempo  $t$ .

$N$ : Número de átomos

Siendo esta la ecuación fundamental de decaimiento radiactivo. El signo negativo es físico para indicar que  $N$  disminuye con el tiempo

Ahora bien tomamos la ecuación del decaimiento radiactivo:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (3)$$

$$\therefore \frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (4)$$

Integrando:

$$\ln N = -\lambda t + c \quad (5)$$

Con:

$$t = 0, N = N_0 \text{ y } \ln N_0 = c$$

Tenemos:

$$\therefore \ln N = -\lambda t + \ln N_0 \quad (6)$$

Donde  $N$  y  $t$  son variables,  $N_0$  y  $\lambda$  constantes, la ecuación 6 es una línea recta cuya pendiente es  $-\lambda$ .



Si cambiamos términos:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad (7)$$

Multiplicando por una exponencial en ambos términos nos resulta:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad (8)$$

$$\therefore N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (9)$$

Esta expresión matemática es la *ley del decaimiento radiactivo*.

Hasta este momento solo hemos mencionado la vida media de los radioisótopos pero ¿qué es?

La vida media ( $t_{1/2}$ ) como ya se había denotado, es el tiempo tomado por cualquier actividad inicial de un radionúclido para reducir a la mitad el número de núcleos presentes.

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}} \quad (10)$$

Aplicando logaritmos:

$$\ln 1 - \ln 2 = -\lambda t_{1/2} \quad (11)$$

$$\therefore 0 - 0.693 = -\lambda t_{1/2} \quad (12)$$

$$\therefore t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (13)$$

## Radón

El ser humano está todo el tiempo expuesto a la radiactividad, la radiación de origen natural está dispersa en todo el ambiente, desde los rayos cósmicos que llegan desde el espacio, los alimentos, en las bebidas, en el aire, incluso la tierra misma es radiactiva. Las plantas, animales y los seres humanos estamos expuestos a la radiación natural [4].

El gas Radón (Rn) un elemento químico, al ser de origen natural está presente en el mundo y distribuido con respecto a la geología misma del planeta.

El Radón es un elemento de la tabla periódica, pertenece al grupo de los gases nobles, es inodoro, incoloro y es radiactivo proveniente de la desintegración del Uranio (U), un elemento que se encuentra en todos los tipos de suelos e incluso en las rocas y el agua. El Radón por sí solo no se mueve, necesita de un fenómeno físico como el viento para moverse, al salir de la ruptura de las rocas este tiende a moverse hacia arriba por las corrientes de aire, en áreas con poca ventilación las concentraciones de Radón es mayor [4][7].

La solubilidad del Radón es mucho menor al aumentar la temperatura en el agua, en cambio al aumentar la presión se incrementa de manera lineal, de este modo el Radón pasa a constituir parte de las aguas subterráneas.

El Uranio se concentra en su fase líquida y se concentra en materiales enriquecidos de sílice de esta manera las rocas ígneas de composición granítica están enriquecidas en Uranio.

### **Isotopos del $^{222}\text{Rn}$ .**

El Radón es el elemento químico con número 86 en la tabla periódica, se conocen 27 isotopos del Radón desde el  $^{200}\text{Rn}$  hasta el  $^{206}\text{Rn}$ , pero los más comunes y por su gran abundancia son  $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  y  $^{222}\text{Rn}$ .

Anterior mente se vio que existen tres cadenas radiactivas de origen natural que dan inicio con  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$ , donde estas cadenas van decayendo en un elemento cada vez más estable y todas ellas terminan con la formación de un isotopo estable de Plomo.

Ahora bien de la serie radiactiva del  $^{238}\text{U}$ , como se puede observar en la figura 1, se encuentra el  $^{222}\text{Rn}$ , siendo este el sucesor del Radio ( $^{226}\text{Ra}$ ) que al decaer pierde una partícula alfa, según la siguiente reacción nuclear:



El Radón al ser un elemento radiactivo también tiende a decaer en otro elemento por la pérdida de otra partícula alfa dando origen al  $^{218}\text{Po}$  el cual es un metal que se adhiere en la superficie y está en contacto con las partículas de polvo en el aire, teniendo una vida media de 3.05 minutos.

Los isotopos radiactivos del Radón son materiales pesados como Bismuto, Plomo y Polonio que se describió anteriormente, estos se desintegran emitiendo partículas Alfa, Beta y Gamma.

### **Emanación de Radón**

El Radón  $^{222}\text{Rn}$  se encuentra dentro de las rocas, solo cuando estas se rompen empieza la emanación y distribución de Radón en el ambiente. En zonas aisladas de corrientes de aire hay una gran abundancia de este gas.

Existe más emanación de este gas en suelos porosos, donde el Radón encuentra fácilmente la salida al exterior a través de los huecos, a diferencia de suelos compactos o arcillosos que dificulta la salida de este elemento.

Las rocas de tipo graníticas son ricas en Uranio y al ser este elemento cabeza de serie es evidente que haya altas concentraciones de Radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), suelos graníticos muy fracturados tiende a desprenderse más Radón a diferencia de los graníticos compactos ya que este elemento solo sale de las fracturas de las rocas de granito, esto con lleva un gran riesgo en el mundo de la construcción el empleo de granito para la elaboración de casas.

Otros fenómenos ambientales como la humedad, presión atmosférica y temperatura también interactúan con los niveles de Radón en el medio (aire), un suelo húmedo poroso con una presión atmosférica baja y una temperatura favorable ayuda a la emanación de Radón mientras que un suelo seco, una presión atmosférica alta y una temperatura baja, dificultan la emanación de Radón [4].

Este elemento es más fácil encontrarlo en zonas bajas ya que su densidad es mayor que la del aire y tiende a depositarse en zonas con poca ventilación como sótanos garaje etc.

#### Transporte de Rn en fuentes geológicas

El Radón al ser un gas puede mezclarse con el medio (suelo, agua y aire). Algunos factores influyen en el transporte del Radón en el subsuelo como son: tipo de roca, agua, coeficiente de difusión y geometría de los poros <sup>[6][4]</sup>.

El suelo que está compuesto por materia orgánica (naturaleza muerta), es una pequeña capa que se ha ido formando a través de los años por la desintegración de las rocas, estos sólidos contienen importantes cantidades de Radio al tener como sucesor el Radón que es un gas que penetra los poros de los suelos y se difunde a través de la superficie a las estructuras.

En las fuentes subterráneas el Radón se disuelve con el agua, este es el principal mecanismo de transporte del <sup>222</sup>Rn a través de los poros de las rocas, siguiendo la trayectoria de la afluyente. La erosión de las rocas que se encuentran en contacto con el agua dependerá de la velocidad con la que está fluyendo. Los procesos de transporte que ocurren durante mucho tiempo no afectan las concentraciones apreciables, ya que en este tiempo se tendrá menos del uno por ciento de la cantidad original, es decir que el Radón no necesita grandes distancias para una gran difusión, la única variable será la velocidad del líquido como ya se había mencionado.

El líquido dentro de las grietas de las rocas también tiene una velocidad y una dirección, es decir que si dentro de estas se encuentra grandes cantidades de los elementos como el <sup>238</sup>U y <sup>226</sup>Ra, es muy probable que haya concentraciones de <sup>222</sup>Rn, como las corrientes de agua están incidiendo sobre las fisuras de las rocas también las está disolviendo haciendo las grietas cada vez más grandes y arrastrando este elemento radiactivo a través de las superficies fracturadas <sup>[4][6]</sup>.

Algunos eventos geológicos modifican la permeabilidad del suelo como el movimiento de las placas tectónicas y de vulcanismo, cuyos fenómenos a tribuyen al rompimiento y disolución de estos minerales dando como resultado la liberación de gas Radón <sup>[7][8]</sup>. Se puede afirmar que las concentraciones de <sup>222</sup>Rn se imputan a un movimiento tectónico activo.

## Detectores

La radiación no puede ser detectada por el ser humano sin tener una herramienta tecnológica que nos indique que hay algún tipo de propagación de energía o partículas subatómicas, en el ambiente que nos rodea.

### Detector Geiger Müller

Un contador Geiger Müller (G-M) es un detector de partículas alfa, beta y radiación gamma, el primer detector G-M fue introducido por Hans Geiger y Walter Müller en 1928 de ahí la abreviatura G-M.

El contador G-M consiste en un tubo metálico sellado relleno de un gas teniendo en su centro un hilo muy fino a un alto voltaje entre el alambre y el cilindro, cuando un electrón o un ion atraviesan el tubo se desprenden electrones de los átomos del gas, y debido a que el hilo tiene una carga positiva son atraídos hacia este, al hacer esto ganan energía produciendo que se lleven a cabo más colisiones con los átomos del gas liberando más electrones, este proceso se lleva a cabo hasta que se convierte en una avalancha que produce un pulso de corriente detectable. [12]



Figura 4: Detector Geiger Müller

### Detector EDA-200

El detector RDA-200 fue creado por la compañía EDA en Toronto Canadá, para la detección de los niveles de Radón en el ambiente. El instrumento da una respuesta lineal siendo un detector muy sensible a la detección de radiación, es usado en zonas de uso residencial hasta en la prospección minera.

El detector EDA-200 es conocido como una técnica de muestreo activo ya que permite una medida directa a través de filtros de celulosa.

Las características del detector son:

1. Detección simultánea de Radón y los hijos del radón en zonas residenciales y en la industria.
2. Identificación de las fuentes de Radón.
3. Determinación de  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{222}\text{Rn}$  en los suministros de agua publica

El detector EDA-200 es un detector electrónico para la detección de partículas alfa producidas por el decaimiento del Radón. Las partículas alfa producidas por el  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  es el calibrador para el detector produciendo una luz parpadeante en el detector, cada luz parpadeante es convertida en un impulso eléctrico, estos impulsos son acumulados y contados, finalmente son mostrados digitalmente, después de un conteo predeterminado la lectura es mostrada.

El detector EDA-200 tiene una eficiencia superior al 35% (cpm), o 3.3 cpm/pCi, con una capacidad de contar 99999, con periodos de conteo de 1, 2, 5, 10, 30, y 60 minutos con un ruido de fondo de 3.10pCi/L.

Para filtrar el Radón mezclado en el aire se usan celdas que cumplen la función de absorber el aire, al conectar la manguera de nylon (Figura 5).

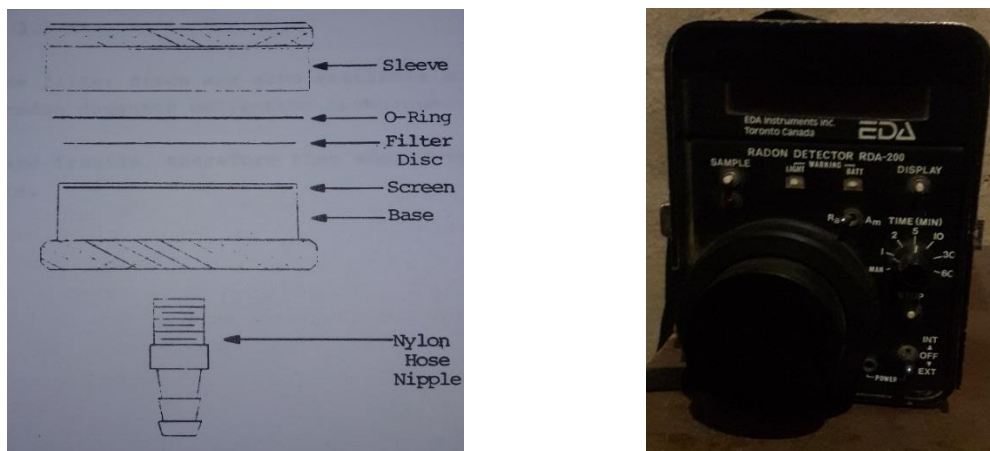


Figura 5: Porta filtro y detector de Radón EDA- 200

Detector Rad-7

El Rad-7 es un dispositivo que nos permite hacer lecturas continuas de gas Radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), está diseñado para observar la variación de Radón en función de tiempo, al ser un detector electrónico fabricado por DURRIDGUE Company, (figura 7) [17].

El Rad-7 contiene un detector electrónico de partículas alfa, este detector convierte la radiación alfa en una señal electrónica [11].

## Características principales

- Modo de medición continúa
- Medición rápida
- Señal audible de cuentas
- Sensibilidad muy alta
- Comunicación con la PC
- Accesorios para agua y suelo
- Tiene un modo “husmeador”
- Funda protectora
- Uso fácil



Figura 6: Rad-7

El Rad-7 posee un modo “husmeador” a través de una señal sonora con un indicador de cuentas para ubicar los puntos de emanación de Radón. Con un ruido de fondo de  $0.2 \text{ Bequerels/m}^3$  ( $\text{Bq/m}^3$ ). El Rad-7 es eficaz ya que puede medir hasta  $200 \text{ Bq/m}^3$  en menos de una hora con 10% de desviación estándar <sup>[17]</sup>.

## Capítulo 2

### Geología de México.

El territorio mexicano está dividido en diferentes regiones la cual posee una geología compleja, teniendo región noreste, norte, central y sureste. Como se puede observar en la figura 7 (Moran, 1994).



Figura 7: División del territorio mexicano para el estudio geológico.

Al provenir las aguas subterráneas de los suelos, se tiene que conocer la geología del Estado Mexicano.



## Región Noroeste

Para una mejor descripción de la región noroeste de México se ha tomado como límites naturales, al oriente la secuencia volcánica de la Sierra Madre Occidental; al poniente, las costas pacíficas de Baja California y Sinaloa y al Sur, el límite Norte del Eje Neovolcánico.

Dentro de esta región están comprendidas la región de Baja California, Desierto de Sonora, Sierra Madre Occidental y Llanura Costera del Pacífico. El clima varía en general: de seco en Baja California, Sonora, y Norte de Sinaloa, a subhúmedo en las partes altas de la Sierra Madre Occidental y al Sur de Mazatlán. Y en casi toda la región el régimen de lluvias es de verano, menos en la parte norte de Baja California donde el régimen es de invierno.

## Región Norte y Noreste

Se tomaron como límites naturales, al oeste, la Sierra Madre Occidental; al este la costa del Golfo de México, y hacia el sur, el límite norte del eje Neovolcánico.

Esta región comprende a las provincias de Sierras y Llanos del Norte, Sierra Madre Oriental, Gran Llanura del Norteamérica, Mesa del Centro y Llanura Costera del Golfo Norte. La división se basa en los elementos paleogeográficos del Mesozoico en esta región de México. Los climas de esta región varían de cálidos a semicálidos y llevan consigo un régimen de lluvia de verano. Ahora bien las lluvias revelan que estos climas varían de secos a semisecos en el occidente de esta zona, y de húmedos a subhúmedos en la sierra madre oriental y la Llanura Costera del Golfo Norte.

## Región central de México

Se han tomado como límites los siguientes: al norte, el borde septentrional del eje Neovolcánico; al poniente y sur, las costas del pacífico; y al este, el litoral del Golfo de México y la zona del Istmo de Tehuantepec.

En esta región quedan comprendidas las provincias fisiográficas del Eje Neovolcánico, de la sierra madre del Sur y la porción norte de la Llanura costera del Golfo Sur.

El clima de la región es muy variable. En la vertiente del golfo de México el clima cambia de templado húmedo en las partes altas de la Sierra Madre Oriental a semicálido húmedo en la parte media y cálido húmedo en la parte baja. En el eje Neovolcánico el clima es subhúmedo y varía de templado a semifrío y frío.

En esta zona existen condiciones estratigráficas y tectónicas con características homogéneas con límites bien definidos.

Al encontrarse en la zona central el Estado de México, nuestro lugar de estudio de este trabajo profundizaremos más este estado.

### Eje Neovolcánico

El eje Neovolcánico también conocido como la “Faja Volcánica Transmexicana (FVTM)”, es una franja volcánica que atraviesa la república mexicana desde el océano pacífico hasta el golfo de México, esta franja está situada entre las latitudes  $19^{\circ} 00'$  y  $20^{\circ} 30'$ , con una extensión de 1000 kilómetros y una amplitud que va de los 50 a 200 kilómetros (Figura 8). Está compuesta por una variedad de rocas volcánicas que fueron ostentadas por grandes acontecimientos volcánicos en el pasado, algunos constituyen a las principales alturas del país como el caso del Estado de México [18].

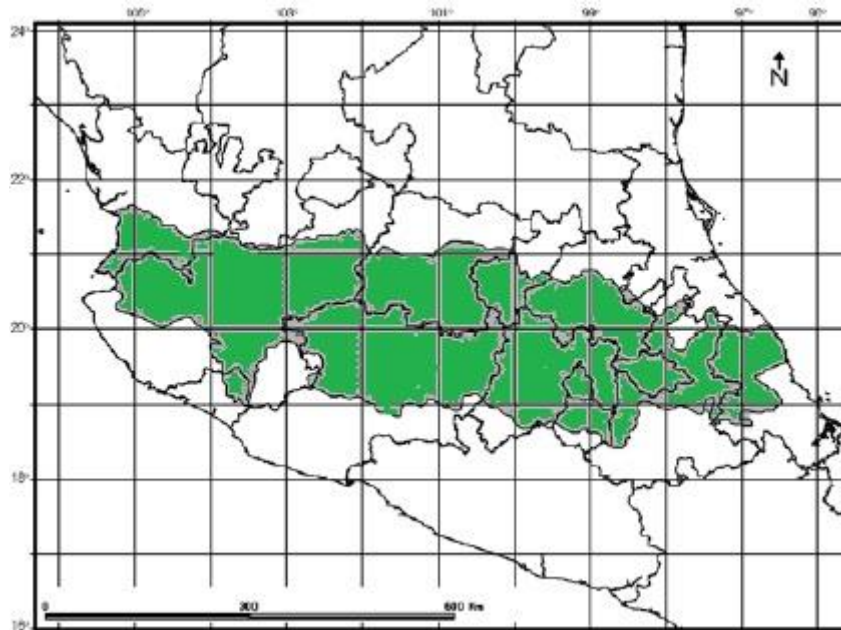


Figura 8: Localización de Faja Volcánica Transmexicana (Gómez-Tuena *et al.* (2005).

La actividad volcánica dio origen a numerosos lagos, lo que da al paisaje geomorfológico una apariencia muy característica, en el estado de México se encuentra un volcán muy característico llamado común mente como “Nevado de Toluca (Xinantecatl)”, este volcán hizo erupción hace aproximadamente 3300 años,

y el volcán es considerado todavía activo, dando origen a la geología que hoy en día puede ser apreciada, esto ocurrió a través de derrames lávicos durante el Holoceno <sup>[18][19]</sup>.

El umbral del eje Neovolcánico lo han relacionado algunos autores a la subducción de la placa de cocos debajo del territorio mexicano, por debajo de la litosfera, al nivel de la astenósfera sufre fusión parcial y origina los magmas del eje (Figura 9) <sup>[19]</sup>.



Figura 9: Placas Tectónica en Territorio Mexicano.

Región sureste

Comprendida entre la zona del istmo de Tehuantepec y al occidente de la Península de Yucatán incluyendo una parte del área marina del golfo de México, entre las coordenadas geográficas 91° a 95° de longitud al oeste de Greenwich y de 16° a 20° de latitud norte <sup>[19]</sup>.

El sureste mexicano es una de las áreas más complejas desde el punto de vista geológico, esto por el movimiento de las placas tectónicas, de Norteamérica del caribe y de cocos, al converger en esta región desde el Oligoceno Tardío (Moran-Zenteno *et al.* 2000).

El clima en esta zona varía de templado a semicálido en las partes superiores de la Sierra del Soconusco y Sierra de Chiapas y cálido en las llanuras costeras del Golfo de México y del Pacífico.

La Sierra del Soconusco se encuentra formada por rocas precámbricas ígneas y metamórficas <sup>[20]</sup>.

## Fallas geológicas y emanación de Radón

Una falla es una fractura u/o rompimiento de la corteza terrestre esta viene acompañado por un desplazamiento, sin embargo si hay rompimiento en la corteza pero estos bloques no llegan a desplazarse se les conoce como diaclasa. Las fuerzas terrestres interactúan sobre estos bloques rocosos y tienden a desplazarse desde pequeños centímetros hasta cientos de kilómetros, estos desplazamientos tienden a originar sismos, la tensión, torsión, y compresión se llevan a cabo a través de toda la zona de falla. Al a ver rompimiento de los bordes rocosos y dependiendo de la geología del lugar algunos sitios tienden a liberar diferentes minerales que se encontraban aislados dentro de los macizos pedregosos sin mencionar algunos gases como lo es el Radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) o alguno de sus isotopos <sup>[10]</sup>.

Algunos eventos físicos como el módulo de Young y la relación de Poisson se llevan a cabo en los macizos rocosos dando lugar a esfuerzos y alteraciones en su estructura de estos (deformaciones). La elasticidad es una propiedad de la materia "ideal" la cual las rocas presentan y que posee tres factores importantes <sup>[21][22]</sup>:

- 1) Homogeneidad: hace referencia al tamaño de los granos que posee una roca al ser continuos, es decir al ser de la misma dimensión los granos.
- 2) Isotropía: las propiedades físicas de las rocas no depende de las direcciones, en decir que sus magnitudes físicas no dependen de las direcciones los resultados son idénticos sin importar la muestra que se tome.
- 3) Continuidad: es el número de fallas, diaclasas y espacios poros que posee un macizo rocoso.

El límite elástico o módulo de Young viene dado por:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (14)$$

Donde:

$E$ : Módulo de elasticidad ( $\frac{kg}{cm^2}$ )

$\sigma$ : Esfuerzo aplicado ( $\frac{kg}{cm^2}$ )

$\epsilon$ : Deformación unitaria ( $\frac{mm}{mm}$ )

El valor de  $E$  permite catalogar a las rocas de la siguiente manera:

- Rocas cuasi - elásticas: Para valores de  $E$  entre 6 y  $10 \times 10^4$  MPa, siendo por lo general de grano fino, masivo y compacto.
- Roca semi - elástica: Para valores de  $E$  entre 2 y  $7 \times 10^4$  MPa, se caracterizan por ser de grano grueso en las rocas ígneas y de grano fino, porosidad baja y cohesión media en las rocas sedimentarias.
- Roca no elástica o plástica: Para valores de  $E$  menores que  $2 \times 10^4$  MPa, presentan gran cantidad de espacios vacíos o porosos, por lo que tienden a mostrar características variables de esfuerzo - deformación.

La relación de Poisson ( $\nu$ ), representa la relación inversa entre la deformación en la dirección del esfuerzo aplicado y la deformación en la dirección perpendicular de la fuerza aplicada. Está representada por [22]:

$$\nu = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_a} \quad (15)$$

Donde:

$\nu$ : Relación de Poisson

$\epsilon_d$ : Deformación unitaria en dirección perpendicular a la carga aplicada

$\epsilon_a$ : Deformación unitaria en dirección a la carga aplicada

Para comprender esta idea tenemos que saber qué tipo de fallas hay y la característica de cada una de estas. El tipo de movimiento a lo largo de una falla dependerá del tipo de falla.

Tipos de fallas

### **Fallas normales**

Este tipo de fallas son ocasionadas por esfuerzos de tensión al ser las que ocurren más en la naturaleza, al tener por lo general un ángulo de  $60^\circ$  respecto a la horizontal generando un bloque superior y uno inferior donde las rocas de un lado de la falla se hunde con respecto del otro. (Figura 10)

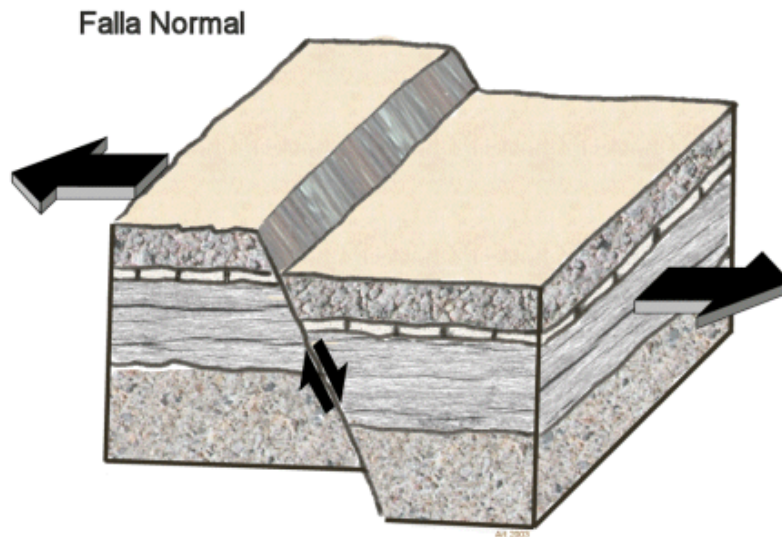


Figura 10: Fallas normales

### Fallas inversas

Este tipo de fallas se llevan a cabo por un fenómeno físico denominado compresión, tiene movimientos horizontales donde hay un bloque superior el cual está por encima del bloque inferior, este tipo de falla ocurre por lo general con ángulos menores a 45°. Se puede observar mejor las fallas inversas en rocas macizas como calizas y areniscas. (Figura 11)

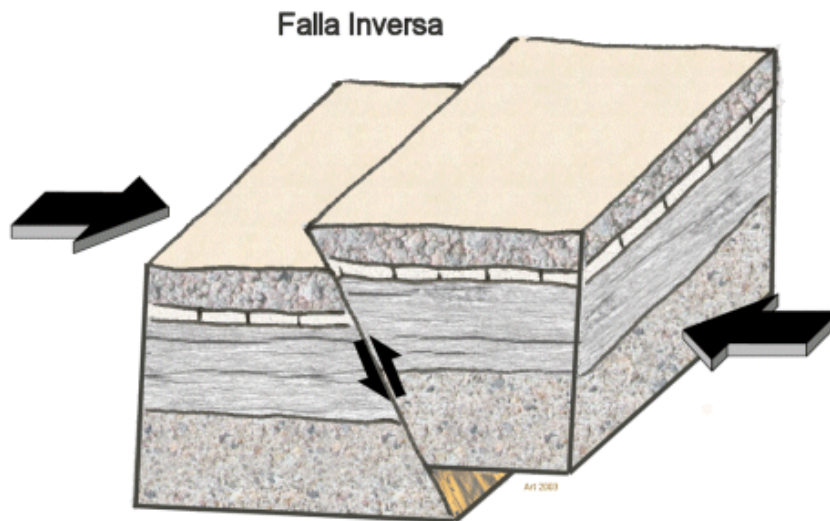


Figura 11: Falla Inversa

## Falla transformante

Este tipo de falla también conocido como “falla de rumbo” o “falla de desgarre”, tiene un movimiento horizontal predominante con un movimiento vertical, dando como resultado que el bloque de roca se mueva en una dirección mientras que el otro bloque se mueva en dirección opuesta del primer bloque, estas se identifican por la discontinuidad de una superficie (terreno) (Figura 12).

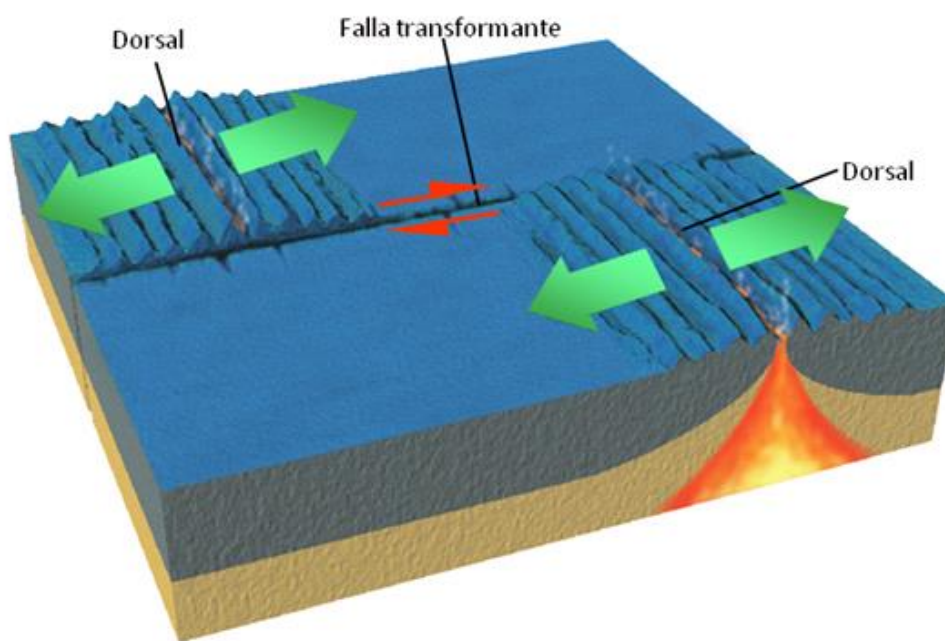


Figura 12: Falla de desgarre

La falla de desgarre se divide en dos tipos: Dextrales y Sinistrales (Figura 13).

Dextrales: Son movimientos hacia la derecha con respecto al observador

Sinistrales: Son movimientos hacia la izquierda con respecto al observador

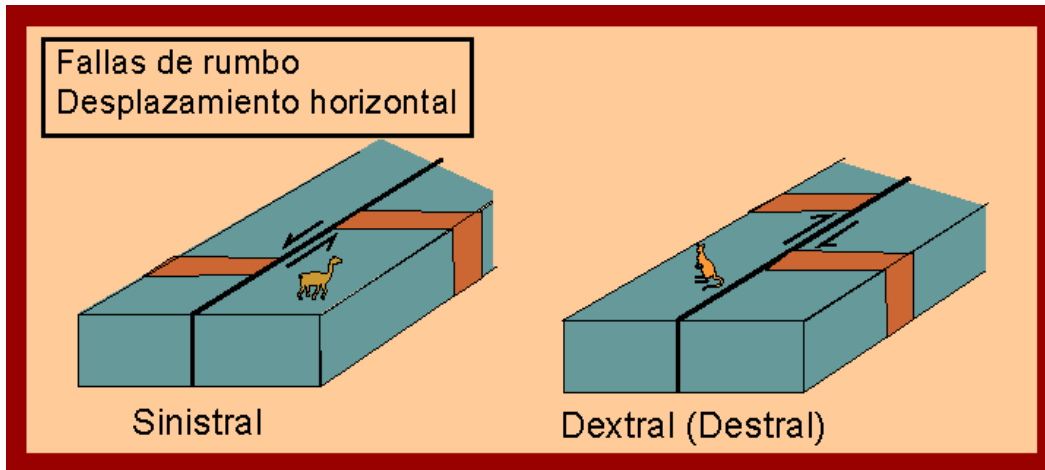


Figura 13: Fallas de Desgarre

Ahora bien un movimiento sísmico puede dar lugar a alguna de las fallas antes mencionadas, pero también se pueden presentar las tres fallas a la vez en una zona. Una falla no es una única grieta en la roca sino que puede haber un conjunto de estas denominándolo “zona de fallas”.

Hay fallas que se consideran activas, es decir que han tenido actividad sísmica recientemente, en estas zonas hay liberación de gas radón por fracturamiento de los bloques rocosos, lo cual sugiere que sobre esas estructuras geológicas emane este gas.

Desde mediados del siglo XX se ha venido experimentando con el radón como un premonitor de eventos sísmicos, estos trabajos de investigación vinculan las concentraciones de radón (tanto en suelos como en aguas) con la sismicidad. Trabajos realizados en China afirman que el radón es el gas más usado para la predicción sísmica (Toutain y Baubron, 1998). La deformación a la corteza causada por terremotos es el cambio en la presión de los poros, los cuales a su vez pueden afectar la interacción fluido-roca, lo que provoca la emanación del fluido a la superficie (King, 1986). En otras palabras las anomalías del gas radón pueden dar una idea de los cambios corticales.



## Geofísica

### ¿Qué es la Geofísica?

Desde el punto de vista de la Física, Geofísica es: “la ciencia que se encarga del estudio de las propiedades físicas de la tierra”, que comprende aspectos como la composición interna del planeta (temperatura interna, fuerza de gravedad, fuerza magnética, entre otras), un aspecto fundamental que implica el estudio de esta ciencia es el estudio de la propagación de ondas sísmicas a través de las rocas el cual es un aspecto esencial en este trabajo.

Estudios geofísicos permiten optimizar procesos como exploración minera y de extracción de los mismos así como la detección de yacimiento de agua subterránea por diferentes métodos.

### Métodos Geofísicos

El saber que método se debe de utilizar depende de las propiedades físicas de la tierra a estudiar, entre ellos tenemos: Geoeléctricos, Sísmicos, Gravimétricos y Magnetométricos.

El método Geoeléctrico nos permite la detección de aguas subterráneas (acuíferos y corrientes subterráneas), detección de cavidades y fracturas, determinación de la estratigrafía del subsuelo, evaluación de bancos de materia (arena y grava) entre otras aplicaciones.

El método Sísmico: son utilizados para medir la propagación de las ondas en el subsuelo, permite la determinación de la estratigrafía y geometría del subsuelo, apoyo en la detección de aguas subterráneas, evaluación en los bancos de material (arena, grava, roca, etc).

Métodos Geotérmicos: La tierra posee una temperatura interna que es independiente de la radiación solar en la corteza terrestre, a este calor interno se le denomina flujo térmico. Se nombra gradiente térmico al aumento de la temperatura cada 100 m de profundidad. El origen del calor interno es desconocido, sin embargo hay una teoría que es la más aceptada hasta ahora que dice: “que se debe al calor remanente que posee la tierra desde sus orígenes y a la desintegración de elementos radiactivos”.

El método Gravimétrico y Magnetométrico son más utilizados en la evaluación de campos petroleros y zonas arqueológicas principal mente.

Ahora bien, el suelo es la erosión de las rocas que se ha llevado a cabo desde hace miles de años. Entender la composición y el comportamiento de estas cavidades

rocosas desde un punto de vista físico es esencial para saber que método puede ser utilizado para un posterior estudio. Algunos de estos minerales pueden tener grandes índices de radiactividad natural.

Por medio de ondas sísmicas (método indirecto de la geofísica) se ha podido determinar la estructura interna de la tierra dividiéndolo en capas con especificaciones de su espesor y contenido.

Zonas de estudio.

Composición Geológica del Estado de México.

Como se observó en la (figura 8), la Faja Volcánica Transmexicana atraviesa gran parte del estado de México, teniendo otras provincias geológicas, denominadas: Complejo Orogénico de Guerrero Colima y Plataforma de Morelos (Ortega Gutierrez et. al. 1992), al ser la zona de estudio para este trabajo conocer las características geológicas y físicas de este estado es esencial.



Figura 14: Localización de la zona de estudio, INEGI.

El Estado de México está dividido en 125 municipios, el cual representa el 1.14% de territorio mexicano según estudios proporcionados por el INEGI. Sus fuentes de agua (ríos) son:

- Lerma
- San Juan del Río

- San Felipe
- Temascaltepec
- Sultepec
- Tejalpa
- Pungaranco
- La Asunción
- La Venta
- San Bernardino
- Ixtapan
- Zarco
- San Agustín
- Meyuca
- Chalma
- Los Lobos

Otros cuerpos de agua:

### **Presas**

- Valle de Bravo
- Villa Victoria
- Huapango
- Tepetitlán
- Guadalupe
- Danxó
- Ignacio Ramírez
- Antonio Alzate

### **Lagos**

- Nabor Carrillo
- Zumpango

El estado de México posee rocas de tipo volcánica, sedimentaria y metamórfica las cuales están distribuidas respecto a la geología misma de la tierra. Cada municipio posee diferente tipo de roca. Centrándonos en los municipios descritos continuación:

Temascalcingo: Posee abanicos aluviales coalescentes, depósitos laháricos y de ceniza volcánica (Roca Volcánica Epiclástica). Incluye basalto y andesita de la sierra mazahua del volcán Altamirano.

Atlacomulco de Fabela: Atravesado por el eje Neovolcánico y ubicado en la subprovincia de lagos y volcanes del Anáhuac. Incluye rocas volcánicas ígneas (andesita y dacita).

Villa del carbón: Constituido por una superficie de roca ígnea extrusiva (volcanoclástico y andesita) y roca sedimentaria (brecha sedimentaria y conglomerado), compuesto por el eje Neovolcanico.

Teotihuacán: Establecido durante el periodo cuaternario y neógeno, conformado por rocas de tipo ígnea extrusiva (toba básica, dacita, volcanoclástico, basalto, andesita, basalto-brecha volcánica básica y brecha volcánica básica).

Almoloya de Juárez: Forjado durante los periodos cuaternarios y neógeno, posee una geología con rocas de tipo ígnea estrusiva (volcanoclástico, basalto, andesita, brecha volcánica básica y brecha volcánica intermedia), y rocas sedimentarias.

Ixtapan del oro: este municipio posee rocas de tipo metamórficas (metasedimentaria y metavolcánica), ígnea intrusiva (diorita), y ígnea extrusiva (andesita y basalto), postulado durante los periodos neógeno, cuaternario y terciario.

Ixtapan de la sal: el municipio de Ixtapan de la sal posee rocas pertenecientes al segundo periodo eruptivo, rocas de tipo andesitas, estas fueron arrojadas en este mismo periodo lo que dio lugar a grandes macizos rocosos (montañas), también es poseedor de rocas de tipo metamórfica (metasedimentarias y metavolcánicas) y sedimentaria (conglomerados de arenisca).

Tonatico: formada durante el periodo neógeno, cuaternario y cretácico, tiene rocas de tipo sedimentarias (conglomerados de arenisca, travertinos y caliza) y metamórficas (metavolcánica y metasedimentaria).

#### Aguas Termales en el Estado de México

El Estado de México es poseedor de aguas termales, en diferentes municipios de los cuales este trabajo se encargó de analizar el agua que emanaba de los balnearios, así como la localización de fallas geológicas, los puntos de muestreo son:

- Centro Ecoturístico “El Borbollón” (Temascalcingo)
- Las Fuentes (Atlacomulco de Fabela)
- Las Cascadas (Villa del Carbón)
- Balneario Gaby (Teotihuacán)
- Santuario Ojo de Agua (Almoloya de Juárez)
- Balneario las Salinas (Ixtapan del oro)
- Parque Acuático (Ixtapan de la sal)
- Balneario Municipal (Tonatico)
- Grutas de la Estrella (Tonatico)

El balneario las salinas posee dos fuentes de agua separados por una distancia de más de 100 metros los cuales se clasificaron en 1 y 2, la primer fuente de agua se encuentra en la parte superior del lugar y el segundo en la parte inferior.



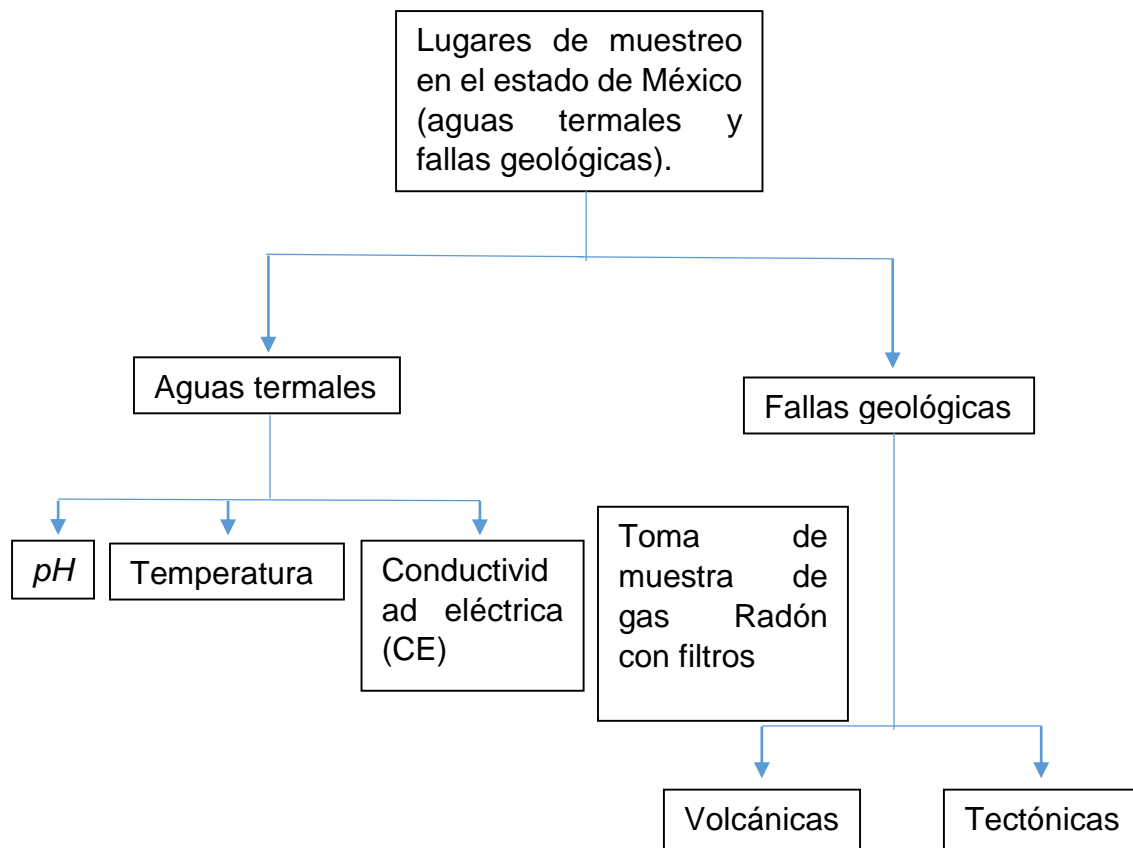
Figura 15: Zonas de estudio en el Estado de México

## Capítulo 3

### Metodología

En este capítulo describiremos la metodología utilizada, en campo y en el laboratorio para la detección de  $^{222}\text{Rn}$ , así como los lugares de muestreo que se visitaron.

#### Actividades de campo



#### Medición en agua

En las zonas de estudio, se ubicaron dónde estaban ubicados los geiseres u “ojos de agua”. La manera de ubicarlos era buscar la fuente donde había emanación constante de agua.

Se hacía una lectura con el detector Geiger Müller alrededor de las piscinas de las fuentes termales para saber las cuentas por minutos había.

Se midió su temperatura (T), para saber que clasificación de agua termal era la que se estaba analizando, así mismo su *pH*, conductividad eléctrica (CE) y la cantidad de solidos disueltos en las aguas, para saber si había una relación entre las emanaciones de Radón.



Figura 16: Termómetro y *pH*-metro

Se recolectaba una muestra de agua en botellas de 300ml esterilizadas, sellándolas dentro de la fuente natural, con la finalidad de no adquirir ningún gas externo. Los datos obtenidos durante esta medición pueden ser observados en el capítulo cuatro.



Figura 17: Toma de muestras y monitoreo de Radón.

Lecturas medidas en salidas de campo

Durante las salidas se tomaban muestras de Radón en los balnearios por medio de una celda de Lucas que se conectaba a una manguera que absorbía el aire que

estaba alrededor del geiser, teniendo la precaución de no poner en contacto la manguera con el agua. Al tener las celdas de Lucas vacío, funcionaba como una bomba de extracción al conectar la manguera con un opresor.

Medición en fallas geológicas.

Medición con el Rad-7 en Fallas Geológicas

El gas Radón puede ser usado como un premonitor geofísico natural en distintas ramas de las ciencias de la tierra (Geofísica, Geoquímica y Geología). La importancia de este gas reside en el uso que se le dé, funciona como una herramienta adicional para alertar de un posible evento sísmico, por medio de grandes liberaciones de Radón generado por el movimiento de la maza terrestre (tectónico o erupciones volcánicas).

En las salidas de campo que se hicieron, se monitorio dentro de las fallas geológicas localizadas en el municipio de Acambay con el detector Rad-7, para ver las concentraciones de Radón, al contener los macizos rocosos Uranio se originan tres isotopos de este elemento y al ser el  $^{222}\text{Rn}$  el que mayor vida media tiene lo utilizamos como un trazador geofísico.

Para medir Radón dentro de las grietas de las rocas, se colocó una manguera de 4mm de diámetro dentro de las fisuras de las rocas que a su vez conducían al Rad-7, esta funciona con una boba de extracción de aire, que introduce el aire al interior del Rad-7, se dejó trabajando el dispositivo durante media hora para tener una mejor lectura de las concentraciones de este gas. Después que pasara el tiempo de lectura, se registraron los datos obtenidos.



Figura 18: Falla Activa del Municipio de Acambay



## Medición en laboratorio

Para cada balneario se tomó una muestra de agua cada vez que se visitaba, con la finalidad de tomar una lectura en el laboratorio con el equipo EDA-200 (figura 19), la muestra se tenía en total estabilidad para que soltara los gases que tenía mezclado con el agua durante más de una semana. Al hacer la lectura con el equipo se metía en una cámara que no tuviera ninguna corriente de aire en contacto con la manguera que absorbía el gas que saliera de la botella directo a la celda, así con cada botella. Los datos se pueden apreciar en la tabla de resultados.

Las mismas muestras ya desgasificadas las utilizamos para una posterior lectura con el equipo del espectrómetro ICP (plasma de acoplamiento inductivo) Perkin-Elmer Mod. 400.

La técnica de ICP se usó con la finalidad de analizar nuestra mezcla (agua) y ver qué elementos poseía, funciona usando un plasma de argón en el que se le suministra una muestra líquida atomizada, lo cual produce que la muestra se ionice en el plasma implicando que los iones emitan luz a diferentes longitudes de onda característica que subsiguientemente se miden.

En este trabajo se determinó la concentración de Uranio ( $^{238}\text{U}$ ) presente en el agua de los balnearios.



Figura 19: Muestras líquidas de balnearios para análisis en ICP.

## Capítulo 4

### Resultados

En este capítulo presentaremos los resultados obtenidos en el laboratorio y en campo con los diferentes equipos utilizados. Las medidas obtenidas en las fuentes de aguas termales con el EDA-200 y en las fallas geológicas con el equipo RAD-7.

Medición de Radón en fuentes termales.

Se realizaron tres mediciones por cada balneario, en días distintos para tener un mejor promedio de los datos experimentales.

Datos obtenidos con el medidor Geiger Müller.

Balnearios	Geiger (cpm)			$\bar{y}$ G
Tonatico	110	80	100	96.67
Ojo de agua	30	40	40	36.67
Ixtapan de la sal	60	100	80	80
Las fuentes	60	60	60	60
Grutas de la estrella	60	80	60	66.67
El borbollón	80	50	140	90
Ixtapan del oro (1)	40	40	40	40
Ixtapan del oro (2)	40	60	60	53.33
Balneario Gaby	40	40	20	33.33
Las cascadas	80	60	80	73.33
Frida Kahlo	60	40	60	53.33

Tabla 1: Valores obtenidos por el detector Geiger.

Como se puede observar en la tabla el balneario de Tonatico tiene mayor número de cuentas alfa detectadas por el detector Geiger. El balneario de Tonatico es un lugar con poca ventilación en el cual hay corrientes de aire casi nulas lo que permite una mejor concentración de Radón, a diferencia del balneario Gaby que está expuesto a la intemperie, lo que hace que las corrientes de aire arrastren el gas.

Algunos balnearios tienen el agua de color verde lo que indica concentraciones de azufre. Otros fenómenos físicos que están implícitos son la absorción y la dispersión

de la luz dentro del agua. Otras fuentes naturales de aguas como el ojo de agua en Almoloya de Juárez, Estado de México son cristalinos.

Datos obtenidos por el detector EDA-200.

Balnearios	EDA-200 (cpm)			$\bar{y}$ (cpm)
Tonatico	10	10	15	11.7
Ojo de agua	20	21	22	21
Ixtapan de la sal	15	20	8	14.3
Las Fuentes	38	46	42	42
Grutas de la estrella	34	38	40	37.3
El Borbollón	17	25	27	23
Ixtapan del oro (1)	31	20	14	21.7
Ixtapan del oro (2)	31	16	18	21.7
Balneario Gaby	24	28	21	24.3
Las Cascadas	42	46	56	48
Frida Kahlo	17	18	20	18.3

Tabla 2: Valores obtenidos por el detector RDA (EDA-200) en cuentas por minuto.

Donde  $\bar{y}$ : Promedio

A continuación se muestra las concentraciones del detector EDA-200 en PiCocuries/Litro (pCi/L).

Balnearios	EDA-200 (pCi/L)
Tonatico	4.14
Ojo de agua	9.93
Ixtapan de la sal	5.79
Las Fuentes	22.95
Grutas de la Estrella	20.06
El Borbollón	11.17
Ixtapan del oro (1)	10.34
Ixtapan del oro (2)	10.34
Balneario Gaby	12.00
Las Cascadas	26.67
Frida Kahlo	8.27

Tabla 3: Valores del detector EDA-200.

Datos obtenidos por el Rad-7

Fallas geológicas activas en el graben (falla) de Acambay, Falla normal.

Posee 0.1790 Bq/L con las coordenadas 19°50'38.070'' N, 99°51'45.246'' W

Los parámetros fisicoquímicos de pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos y temperatura se muestra en la siguiente tabla:

Balnearios	pH			$\bar{y}$ pH	Conductividad ( $\mu$ S)			$\bar{y}$ (CE)	Sólidos disueltos (ppm)			$\bar{y}$ (ppm)	Temperatura ( $^{\circ}$ C)			$\bar{y}$ (T)
Tonatico	6.3	6.6	6.3	6.38	>RLE	>RLE	>RLE	>3999	>RLE	>RLE	>RLE	>2000	34.5	34.4	34.5	34.47
Ojo de agua	9.3	8.3	9.3	9	218	203	196	205.7	106	114	96	105.3	19.5	18.15	19.2	18.93
Ixtapan de la sal	6.8	6.9	6.5	6.72	>RLE	>RLE	>RLE	>3999	>RLE	>RLE	>RLE	>2000	37.2	37.5	39.2	37.95
Las fuentes	8.4	8.5	8.5	8.47	369	380	379	376	186	205	189	193.3	19.9	19.9	19.5	19.77
Grutas de la estrella	8.4	7.5	9	8.3	403	420	374	399	195	206	185	195.3	17.6	19.5	19.1	18.73
El borbollón	6.1	6.2	6.4	6.21	>RLE	>RLE	>RLE	>3999	>RLE	>RLE	>RLE	>2000	34.8	44.15	47.4	42.12
Ixtapan del oro (1)	7.1	6.6	6.8	6.82	>RLE	>RLE	>RLE	>3999	>RLE	>RLE	>RLE	>2000	27.7	30.3	29.9	29.3
Ixtapan del oro (2)	6.6	6.4	6.7	6.55	>RLE	>RLE	>RLE	>3999	>RLE	>RLE	>RLE	>2000	31.3	31.9	31	31.4
Balneario Gaby	8.5	8.7	8.9	8.69	403	410	394	402.3	200	205	198	201	19.4	21.45	24.7	21.85
Las cascadas	8.8	8.7	8.4	8.62	150	154	153	152.3	76	78	74	76	19.3	19	19.3	19.18
Frida Kahlo	8.5	8.5	8.4	8.45	378	362	366	368.7	182	181	196	186.3	24.3	25	24.8	24.7

Tabla 4: Recopilación de datos en las salidas de campo, en diferentes fechas.

>RLE: Mayor que el rango de lectura del equipo.

El balneario el “Borbollón” tiene una mayor temperatura al ser un agua de tipo “Mesotermal”, posee altas concentraciones de azufre y grandes concentraciones de solidos disueltos (figura 20). Las grutas de la estrella son consideradas aguas frías al tener una temperatura menor a 19 °C.



Figura 20: Restos Solidos

#### Actividad sísmica

Desde el mes de febrero se ha estado registrado la actividad sísmica en el Estado de México proporcionado por el catálogo de sismos de la UNAM como se pueden ver a continuación:

Fecha	Hora	Magnitud	Coordenadas	Localización
24/02/2016	14:03:34	2.3	19.38° N,-99.44° W	6 km al noreste de Santa María Atarasquillo
11/06/2016	09:48:00	2.6	19.01° N,-98.64° W	16 km al este de Ozumba
08/07/2016	11:51:47	1.8	19.02° N,-98.61° W	19 km al este de Ozumba
08/07/2016	12:42:10	2.6	19.04° N,-98.61° W	19 km al sureste de Amecameca
08/07/2016	12:45:08	3.0	19.04° N,-98.61° W	18 km al sureste de Amecameca

08/07/2016	12:50:13	2.3	19.04° N,-98.61° W	18 km al sureste de Amecameca
08/07/2016	12:50:44	2.5	19.06° N,-98.63° W	16 km al sureste de Amecameca
08/07/2016	13:03:20	3.0	19.07° N,-98.63° W	15 km al sureste de Amecameca
08/07/2016	13:22:48	2.8	19.08° N,-98.64° W	14 km al sureste de Amecameca
08/07/2016	18:14:12	1.5	19.07° N,-98.62° W	16 km al sureste de Amecameca

Tabla 5: Sismos ocurridos durante el periodo de estudio.

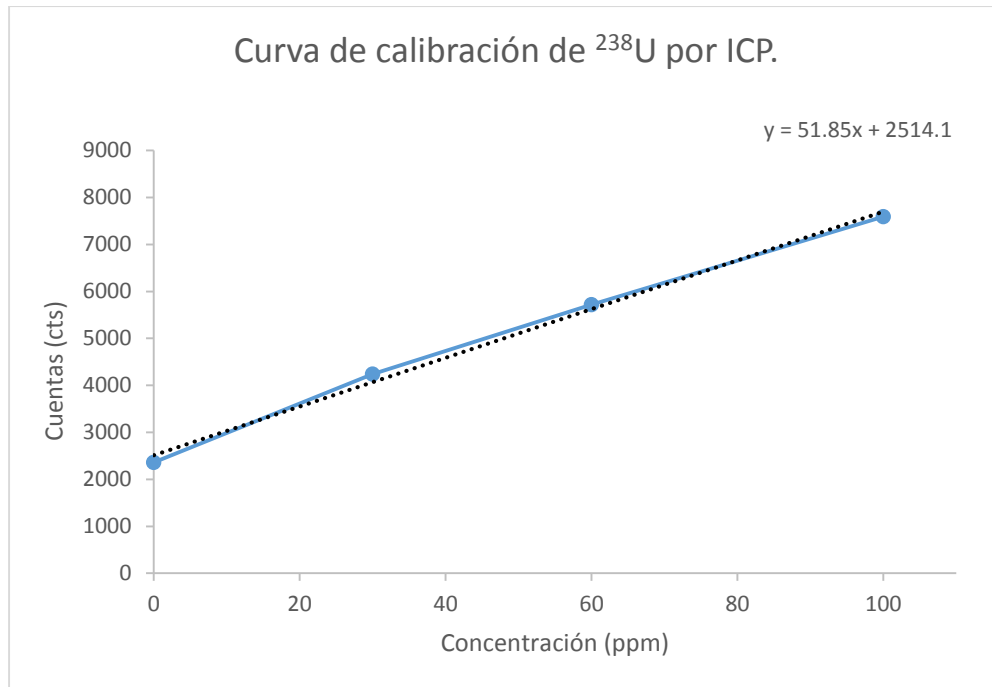
Análisis de  $^{238}\text{U}$  en las aguas termales por ICP

Se determinó las concentraciones de  $^{238}\text{U}$  en las aguas termales de los balnearios con la técnica de ICP-OES empleando el espectrómetro de ICP Perkin-Elmer Mod. 400 (Figura 21).

Lecturas determinadas en el ICP

Estándar (ppm)	Emisión (cuentas)
0	2361
30	4237
60	5715
100	7595

Tabla 7: Valores de la curva de calibración de  $^{238}\text{U}$ .



Grafica 1: Curva de calibración para  $^{238}\text{U}$ , por ICP.

Balneario	$^{238}\text{U}$ (ppm)	Concentración (mg/L)			Concentración Promedio (mg/L)
Tonatico	8.1	7.3	7.7	7.7	
Ojo de Agua	1.8	0.6	0.1	0.83	
Ixtapan de la Sal	7.3	6.7	6.3	6.76	
Las Fuentes	0.3	3.9	1.8	2	
Grutas de la Estrella	1.4	3.4	0.7	1.8	
El Borbollón	3.6	4.6	3.7	3.96	
Ixtapan del Oro 1	5.2	5.2	2.8	4.4	
Ixtapan del Oro 2	4.7	6.7	4.3	5.23	
Balneario Gaby	2.1	0.9	0.2	1.06	
Las Cascadas	0.3	No Detectado	No Detectado	0.3	
Balneario Frida kahlo	No Detectado	No Detectado	0.2	0.2	

Tabla 6: Resultados de las concentraciones de  $^{238}\text{U}$  en los líquidos.

En los datos anteriores (tabla 6), podemos observar las concentraciones de  $^{238}\text{U}$  en las aguas termales donde podemos decir que el balneario Tonicato es aquel que tiene mayor concentración de  $^{238}\text{U}$  en sus aguas termales teniendo gran cantidad de sólidos disueltos.

En el equipo ICP se introdujeron las muestras líquidas, donde se preparó la curva de calibración (Grafica 1), con los estándares que se muestran en tabla 7.



Figura 21: Inducción Acoplada por Plasma (ICP-OES), laboratorio de radiactividad natural del Instituto de Geofísica, UNAM.

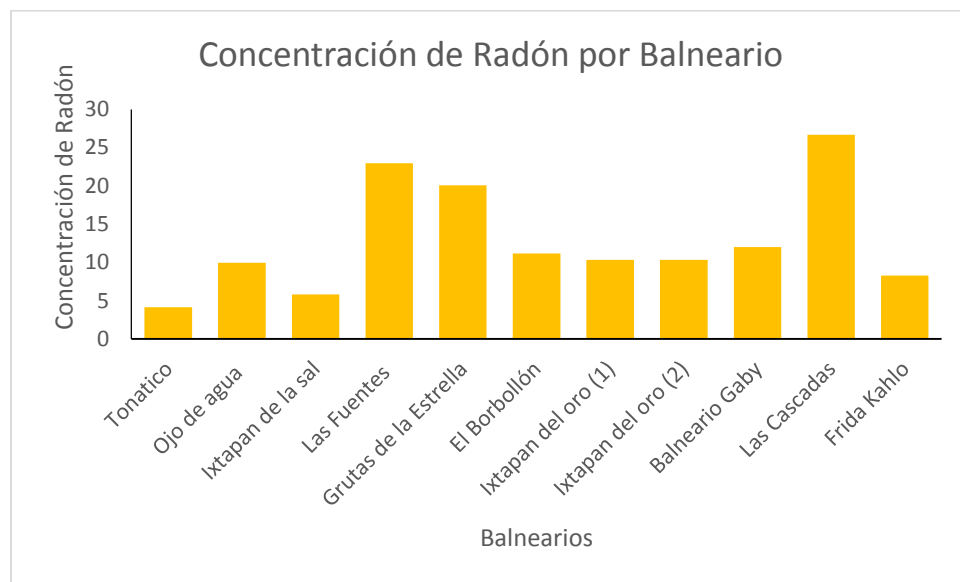


## Capítulo 5

### Análisis de Resultados y Conclusiones

En este capítulo se analizan los datos obtenidos del Radón conforme a la concentración de su radiactividad.

Utilizando una gráfica de barras podremos analizar la abundancia de Radón en cada balneario como se muestra a continuación:



Grafica 2: Concentración promedio de Radón.

Como se puede observar en la gráfica 2, podemos notar las concentraciones de Radón por municipio y la creciente del gas. El balneario las cascadas ubicado en Villa del Carbón es el que posee mayor concentración de Radón.

Con los datos obtenidos en el laboratorio con el detecto EDA-200 se realizó el mapa de la zona con las concentraciones de Radón.

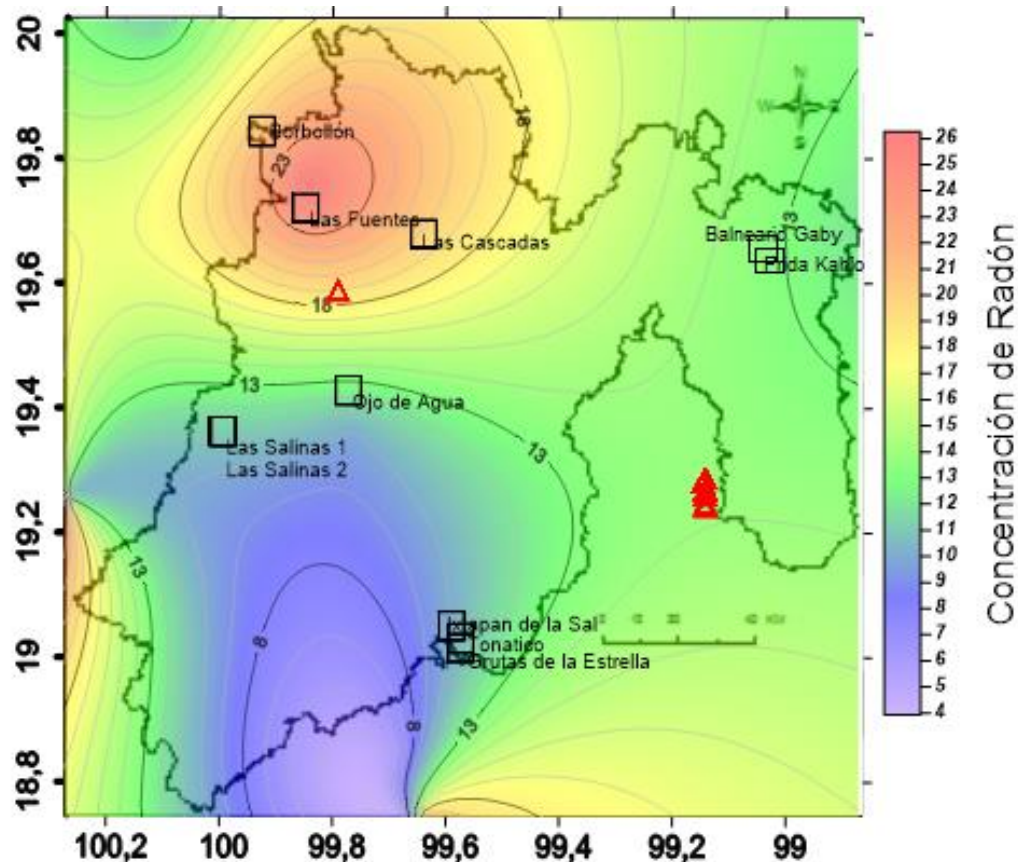


Figura 22: Concentraciones de Radón en balnearios del Estado De México.

Se pueden observar las zonas con mayores concentraciones de Radón: Atlacomulco, Villa del Carbón, Ixtapan del Oro y Temascalcingo, cuyos municipios fueron algunos de los lugares de estudio.

El Radón es un medio utilizado para la prospección minera para la extracción de roca granítica al contener restos de Uranio.

El Estado de México cuenta con zonas mineras (figura 23), cerca de las zonas de mayor abundancia de Radón al haber fallas activas en estas zonas podemos saber que hay liberaciones de este gas constantemente, debido al fracturamiento de las rocas.

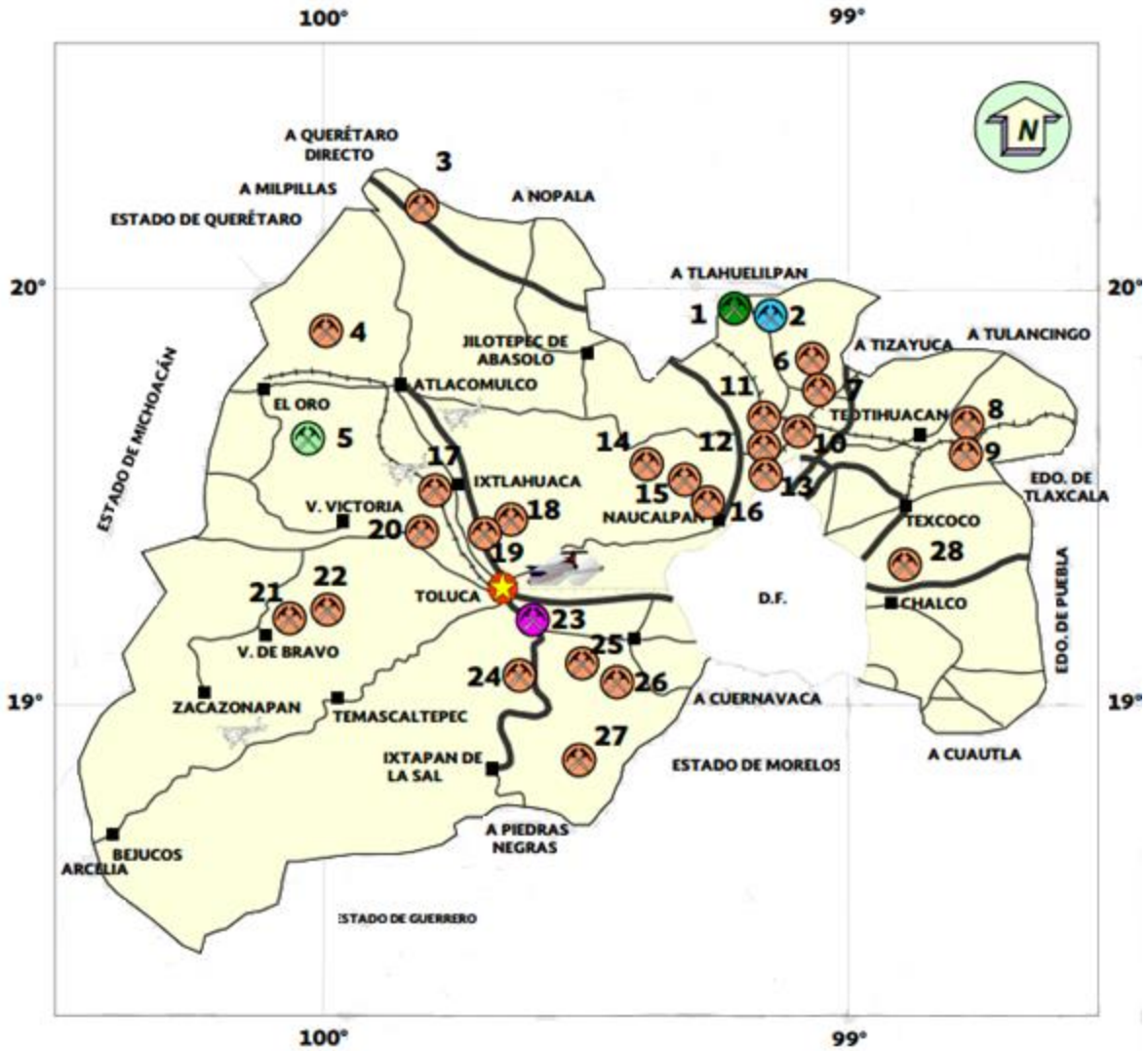


Figura 23: Zonas mineras en el Estado de México, IFOMEGEM.

Como se observa en el mapa en las cercanías de la zona con mayores concentraciones de radiación hay zonas mineras de extracción de material geológico para la construcción de viviendas (arena, grava y rocas).

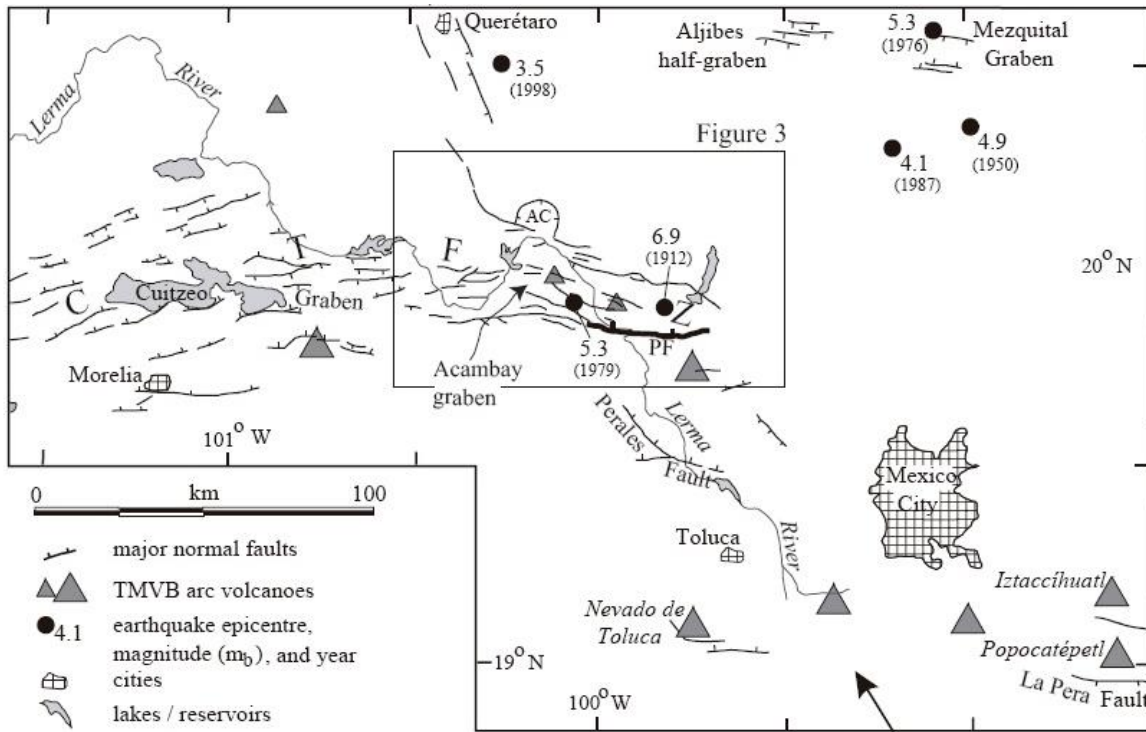
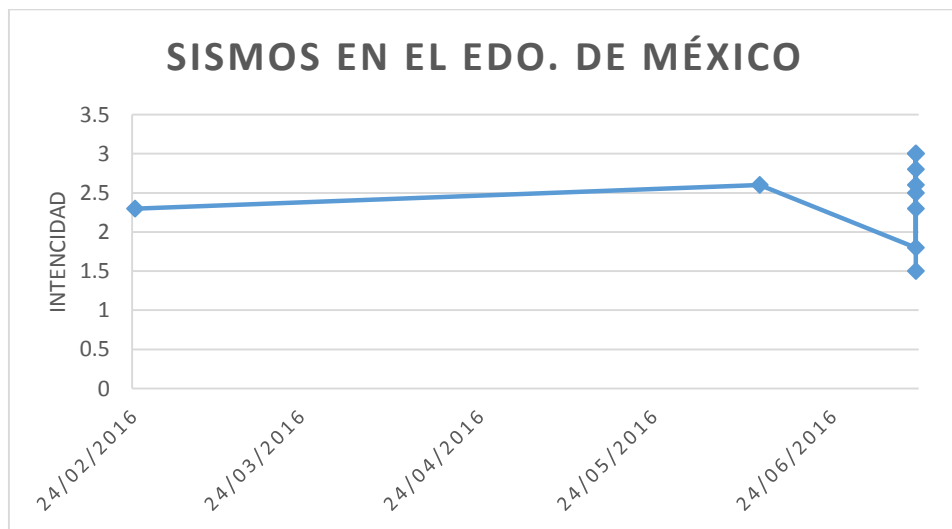


Figura 24: Graben de Acambay, fallas geológicas y ejes volcánicos (Suter et. al. 1996)

En esta figura podemos observar el graben de Acambay (falla de Acambay), siendo una falla geológica activa. Comparando las figuras 22, 23 y la figura 24 se puede apreciar por medio de las coordenadas geográficas que coinciden los lugares con altas concentraciones de Radón al tener fallas activas, se puede asociar a la prospección minera y usar el Radón como un trazador minero.



Grafica 3: Sismos ocurridos en el Estado de México, ssn. UNAM.

En el grafico se puede observar la intensidad de los sismos durante las salidas de campo, así como la fecha en la que se llevó a cabo cada uno de los sismos, esto debido a un movimiento en las placas tectónicas.

Como muestra la figura 22 podemos observar un sismo ocurrido en la zona donde hay mayor concentración de Radón lo que da lugar a movimientos corticales y al fracturamiento de macizos rocosos, ahora si se observa la figura 23 se puede encontrar que hay zonas mineras (el oro) limítrofe del epicentro del sismo.

## Conclusiones

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) indica que el valor permitido por el ser humano debe ser menor a 4pCi/L, si comparamos los valores obtenidos en el trabajo tenemos que algunos balnearios tienen grandes concentraciones de Radón.

De acuerdo a los datos obtenidos en los balnearios explorados podemos observar que la zona con mayor concentración de Radón en el Estado de México, se encuentra ubicada entre las coordenadas 19.6° N y 99.6 W. La figura 24 nos muestra que es una zona de fallas activas, donde se localiza el graben de Acambay, esto indica que hay eventos corticales a menudo. Lo que se debe de hacer es vigilar continuamente las concentraciones de Radón en las aguas termales que están cerca de las fallas geológicas activas, ya que el aumento sistemático de las concentraciones de este gas nos ayudaría a prever el sismo o incluso a ubicar su localización.

Un gran número de fallas dentro un macizo rocoso puede indicar que hay liberación de Radón como se ve en la figura 22 en la zona Noroeste del Estado de México, es por eso que tenemos concentraciones que coinciden con un grupo de fallas (Figura 24) y a su vez con la región minera para materiales epitermales (Au, Ag, Pb, Zn).

El constante monitoreo de Radón en los balnearios nos ayuda a determinar qué tipo de materiales rocosos es el que está en contacto con las aguas manantiales, al provenir del subsuelo podemos determinar la geología de la zona, esto con la finalidad de utilizarlos en próximos trabajos.

El pH, los sólidos disueltos y la temperatura influyen en la detección de Radón sin embargo no se obtuvo lo que se esperaba, ya que el objetivo era obtener mayor liberación de Radón en aguas hipertermales, al poseer una temperatura mayor tiende a degradar más rápido la roca. El balneario el Borbollón fue el único balneario de tipo hipertermal, al revisar estudios realizados por INEGI sobre el estudio de la zona se describe que posee roca volcánica, a diferencia del balneario la cascada que es agua fría, pero se encuentra en zonas de rocas graníticas que son ricas en uranio, lo que indica que podemos conocer qué tipo de roca se encuentra en la zona a través de la liberación de este gas.

El Radón por sí solo no posee movimiento necesita de otro fenómeno físico para poder moverse y mezclarse con otros factores (aire, agua, rocas, alimentos, etc), es por eso que los principales acumulamientos de Radón se generan en zonas con muy poca ventilación. En la toma de lecturas con el detector Geiger Müller nos mostró que el balneario Tonicato es el que posee mayor cuentas por minuto, esto se debe a que es una zona con mínimas corrientes de aire y como resultado esto es lo que ocurre en la superficie conocida como medio poroso continuo, pero en el subsuelo el medio físico que estudiamos para este trabajo, es el agua que fluye dentro de una cavidad subterránea.

El Radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) puede ser usado como un premonitor geofísico, tal como nos muestran los valores en la tabla 3, podemos utilizarlos como referencia para posteriores estudios. En el Estado de México hay lugares con mayor abundancia de  $^{222}\text{Rn}$  y otros con menor, se puede decir que existe una línea de tendencia la cual necesita un constante monitoreo de las zonas, para poder comprobar que los niveles obtenidos en este trabajo aumentan exponencialmente.

El Radón nos brinda una extensa información al ser un gas noble que está presente en la naturaleza y nos permite emplearlo como herramienta en prospección minera, así mismo para la actividad tectono-sísmica local, ya que todo esto es un área de exploración geofísica.

## Bibliografía

1. [http://caebis.cnea.gov.ar/IdEN/CONOC\\_LA\\_ENERGIA\\_NUCX/CAPITULO\\_6\\_Difusion/CICLO\\_COMB\\_NUCL/EI\\_uranio.htm](http://caebis.cnea.gov.ar/IdEN/CONOC_LA_ENERGIA_NUCX/CAPITULO_6_Difusion/CICLO_COMB_NUCL/EI_uranio.htm)
2. Arthur A. Beiser. 2003. Concepts of Modern Physics. Ed McGraw-Hill. 6<sup>a</sup> ed.
3. Navarrete M, Cabrera L, et. al 1993. INTRODUCCION AL ESTUDIO DE LOS RADIOISOTOPOS, Pennsylvania 267-4 .
4. Peter G. Cook. 2000. Environmental Tracers in Subsurface Hydrology. L. De Wayne Cecil and Jaromy R. Green. Capitulo 6. Radon-222. Kluwer Academic Publisher USA.
5. Cothorn C. Richard, et al. 1987. Environmental Radon Ed. Springer. 1<sup>a</sup> ed.
6. Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov>.
7. Alexander E. Gates, Gundersen, Linda. 1992. Sensitivity of soil radon to geology and the distribution of radon and uranium in the Hylas zone area, Virginia. Geological Society of America
8. Terry L. Hair, et. al. 1995. The Determination of Radon Activities in Ground Water from Wisconsin Till in Southwestern Ohio and Southeastern Indiana. Ohio J. SCI. 95 (3): 248-253.
9. Lippmann J. et. al. 2005. On the geochemistry of gases and noble gas isotopes (including <sup>222</sup>Rn) in deep crustal fluids: the 4000 m. KTB-pilot hole fluid production test 2002- 03. Geofluids. 5, 56-66.
10. <http://www.artinaid.com/2013/04/componentes-y-tipos-de-fallas-geologicas/>
11. KING, C., (1982): Radon monitoring for earthquake prediction in China. Earthquake Predict. Research, 3; pp. 47 – 68.
12. Radiansa consulting. <http://www.radiansa.com/>.
13. NCRP Report No. 112, Calibration of Survey Instruments used in Radiation Protection for the Assessment of Ionizing Radiation Fields and Radioactive Surface Radiation, National Council on Radiation Protection and Measurements, December 31, 1991.
14. <http://www.ssn.unam.mx>
15. [http://ifomegem.edomex.gob.mx/directorio\\_minas\\_activas](http://ifomegem.edomex.gob.mx/directorio_minas_activas)
16. Espinosa G. and Gammage R. B. "Indoor radón concentration survey in Mexico" Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. Volume 236, Numbers 1-2, 227-229, 1998.
17. Durrige Company. Manuales de operación RAD7.
18. Gómez- Tuena A, Orozco-Esquivel MT, Ferrari L. Patogénesis ígnea de la faja Volcánica Transmexicana. Bol. Soc. Geol. Mex. 72: 227-285, 2005.
19. Moran Zenteno, J (1984). *Geología de la República Mexicana*
20. [http://ifomegem.edomex.gob.mx/sites/ifomegem.edomex.gob.mx/files/files/Informacion%20Geologica/Carta\\_Geol%C3%B3gica\\_Edo\\_Mex.pdf](http://ifomegem.edomex.gob.mx/sites/ifomegem.edomex.gob.mx/files/files/Informacion%20Geologica/Carta_Geol%C3%B3gica_Edo_Mex.pdf)
21. Ingeniería geológica de Luis | González Vallejo. 2002.



22. Buford Hwy NE Atlanta, GA 30341 USA, Agencia para sustancias Tóxicas y el registro de enfermedades. 06 mayo del 2016  
[https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs145.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs145.html)
23. Rock Mechanics for Underground Mining. Brady, B. H. G., Brown, E. T. Kluwer Academic Publishers. 1999.
24. a b David Mediavilla, Público. "La predicción del seísmo fue una coincidencia" (en español). Consultado el 7 de abril de 2009.