

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



Evaluación de gas radón (^{222}Rn) y torón (^{220}Rn) en suelo. Caso de estudio ciudad de Mexicali y zonas conurbadas

TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS

PRESENTA
ESTHELA JENIFER RAMÍREZ GUARDIOLA

DIRECTOR DE TESIS
DR. JAIME ALONSO REYES LÓPEZ

CODIRECTOR
DRA. DINA ARELI LARIOS LÓPEZ

MEXICALI, B. C.

ENERO DE 2014

Gracias a esas personas importantes en mi vida, que siempre me han brindado toda su ayuda y apoyo incondicional, ahora quiero regresar un poquito de todo lo maravilloso que me han concedido. Con todo mi cariño y admiración esta tesis se las dedico a ustedes:

Mamá

Papá

Familia

Amigos

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá Juana Esthela Guardiola Simental por haberme dado de su inteligencia y compartido sus experiencias, su confianza en cualquier momento, que siempre me ayudó para continuar adelante y sobre todo que me dio su amor desinteresado.

A mi papá Moises, nunca terminare de agradecerte por todo lo que hiciste por mí.

A mi familia, mi abuelita Ampelia Simental por su amor y ayuda, tíos, tías y primos.

A mi amiga Silvia Ruiz por la gran amistad brindada y el inmenso apoyo manifestado.

A mis amigas y amigos, Luis, Miriam, Grisela, Sergio, Silvia, Bety, Carmen por esa maravillosa amistad e incontables momentos hermosos compartidos en los cuales estuvieron a mi lado confiando siempre en mí. A todos aquellos amigos que siempre tuvieron una palabra de apoyo, aliento.

A mis asesores y maestros por el tiempo brindado, por su entrega y dedicación, así como de los conocimientos compartidos.

A CONACYT por la beca brindada para la continuación de mis estudios y la realización de este trabajo.

A la Universidad Autónoma de Baja California mi alma mater, así como al Instituto de Ingeniería y a todo su claustro de profesores.

A todos aquellos que directa o indirectamente contribuyeron en alguna forma a enriquecerme como persona, así como a culminar el trabajo emprendido.

Con especial cariño a:

A mi director Dr. Jaime Alonso Reyes por su dedicación, apoyo y confianza. Por todo el tiempo y esfuerzo brindado, simplemente por creer en mí.

A la Dra. Dina López por sus magníficas enseñanzas, el conocimiento y experiencia compartida, así como todo el apoyo brindado para formarme como persona.

A los Doctores: Dra. Concepción Carreón, Dr. Jorge Ramírez, Dr. Octavio Lázaro y Dr. Marco Antonio Reyna por sus comentarios para enriquecer y mejorar la presente tesis.

A mis compañeros Marcelo Lomelí, Carlos Salazar, Francisco Javier Gómez y Hugo Favela quienes me apoyaron incondicionalmente para la toma de datos.

A los servicios sociales de la Facultad de Ingeniería, Diego Sánchez y Rafael Ortiz por su apoyo.

ÍNDICE

Resumen.....	1
1. Introducción.....	2
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1. Objetivo general.....	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	5
1.3. Justificación.....	5
1.4. Área de estudio.....	6
2. Antecedentes.....	8
2.1. Radón.....	8
2.1.1. Comportamiento del Radón.....	8
2.1.2. Principales fuentes de Radón.....	8
2.1.3. Transporte Radón (^{222}Rn) y Torón (^{220}Rn).....	9
2.1.4. Cadenas de desintegración del Radón (^{222}Rn) y Torón (^{220}Rn).....	11
2.2. Estudios en el medio físico.....	13
2.2.1. Radón - Agua.....	14
2.2.2. Radón - suelo.....	15
2.2.3. Radón - interiores.....	15
2.2.4. Radón - terremotos.....	16
2.2.5. Radón - salud.....	17
2.2.6. Radón - fallas.....	18
2.2.7. Radón - volcanes.....	19

2.3.	Geología.....	19
2.4.	Clima Mexicali.....	20
3.	Materiales y Métodos.....	21
3.1.	Ubicación de estaciones.....	21
3.2.	Equipo y protocolo de medición.....	23
3.2.1.	Equipo.....	23
3.2.2.	Sonda de suelo para gas de acero inoxidable.....	24
3.2.3.	Protocolo Torón.....	26
3.3.	Protocolo de medición.....	27
3.4.	Base de datos de mortalidad por cáncer.....	32
3.5.	Representación gráfica.....	34
3.6.	Análisis estadístico.....	35
3.6.1.	Estadística descriptiva.....	35
3.6.2.	Gráfica de Sinclair.....	37
3.6.3.	Análisis de correlación.....	38
4.	Resultados y discusiones.....	43
4.1.	Radón.....	43
4.2.	Torón.....	46
4.3.	Salud.....	47
4.4.	Análisis estadístico.....	50
4.4.1.	Estadística descriptiva.....	50
4.4.2.	Gráficas de Sinclair.....	54
4.4.3.	Análisis de correlación.....	58

5. Conclusiones y recomendaciones	69
5.1. Conclusiones	69
5.2. Recomendaciones	70
6. Referencias.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio y de las estaciones de medición	7
Figura 2. Mecanismos de transporte de Radón en el suelo (Adaptada de Sainz, 2012).	10
Figura 3. Permeabilidad en distintos tipos de suelo. (Adaptada de Quindós, 2002).	11
Figura 4. Serie de decaimiento del Torio-232 (Adaptada de Bulbulian, 1996	12
Figura 5. Serie de decaimiento del Torio-232. (Adaptada de Bulbulian, 1996).	13
Figura 6. Área de estudio y de ubicación de estaciones propuesta.	22
Figura 7. Área de estudio y de ubicación de estaciones medidas.	22
Figura 8. Equipo de medición de gas Radón, El RAD7 de la compañía DurrIDGE.....	23
Figura 9. Vista de la sonda y el manómetro de succión.....	25
Figura 10. Vista de la instalación en campo del equipo de medición de gas Radón.	26
Figura 11. Vista frontal del equipo y partes principales.	30
Figura 12. Instalación del equipo de medición en el campo.....	31
Figura 13. Ubicación de todos los casos de cáncer pulmonar de la base de datos utilizada del periodo 2003-2011	33
Figura 14. Mapa de concentración de gas radón (pCi/l) emanado de suelo de Mexicali.	45
Figura 15. Mapa de concentración de gas torón (pCi/l) emanado de suelo de Mexicali.	48
Figura 16. Mapa de los descensos por consecuencia de cáncer pulmonar distribuidos por Ageb.	49
Figura 17. Histograma obtenido de los datos de radón.....	51
Figura 18. Histograma obtenido de los datos de torón.	53
Figura 19. Gráfica de Sinclair con las tres poblaciones identificadas en los datos de radón.....	55
Figura 20. Mapa de puntos medios en cada AGEB.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Puntos y coordenadas límites del área de estudio.....	21
Tabla 2. Parámetros tomados y medidos durante el levantamiento de campo.	31
Tabla 3. Casos de cáncer pulmonar de la ciudad de Mexicali, periodo 2003-2011.	33
Tabla 4. Ejemplo del manejo de información de la base de datos utilizada.	34
Tabla 5. Datos de ejemplo utilizados en el análisis de datos de regresión y correlación.	36
Tabla 6. Datos de ejemplo utilizados para realizar la gráfica de Sinclair.....	38
Tabla 7. Valores de radón. Un ejemplo de valores obtenidos en el punto medio de cada AGEB.....	39
Tabla 8. Datos de ejemplo de las muertes de cáncer pulmonar para cada AGEB.....	40
Tabla 9. Datos de ejemplo utilizados para realizar el análisis de correlación.....	41
Tabla 10. Valores estadísticos obtenidos de los datos de radón.	50
Tabla 11. Distribuciones de frecuencia obtenida de los datos de radón.	52
Tabla 12. Distribuciones de frecuencia obtenida de los datos de torón.....	53
Tabla 13. Rangos de concentración de gas radón en las tres poblaciones obtenidas del gráfico de Sinclair.....	56
Tabla 14. Estadística descriptiva de la población base.....	56
Tabla 15. Estadística descriptiva de la población normal.....	57
Tabla 16. Estadística descriptiva de la población anómala.....	58
Tabla 17. Valores de radón y torón en los puntos medios de cada AGEB.....	60
Tabla 18. Resultados de la regresión utilizando concentraciones de radón y muertes de cáncer pulmonar por AGEB'S.....	66
Tabla 19. Análisis de varianza Prueba-F utilizando concentraciones de radón y muertes de cáncer pulmonar por AGEB'S.....	66
Tabla 20. Resultados de la regresión utilizando concentraciones de torón y muertes de cáncer pulmonar por AGEB'S.....	67
Tabla 21. Análisis de varianza Prueba-F utilizando concentraciones de torón y muertes de cáncer pulmonar por AGEB'S.....	68

Resumen

A nivel mundial las muertes por cáncer pulmonar ocupan el primer lugar dentro de los cinco principales tipos de cáncer. Se considera la exposición al gas radón como la segunda causa de muertes por cáncer pulmonar tan solo detrás del tabaco. El gas radón en interiores puede acumularse a niveles perjudiciales para la salud en cualquier edificación. Mexicali es una ciudad con un clima extremo, donde no existe una ventilación adecuada en las edificaciones por permanecer la mayor parte del año cerradas debido a los sistemas de aire acondicionado. Debido a esto, es importante contar con información que indique zonas en las cuales las concentraciones de emanación de gas radón sean altas. Ya que el radón proveniente del suelo es la principal fuente de gas radón en interiores, se vuelve imprescindible como primer paso medir las concentraciones de emanación de gas radón.

El objetivo del presente trabajo de investigación fue la evaluación de las concentraciones de emanación de gas radón (^{222}Rn) y torón (^{220}Rn) del suelo en la zona urbana de Mexicali. El área de estudio cubrió completamente la ciudad de Mexicali Baja California, y algunas zonas conurbadas. La metodología desarrollada consistió en una etapa inicial para realizar las mediciones de concentración de gas radón y torón en las estaciones establecidas. La siguiente etapa estuvo enfocada en el análisis y evaluación de los datos medidos de gas radón y datos recopilados de fallecimientos a causa de cáncer pulmonar.

Como resultados se obtuvieron mapas de gas radón y torón con zonas en las cuales las emanaciones de gas radón (^{222}Rn) y torón (^{220}Rn) del suelo son altas y por lo tanto de especial atención. El análisis estadístico mostró que existe una evidente relación entre la emanación de gas radón y los fallecimientos por cáncer pulmonar.

Derivadas del presente trabajo de investigación se proponen las subsiguientes recomendaciones tales como realizar mediciones con estaciones a distancias más próximas entre si, en aquellas zonas en las cuales se encontró que la emanación de radón y torón son altas; realizar mediciones intramuros en hogares y edificios en los cuales se encuentre la población expuesta tales como escuelas, oficinas, entre otras.

1. Introducción

El radón (^{222}Rn) es un gas radiactivo que no tiene color ni olor. Se da de forma natural por la transformación de elementos radiactivos, en este caso del uranio-238, el cual está presente en la tierra desde su formación hace 4,500 millones de años. Específicamente, el radón se transforma en elementos sólidos radiactivos conocidos como isótopos. Esta progenie de corta vida incluye isótopos como polonio-218, polonio-214, polonio-210 y finalmente plomo-214, el cual es estable. Estos isótopos durante su transformación emiten radiaciones alfa, que en cantidades altas es nociva para la salud.

El gas radón puede desplazarse al aire, así como a depósitos de agua subterránea o superficial. La progenie del radón puede adherirse al polvo y a otras partículas las cuales pueden ser aspiradas y adheridas en los pulmones, iniciando radiaciones dentro del organismo del ser humano. También puede ser aspirado como radón, que al transformarse en una progenie sólida puede adherirse a los pulmones con los mismos efectos nocivos.

El radón está presente tanto en el aire exterior como en el interior, dependiendo del tipo de roca y/o suelo presente en cada sitio. Normalmente se encuentra en muy bajos niveles en el aire exterior y en el agua potable proveniente de ríos y lagos. Cuando las condiciones son propicias, se puede encontrar a niveles más elevados en el aire dentro de ciertas casas y edificios, así como en fuentes de agua subterránea, como la proveniente de los pozos (American Cancer Society, 2010). Los niveles de radón en las casas y edificios dependen de las características del material de construcción usados y como se ha mencionado del tipo de roca de la región. El gas radón que es emitido a través del suelo, puede entrar a los edificios a través de grietas en el piso o las paredes, los empalmes en las construcciones o los espacios que quedan en los cimientos alrededor de las tuberías, varillas o bombas (Quindos 2002, American Cancer Society, 2010). La principal fuente de radón en interiores es aquella proveniente del suelo (Nazaroff, 1988; Guo, et. al. 2004; Je, et. al. 2007; Chen, et al. 2008a; Hosoda, et. al. 2009). Se estima que el 60.4% del radón en interiores proviene del suelo subyacente y adyacente a las edificaciones (Bodansky, 1987, Ren; 2001).

Desde que Sevc (1971) relacionó la incidencia de casos de cáncer pulmonar en

trabajadores mineros con la exposición acumulada al radón y a sus productos de desintegración, se han seguido realizando estudios sobre este gas, como factor de riesgo por este cáncer, principalmente en Estados Unidos, Canadá, Australia, China y Europa (US.EPA 1993, Burian, et. al. 2008). La elevada cantidad de casos de cáncer pulmonar por la exposición de radón dentro de los hogares y escuelas tuvo un gran impacto en la década de los ochentas, cuando en Estados Unidos se proporcionaron estudios en los cuales se daba a conocer que los niveles existentes dentro de las edificaciones resultaban peligrosas para la salud (US.EPA, 1993). En la actualidad en numerosos países del mundo la exposición al radón es la segunda causa de cáncer pulmonar, solamente por debajo del tabaquismo (OMS 2009, USEPA 2012).

Las condiciones demográficas y geográficas de Mexicali la convierten en una ciudad con serios problemas ambientales, principalmente el de las partículas suspendidas en el aire. Cada año se arrojan a la atmósfera alrededor de 62,000 toneladas de PM10, siendo la principal fuente las partículas de caminos no pavimentados con 53,689 toneladas, lo que representa el 87% del total del PM10 arrojado (Ingeniería de Control Ambiental y Riesgo Industrial, 1999). El propósito del presente estudio se enfoca en establecer la relación existente entre las emanaciones de gas radón medidas en el suelo de la zona urbana de Mexicali con las muertes de cáncer pulmonar reportadas por el sector salud en el período 2003-2011.

1.1. Planteamiento del problema.

En países industrializados, los seres humanos pasan alrededor del 75% de su tiempo en ambientes cerrados. En Estados Unidos se reporta que la exposición y respiración prolongada de radón dentro de espacios cerrados, es el segundo factor de riesgo de cáncer pulmonar, para aquellas personas que fuman y el primero para las personas que no tienen el hábito de fumar. (OMS, 2009).

La ciudad de Mexicali presenta un clima extremo, en el que se registran, en los meses de verano, altas temperaturas (incluso mayores de 45°C), y por contrario muy bajas en los meses de invierno (incluso menores de 2°C), lo que trae como resultado que las edificaciones permanezcan cerradas por el uso de sistemas de aires acondicionados; y por tanto, una escasa ventilación de viviendas, escuelas, y edificios (INE, 2002).

Tomando en consideración que en Mexicali, Baja California los inmuebles ocupados carecen de una adecuada ventilación, por la razón antes expuesta; esto es, un clima desfavorable para que las habitaciones puedan mantenerse abiertas o ventiladas. Por ejemplificar, en verano, el uso continuo de aparatos de refrigeración, y en invierno, con el propósito de protegerse de las bajas temperaturas y el uso de calefactores.

Por otro lado, se resalta el hecho de que el movimiento del gas Radón se da preferencialmente por zonas fracturadas como en la que se encuentra la región de Mexicali. Cabe aclarar, que la ciudad de Mexicali y su Valle se encuentran situados dentro del sistema de fallas de San Andrés, sistema de fallas geológicas generado por la actividad de las placas tectónicas del Pacífico y de Norteamérica, zona catalogada como de muy alto peligro sísmico.(Press, 1998). Las fallas más importantes que afectan al valle de Mexicali y que forman parte del sistema de fallas de San Andrés son la falla Imperial, la falla Cerro Prieto, la falla Cucapah y la falla Michoacán (Lira, 2005). La falla Michoacán es inferida en Lira (2005) y se proyecta hacia la ciudad, aunque no es visible a simple vista en la superficie (Atlas de riesgos del municipio de Mexicali 2012).

De acuerdo a lo anterior y ya que Mexicali carece de estudios sobre el gas Radón (^{222}Rn), se plantea realizar un estudio al respecto y desarrollar un mapa de emanación de este gas que pueda servir para identificar zonas donde dicho gas puede llegar a ser nocivo para la salud. Además, el cruce de información con datos del sector salud permitirá dar una visión general del problema en casos de cáncer pulmonar. Es por ello que se considera de suma importancia realizar este estudio y realizar un mapa de emanaciones de gas radón y torón para la ciudad de Mexicali.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general.

Realizar un mapa de Mexicali y zonas conurbadas de concentraciones de emanación de gas radón (^{222}Rn) y torón (^{220}Rn) en suelo y establecer el riesgo de cáncer pulmonar en la población.

1.2.2. Objetivos específicos.

1. Analizar las concentraciones obtenidas de radón (^{222}Rn) y torón (^{220}Rn) en suelo.
2. Ubicar zonas con mayores concentraciones de radón (^{222}Rn).
3. Establecer zonas de interés para la realización posterior de mediciones más minuciosas de radón (^{222}Rn) y torón (^{220}Rn).
4. Correlacionar estadísticamente las mediciones de Radón con los datos de cáncer pulmonar proporcionados por el sector salud durante el periodo 2003-2011.

1.3. Justificación.

En varios países tales como Estados Unidos de América, China, Taiwán, Francia, España entre otros, el radón (^{222}Rn) es tema actual y de gran importancia por los problemas de salud, principalmente al relacionado al cáncer pulmonar. En México desafortunadamente se carece de pocos estudios que analicen y documenten este importante tema, y como consecuencia no existe una legislación inexistente que trate de prevenir los riesgos por las emanaciones de Radón en los interiores de las edificaciones.

En Estados Unidos, al radón (^{222}Rn) lo consideran como el segundo factor de riesgo para contraer cáncer pulmonar. En Europa el 9% de las muertes de cáncer de pulmón son por factores atribuibles al radón (^{222}Rn). Cuando este gas se encuentra concentrado en lugares cerrados resulta seriamente dañino para la salud, lo que convierte al gas radón (^{222}Rn) en un tema coyuntural para la salud pública, el cual necesita verse plasmado en un dispositivo legal y para ello se requieren estudios detallados que apoyen las medidas de prevención a seguir..

Tomando como base que la principal fuente de gas radón (^{222}Rn) intradomiciliario proviene del suelo (Nazaroff, 1988; Guo, et. al. 2004; Je, et. al. 2007; Chen, et al. 2008a; Chen, et. al. 2008b; Hosoda, et. al. 2009), es por ello que esta investigación propone el estudio detallado, identificando las zonas con más alta concentración de emanación de gas radón (^{222}Rn) en suelo, tomando mediciones equidistantes en la ciudad de Mexicali, y así establecer zonas de riesgo, lo que además será correlacionado con casos de muertes por cáncer pulmonar. Es por demás resaltar el riesgo que corren y el severo problema para los habitantes circundantes a estas zonas de emanaciones altas de Radón. Tan importancia es este tema que como se ha visto anteriormente, diversos países han convertido el tema de gas radón (^{222}Rn) en materia de

discusión y legislación en sus países.

1.4. Área de estudio

Mexicali es la ciudad más septentrional de América Latina, se localiza en el estado mexicano de Baja California en el extremo noroeste de México. Colinda al norte con California, Estados Unidos de America (USA, por sus siglas en inglés); al este colinda con Arizona (USA), con el estado de Sonora, México y con el Golfo de California; al sur con el Golfo de California y el municipio de Ensenada, Baja California y al oeste con los municipios de Ensenada y Tecate, Baja California (INEGI, 2009). Las coordenadas geográficas que limitan el área de estudio son los paralelos $32^{\circ} 31.498'$ y $32^{\circ} 40.710'$ de latitud norte; los meridianos $115^{\circ} 12.914'$ y $115^{\circ} 34.737'$ de longitud oeste. La figura 1 muestra la ubicación de la zona de estudio. Así, el área de estudio abarca por completo la zona urbana de Mexicali y sus zonas conurbadas.

Mexicali es la capital del estado de Baja California y se encuentra ubicada en el desierto de Altar al Noroeste de México. La población de Mexicali es de 936,826 habitantes que representa el 29.70% del total de la población en el estado (INEGI 2010). La ciudad de Mexicali presenta un clima extremo, en los meses de verano altas temperaturas de hasta 50°C , y por contrario muy bajas en los meses de invierno 5°C (INE, 2004).

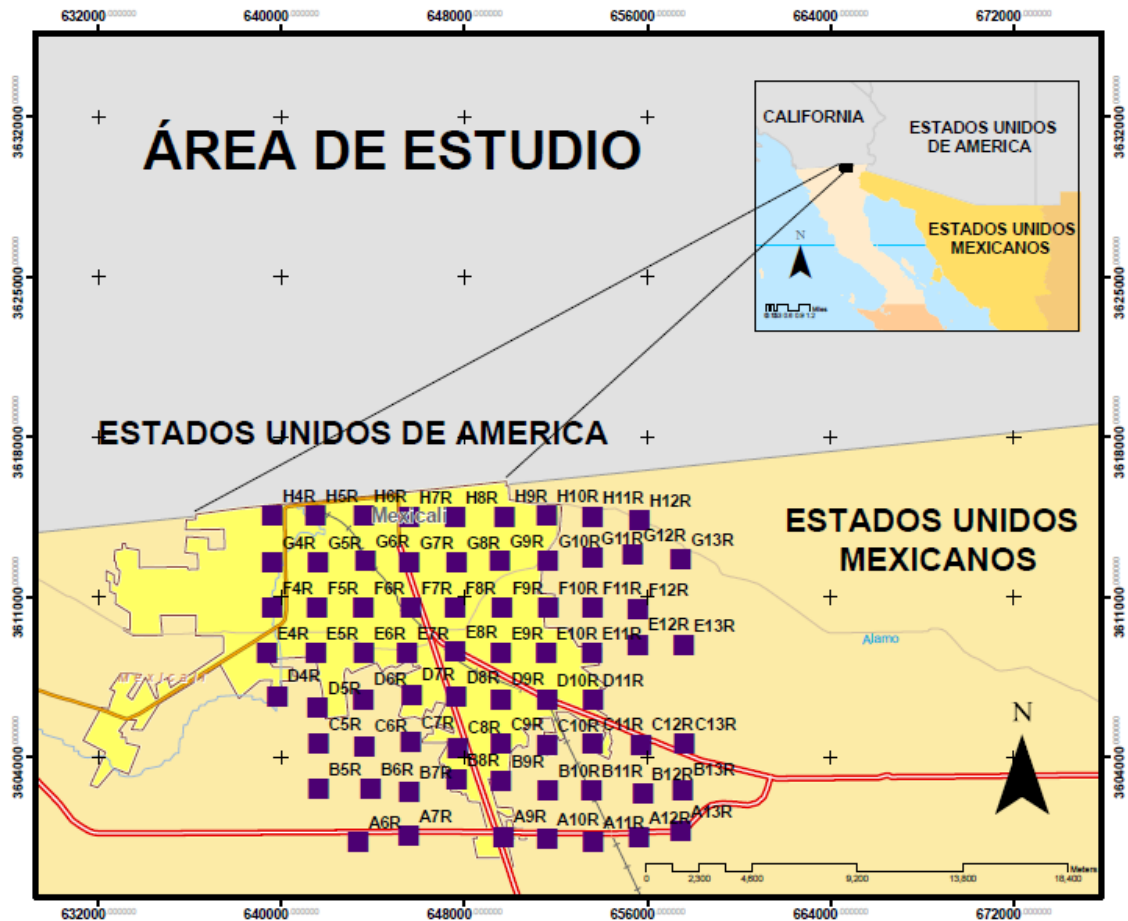


Figura 1. Ubicación del área de estudio y de las estaciones de medición

2. Antecedentes

2.1. Radón

El radón es un elemento químico perteneciente al grupo de los gases nobles. En su forma gaseosa es incoloro, inodoro e insípido (en forma sólida su color es rojizo). En la tabla periódica tiene el número 86 y símbolo Rn. Su masa media es de 222, lo que implica que por término medio tiene $222-86 = 136$ neutrones. Igualmente, en estado neutro le corresponde tener el mismo número de electrones que de protones, esto es, 86. Es un elemento radiactivo y gaseoso, encuadrado dentro de los llamados gases nobles.

El radón es producto de la desintegración del radio (^{226}Ra), elemento altamente radiactivo, así como del torio de donde viene el nombre de uno de sus isótopos, torón, de vida media de 55 segundos y de número másico 220. El isótopo ^{219}Rn es producto de la desintegración del actinio, llamado actinón y tiene una vida media de 4 segundos. Además de todos éstos, el radón tiene 22 isótopos artificiales, producidos por reacciones nucleares por transmutación artificial en ciclotrones y aceleradores lineales. El isótopo más estable es el ^{222}Rn , también el más abundante, con una vida media de 3.8 días

2.1.1. Comportamiento del Radón

Debido a que el radón es un gas noble, no reacciona ni se liga a casi ningún otro elemento o material en el suelo y puede movilizarse con el agua subterránea o el aire. Los átomos radioactivos de vida media corta en que se transforma el radón constituyen la progenie del radón. El aire, el suelo y el agua contienen muchos átomos que se encuentran en diferentes posiciones en estas reacciones de decaimiento.

Una muestra de cualquiera de estos medios contendrá una mezcla de estos elementos radioactivos o isótopos que incluirá al radón y a la progenie de él.

2.1.2. Principales fuentes de Radón.

Las principales fuentes de radón son:

- Rocas y suelo. Las rocas al formarse contienen cantidades apreciables de elementos radiactivos, entre los cuales el uranio-235, el uranio-238 y el torio-232, con una vida media de miles de millones de años, son la cima de una cadena de desintegración radiactiva natural. Estas tres cadenas de desintegración natural incluyen diferentes isótopos de radón. Por otro lado, el suelo al ser formado por procesos de erosión de las rocas puede contener elementos radiactivos, dependiendo del tipo de roca de la que provengan.
- Materiales de Construcción. Algunos materiales de construcción pueden contener elementos radiactivos si provienen de materiales básicos (rocas y/o suelos) que lo contengan. Incluso se ha dado el caso de varillas contaminadas de material radiactivo.
- Agua. El Radón se puede encontrar en el agua en forma de burbujas y liberarse cuando hay una agitación o simplemente cuando se mueve este líquido.

2.1.3. Transporte Radón (^{222}Rn) y Torón (^{220}Rn)

El gas radón presente en las rocas y el suelo puede movilizarse a través del subsuelo hasta llegar al agua subterránea y también a la superficie (aire). Los principales procesos de transporte pueden ser por difusión o convección (figura 2).

- Difusión: Por diferencias de concentración. Movimiento relativo del gas en el seno del material que lo contiene.
- Convección: Por diferencia de Presión/Temperatura. El fluido que contiene el gas actúa como vehículo de transporte.

Los átomos de Radón que se forman a partir del Radio van a poder desplazarse debido a su carácter gaseoso y desintegrarse dando lugar a descendientes. Pero este desplazamiento solo será posible si las condiciones de las rocas y el suelo se lo permiten. Así, las rocas muy fracturadas o los suelos muy porosos van a poner poca resistencia al desplazamiento del Radón y van a permitir que este alcance fácilmente la superficie del

suelo, y por lo tanto el aire exterior.



Figura 2. Mecanismos de transporte de Radón en el suelo (Adaptada de Sainz, 2012).

La permeabilidad de un medio (fig. 3) relaciona la velocidad aparente de un fluido, líquido o gas, a través de los poros del mismo con los gradientes de presión existentes. Esta relación descrita por la ley de Darcy, y, por supuesto, del valor de dicho parámetro se puede deducir la importancia que el proceso de convección tiene en el transporte de radón en el suelo con relación al otro mecanismo denominado difusión molecular (Quindós, 2002).

La permeabilidad de un medio depende no sólo del volumen de poros del mismo, sino también de su tamaño, distribución e interconexión existente entre los mismos.

Además de la porosidad ya comentada, la permeabilidad de los suelos, que nos indica la mayor o menor dificultad que los mismos presentan al paso de fluidos, constituye el parámetro más importante a la hora de evaluar el escape de radón del suelo.

Las arcillas, por ejemplo, al contener una concentración de uranio apreciable, son fuentes potenciales de radón. Sin embargo, su carácter impermeable hace que la cantidad de radón que alcanza la superficie sea muy pequeña. Por el contrario, en rocas muy fracturadas y permeables como pueden ser las calcáreas, que tienen un contenido en uranio unas 5 ó 10 veces más baja que las arcillas, el radón se desplaza más fácilmente y puede alcanzar la

superficie del suelo en una mayor proporción (Quindós, 2002).

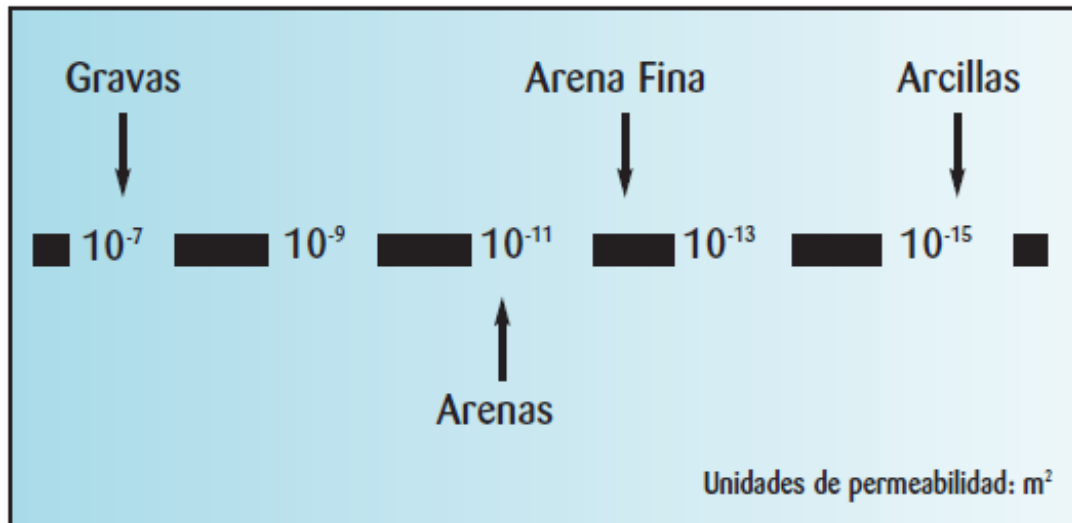


Figura 3. Permeabilidad en distintos tipos de suelo. (Adaptada de Quindós, 2002).

2.1.4. Cadenas de desintegración del Radón (^{222}Rn) y Torón (^{220}Rn)

El radón se presenta en tres formas o isótopos naturales provenientes de distintas cadenas de desintegración. Estos 3 isótopos son: el radón-219 (^{219}Rn) comúnmente llamado Actinón proveniente de la cadena de desintegración del uranio-235; el radón-222 (^{222}Rn) o simplemente Radón proveniente del uranio-238 y el radón-220 (^{220}Rn) o torón que es parte de la cadena de desintegración del torio-232. De estos, los dos últimos son el objetivo del presente estudio, dada su vida media de 3.82 días y de 55.6 segundos, respectivamente.

- Torón (^{220}Rn)

El torio-232 es el elemento cabecera de la serie radiactiva de desintegración natural a la cual pertenece el radón-220 o torón. El torio-232 tiene una vida media de 14 mil millones de años y termina en el plomo-208 el cual es estable. A través de su desintegración, el torio-232 se transforma en 10 elementos (isótopos), emitiendo siete partículas alfa y cinco betas (figura 4).

- Radón (^{222}Rn)

Una cadena de desintegración es una serie de transformaciones diversas. El radón es parte de la cadena de desintegración de un núcleo de uranio-238 que atraviesa una serie de 14 transformaciones hasta convertirse en plomo-206 estable. A través de su desintegración, el uranio-238 se transforma en 13 elementos (isótopos), emitiendo ocho partículas alfa y seis betas (figura 5). El uranio-238 tiene una vida media de 4,500 millones de años o sea más o menos el tiempo que tiene formada la tierra.

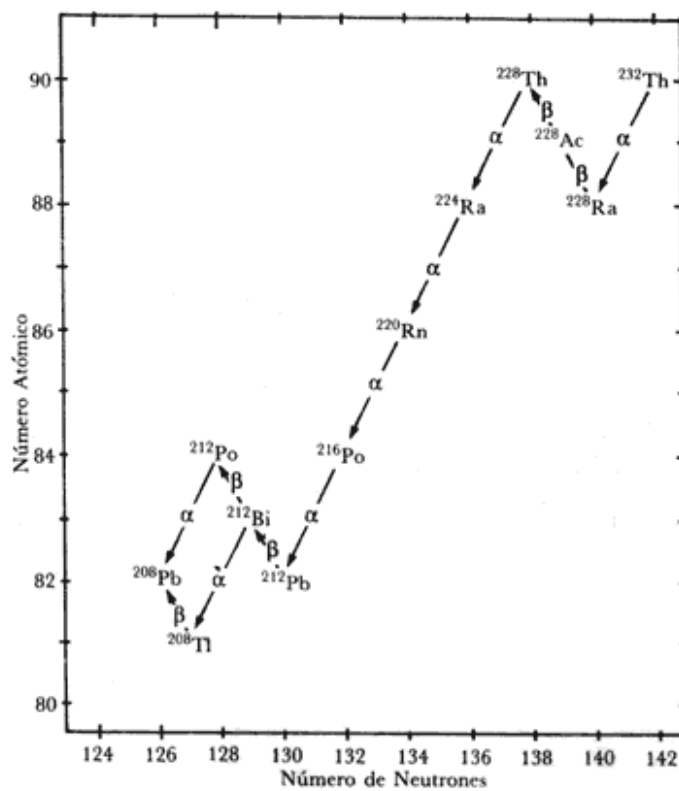


Figura 4. Serie de decaimiento del Torio-232 (Adaptada de Bulbulian, 1996)

Un isótopo de radón es el primer elemento en cada una de las cadenas de desintegración que no es un metal, de hecho es un gas inerte o noble (RAD7, 2009).

2.2.1. Radón - Agua.

La gran importancia de investigar fuentes de agua estriba en el riesgo latente de la salud de los seres humanos ya que la mayoría de las ocasiones es utilizada en las actividades diarias así como en actividades agrícolas. A continuación enlistamos distintos estudios realizados alrededor del mundo.

En Líbano se realizó un estudio del radón disuelto en agua de consumo doméstico en las distritos de Beirut, Monte Líbano, Sur de Líbano, Norte de Líbano, Beqaa, Nabatieh, tratando de relacionarlo con los riesgos a la salud que pueden ser inducidos por la radiación (Abdallah et al., 2007).

En Afyonkarahisar localidad de Anatolia, Turquía, en la zona de fallas Aksehir, se midieron las aguas subterráneas con el fin de determinar la conexión entre las anomalías de radón y las fallas geológicas activas (Yalim et al., 2007).

En Chihuahua, México se determinaron las concentraciones de los radionucleidos naturales como: ^{222}Rn , ^{226}Ra y uranio en aguas subterráneas para consumo humano en diferentes acuíferos del estado (Villalba et al., 2006).

En Turquía se han desarrollado diferentes trabajos, uno de ellos relativo a muestras de agua en el norte y el este del sistema de fallas de Anatolia, las cuales se analizaron para determinar la concentración de radón, el contenido de radio efectivo y la tasa de exhalación de radón (Baykar et al. 2006.)

En las ciudades de Fairfax (Virginia) y Montgomery (Maryland) ambos en USA se desarrollaron estudios para establecer la relación entre el Radón en agua de pozo y el cáncer. Debido a que se considera que aquellas personas que consumen agua de pozo con más de 2,500 pCi/L de radón disuelto son mayormente propensas a un riesgo de cáncer en contraposición con aquellas que están expuestas a la inhalación de aire con 1 pCi/L (Mose & Mushrush, 1997).

2.2.2. Radón - suelo

En China para conocer los niveles de exhalación de radón en suelos de tipo sedimentario y granítico, se realizaron distintas mediciones, dichos resultados fueron propuestos para ser integrados a un estudio nacional (Wang, N. et al., 2009).

En Canadá se realizaron investigaciones en suelo. Uno de ellos en Ottawa, con el propósito de conocer si con un solo estudio de campo sería posible caracterizar dicho suelo en cuanto a las concentraciones de radón. Se comprobó que sería posible cavando a una profundidad de 80 cm, permitiendo una desviación del 30%. (Chen et al., 2008(a)). Además, en el sur de Ontario, se establecieron zonas con mayor concentración de radón (Chen et al., 2008(b)).

En el sur de Kumaun Himalaya India se realizó un estudio para determinar y catalogar zonas de bajo y alto riesgo según la tasa de exhalación de radón en suelo (Prasad et al., 2008).

En Deir Abu-Said región de Jordania se realizaron mediciones de radón en diferentes formaciones rocosas. Se realizaron mediciones a diferentes profundidades y en diferentes estaciones del año (Al-shereideh et al, 2006).

En México en 1993, se determinaron los niveles de concentración de radón en suelo además de estimarse este como una fuente de radón en el interior de casas-habitaciones (Segovia et al., 1995).

2.2.3. Radón - interiores

En México se realizaron distintos estudios para investigar el radón en interiores de edificaciones, tales como viviendas, clínicas, etc.

El ^{222}Rn y sus descendientes fueron medidos de forma continua en la ciudad de Zacatecas en el año del 2002 para estimar su tasa de exposición y obtener niveles ambientales de referencia (Quirino et al., 2002). Del 2001 al 2002 se midieron las concentraciones de radón en interiores de viviendas y clínicas públicas; las concentraciones se relacionaron con el tipo de suelos predominantes, los materiales y años de las

construcciones de techos, paredes y pisos, en las ciudades y pueblos de los 57 municipios del Estado de Zacatecas, México (Mireles et al., 2007). En el 2001 como parte de un programa para descubrir la existencia de zonas afectadas, se midieron las concentraciones de ^{222}Rn en interiores de distintas edificaciones en el Estado de Zacatecas, la concentración de ^{222}Rn se midió por el G-espectrometría de rayos de los productos de desintegración del radón (Quirino et al., 2007).

En 1990 en la Ciudad de México se midieron los niveles de radón durante invierno y primavera en el interior de distintos tipos de casas de la región con la finalidad de encontrar cuales zonas son de riesgo para la salud de las personas (Espinosa & Gammage, 1990).

En España en la región volcánica de la Garrotxa, se realizaron distintos estudios los cuales confirman la influencia de los materiales volcánicos en los valores de radón en interiores; debido a esto se desarrollo un estudio más amplio con el objetivo de presentar valores de radón medidos en el interior de abril a julio de 2004 (Baixeras et al., 2005).

2.2.4. Radón - terremotos

El trabajo de Elmaghraby y Lotfy (2009) ofrece una metodología para correlacionar el momento del terremoto, la magnitud y la localización en función del comportamiento de la concentración de radón. Al correlacionar el comportamiento del evento tectónico, teniendo la base de datos de las emanaciones de radón publicados anteriormente las señales de concentraciones de radón se pueden tomar en cuenta en la toma de decisiones (Elmaghraby et al., 2009).

Para establecer los signos precursores previos a un terremoto se consideran los cambios en las zonas de fallas o en el interior de la tierra; ya que se espera provoqué un aumento en la concentración de radón en suelo. Para apoyar este punto de vista teórico, en India en la Universidad de Calcuta se realizó una investigación en el cual se reporta el trabajo que presenta la observación de la anomalía del radón para los terremotos que se produjeron durante un período determinado (Ghosh et al., 2007).

En Turquía se estudió la relación entre los terremotos y las concentraciones de

radón en las aguas termales a lo largo de las fallas en la Cuenca de Denizli, conocida por su gran actividad sísmica (Eree et al., 2007).

2.2.5. Radón - salud

En muchos países la exposición en el hogar a los productos de desintegración radioactivos de vida corta del gas radón-222, químicamente inerte, es el responsable de aproximadamente la mitad de toda la exposición no médica a radiaciones ionizantes (UNSCEAR, 2000). En Europa se han realizado por varias décadas, estudios para estimar el riesgo de cáncer de pulmón asociado con la exposición prologada al radón en zonas residenciales (Darby, et al 2005). Aunque el hábito de fumar sigue siendo el primer factor de riesgo para desarrollar cáncer pulmonar, el radón representa el segundo factor de riesgo (Ruiz y Reyna, 2005; Ruiz y Reyna, 2006; OMS 2009). La Academia Nacional de Ciencias (NAS, 1999) estima que la exposición al radón-222 y sus descendientes causan entre 3,000 y 38,600 muertes por cáncer de pulmón por año en los Estados Unidos.

El radón se puede adherir con gran facilidad a las partículas de polvo que permanecen suspendidas en el aire. Algunas de estas partículas, las llamadas Partículas Menores a 10 micrómetros de diámetro (PM10) y las menores a 2.5 micrómetros de diámetro (PM2.5), son subconjuntos de las llamadas Partículas Suspendidas Totales (PST), y suelen ser las más peligrosas porque son las que ingresan por el tracto respiratorio hasta los alvéolos. Una vez adherido el radón al PM10 y/o al PM2.5, estas se pueden inhalar y pueden quedar atrapadas en los alvéolos, en donde por el efecto de la transformación del radón en polonio se producen pequeñas explosiones de energía con lo que se corre el riesgo de desarrollar cáncer, debido a que se altera el DNA del tejido pulmonar. Existen numerosos estudios que demuestran los efectos cancerígenos que tiene el gas radón en el pulmón del ser humano cuando los niveles están por arriba de los 4 picocurios por litro de aire (pCi/l), o cuando se expone a niveles bajos durante periodos de tiempo largos (NAS, 1998.)

En la ciudad de Mexicali, México se midieron los niveles de concentración del gas radón en los interiores de hogares con el propósito de estudiar la relación que este gas pudiera tener con los casos de muerte por cáncer de pulmón en la población (Reyna y

Badilla, 2002).

2.2.6. Radón - fallas

Al sur de Taiwán en la Universidad Nacional de Pingtung de Ciencia y Tecnología (NPUST) se llevo a cabo un análisis sistemático de las composiciones de gases del suelo, con el fin de encontrar los sitios anómalos para el helio, el radón, el nitrógeno y el dióxido de carbono los cuales coincidieron con el trazo superficial de la Falla Chaochou (Fu et al., 2008).

Cerca de la región volcánica de la Garrotxa, España se midieron los niveles de radón del suelo emanados a través de la Falla Amer, con el propósito de encontrar la relación directa entre las altas concentraciones de radón con la cercanía a la falla (Font et al., 2008).

En Turquía distintos trabajos e investigaciones fueron desarrollados para estudiar las distintas fallas que se encuentran en este país. En las zonas del distrito norte y este de Anatolia en un sistema de fallas activas se realizó un estudio con el objetivo de establecer el perfil del radón del suelo. Posteriormente se realizó el mapeo de la zona de fallas activas, y la posterior detección de fallas ocultas (İnceöz et al., 2006). También en este país, se analizaron múltiples muestras de suelo recolectadas en el sistema norte y este de fallas de Anatolia con el objetivo de conocer la tasa promedio de exhalación de radón, la concentración de radón y el contenido de radio (Baykara et al., 2005).

En el norte y noroeste de Grecia se llevaron a cabo mediciones durante los meses de verano, con el objeto básico de conocer la distribución espacial de radón. Las líneas que pasaron por las zonas de fallas revelaron anomalías relacionadas con la estructura tectónica local. Además se confirmó que la técnica de radón es de gran alcance en la detección y mapeo de zonas de fallas activas (Ioannides et al., 2003).

En el norte de Jordania se realizó una investigación con el fin de conocer la existencia de anomalías en la tasa de exhalación de radón a lo largo de distintas fallas, por otra parte otro de los objetivos fue comprobar que el radón es una excelente e indiscutible herramienta para la detección de fallas (Al-Tamimi et al., 2001).

2.2.7. Radón - volcanes

En el flanco noreste del Monte Etna, un volcán de alto riesgo en Sicilia, se investigaron los efectos de la actividad volcánica respecto a la concentración de radón en suelo. A partir de este estudio se estableció que las anomalías en la concentración de radón tienen una dependencia con la dinámica volcánica (Immè et al., 2006).

En el volcán San Miguel en El Salvador se realizó un estudio para conocer la desgasificación difusa, que incluyó la medición de las concentraciones de distintos gases liberados en dicha desgasificación difusa, tal como el dióxido de carbono, radón y mercurio (Cartagena et al., 2004).

2.3. Geología

La ciudad de Mexicali y su Valle se encuentran situados dentro del sistema de fallas de San Andrés, sistema de fallas geológicas generado por la actividad de las placas tectónicas del Pacífico y de Norteamérica, esta zona, inicia desde San Francisco, cruza la Ciudad de Mexicali y continua hacia el Golfo de Cortés; esta catalogada como una zona de muy alto peligro sísmico (Press, 1998).

Las fallas más importantes que afectan al valle de Mexicali y que forman parte del sistema de fallas de San Andrés son la falla Imperial, la falla Cerro Prieto, la falla Cucapah y la falla Michoacán (Lira, 2005). La falla Michoacán es inferida en Lira (2005) y se proyecta hacia la ciudad, aunque no es visible a simple vista en la superficie (Atlas de riesgos del municipio de Mexicali 2012).

La Falla imperial delimita el lado oriental del centro de dispersión Cerro Prieto y forma parte de un límite entre placas. Es la principal conexión entre el sistema San Andrés y las estructuras del Golfo de California. Sin tener una buena expresión geomorfológica, se extiende a lo largo de 75 km, desde 3 km al sur de la ciudad de Brawley, California, hasta el centro de dispersión Cerro Prieto con una orientación de N42°W. Su velocidad de desplazamiento se ha estimado en 47 mm/año. A esta falla se le asocian los temblores de El Centro, de 1940, de $M = 7.1$ y el del Valle Imperial, de 1979, de $M = 6.6$ (Cruz-Castillo, 2002). La cobertura propuesta para las mediciones de Radón cubre este importante y

peligroso rasgo tectónico que atraviesa la ciudad (Falla Imperial) y que como se menciona es una falla de rumbo que forma parte del conocido Sistema de la Falla de San Andrés.

2.4. Clima Mexicali

La ciudad de Mexicali presenta un clima extremoso, en los meses de verano altas temperaturas de hasta 50°C, y por contrario muy bajas en los meses de invierno, menor a 5°C (INE, 2004). Esto trae como consecuencia que las edificaciones se encuentren cerradas debido al uso de sistemas de aires acondicionados, provocando la escasa ventilación de viviendas, escuelas, y edificios.

3. Materiales y Métodos

3.1. Ubicación de estaciones

Las estaciones de medición fueron fijadas cada 2 kilómetros, estableciéndose una malla equidistante de 144 estaciones (figura 6). El área de estudio está comprendida entre los puntos denominados 1NO a 4NO que tienen las coordenadas que se especifican en la tabla 1.

Tabla 1. Puntos y coordenadas límites del área de estudio.

PUNTO	COORDENADAS	
	LATITUD	LONGITUD
1NO	32° 39.398'N	115° 34.555'O
2NO	32° 40.710'N	115° 13.065'O
3NO	32° 31.498'N	115° 12.914'O
4NO	32° 31.584'N	115° 34.737'O

El número de estaciones establecidas se determinaron con el fin de cubrir la zona urbana de Mexicali, que es el principal interés ya que la población está concentrada en ella. También se incluyeron zonas adyacentes de Mexicali, con el fin de poder realizar una comparación, así como el registro de datos para posteriores investigaciones.

Aunque se propuso una malla regular, por cuestiones de accesibilidad a ciertas zonas, no se pudieron realizar todas las mediciones programadas. De este modo, solo se realizaron las lecturas en 135 estaciones de las 144 propuestas, quedando la malla recortada hacia el noroeste, tal como se muestra en la figura 7. Las estaciones faltantes están situadas en una zona arenosa conocida como la Mesa de Andrade.



Figura 6. Área de estudio y de ubicación de estaciones propuesta.

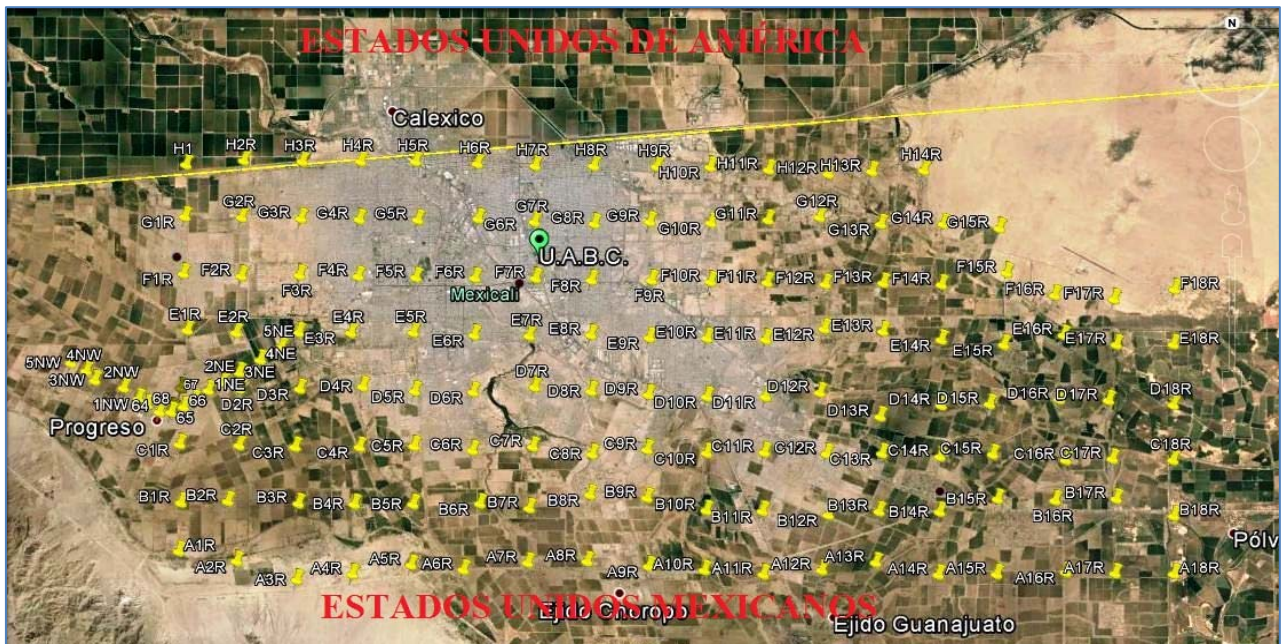


Figura 7. Área de estudio y de ubicación de estaciones medidas.

3.2. Equipo y protocolo de medición.

3.2.1. Equipo

El RAD7 (figura 8) ha sido ampliamente utilizado en diferentes estudios alrededor del mundo (Malczewski et. al. 2007; Giammanco et. al. 2009; Hasan, et al. 2011, Carapezza 2012); sus principales ventajas son: detector portátil que se maneja con facilidad, distingue el radón antiguo del radón nuevo, además distingue el radón del torón y una señal del ruido. El RAD7 no mide las concentraciones de los descendientes del radón (niveles de actividad), sólo mide las concentraciones de gas radón (RAD7, 2009).

El RAD7 de la compañía DurrIDGE, es un monitor continuo en tiempo real. El RAD7 utiliza un detector alfa de estado sólido. Un detector de estado sólido es un material semiconductor (usualmente silicio), que convierte la radiación alfa directamente en una señal eléctrica. Como se ha mencionado, el RAD7 puede distinguir inmediatamente el radón antiguo del radón nuevo, distinguir el radón del torón y distinguir una señal del ruido. Con este monitor continuo, se puede observar la variación de los niveles de radón, durante un período de la medición.



Figura 8. Equipo de medición de gas Radón, El RAD7 de la compañía DurrIDGE.

El RAD7 detecta rápidamente los niveles de radón con un tiempo de respuesta de 15 minutos, tanto ante aumentos repentinos como ante descensos bruscos de nivel. La celda interna para muestras del RAD7 es un hemisferio de 0.7 litros, recubierta internamente con un conductor eléctrico. En el centro del hemisferio, hay un detector de partículas alfa, de silicio, aplanado, de iones implantados, de estado sólido.

El campo eléctrico, que existe en el interior de la celda, impulsa este ion cargado positivamente hacia el detector, al cual se adhiere. Cuando el núcleo del polonio-218 (de corta vida) se desintegra sobre la superficie activa del detector, su partícula alfa tiene una probabilidad del 50% de entrar en el detector y de producir una señal eléctrica, con una fuerza proporcional a la energía de la partícula alfa.

El modo Torón hace que el RAD7 imprima las concentraciones de radón y torón (en pCi/L), en anotación cronológica continua de datos o en impresión subsiguiente de datos. El modo Torón también cambia la configuración automática de la bomba a operación continua, para garantizar una muestra nueva.

3.2.2. Sonda de suelo para gas de acero inoxidable.

Para obtener la muestra de gas del suelo se utilizó el accesorio del proveedor "DURRIDGE" "stainless steel soil gas probe". La sonda consiste en un tubo hueco de acero inoxidable que en su parte superior tiene una rosca NPT de 1/4" para colocar el manómetro y debajo una barra pesada con dos asas. La varilla de accionamiento que se desliza por el interior del tubo es de acero y tiene una taza pesada en la parte superior que limpia el interior del tubo hueco. La punta de la varilla de accionamiento sobresale más allá del extremo del tubo de sonda para poder limpiar el tubo hueco (Stainless Steel Soil Gas Probe, 2009). En la parte superior de la sonda debe estar instalado el manómetro así como una trampa de agua como se muestra en la figura 9.

Se realizaron distintas adaptaciones a la sonda, para el correcto funcionamiento del dispositivo en el suelo de Mexicali, ya que al llevar a cabo las mediciones, la sonda se llenaba de material que obstruía la libre circulación del gas; para realizar la limpieza de la sonda con estas condiciones el tiempo solía ser muy prolongado y con esto la demora en cada estación era excesiva, todo lo anterior, debido a que se debía de desenroscar la parte superior en cada nueva medición. Las adaptaciones efectuadas fueron en la parte baja de la sonda, a la cual se le hicieron cuatro perforaciones a los costados para que el gas fluyera con mayor facilidad, además la adaptación de un tapón con el cual la limpieza de la sonda pudo realizarse con facilidad y rapidez.



Figura 9. Vista de la sonda y el manómetro de succión.

También se suministra con la sonda una varilla de acero sólido piloto para hacer el agujero en el suelo para la sonda (figura 10).



Figura 10. Vista de la instalación en campo del equipo de medición de gas Radón.

3.2.3. Protocolo Torón

El protocolo Torón fue el modo en el que se realizaron las mediciones. Este procedimiento consiste en que el RAD7 imprima las concentraciones de radón y torón (en pCi/L) en anotación cronológica continua de datos o en impresión subsiguiente de datos. El modo Torón también cambia la configuración automática de la bomba a operación continua, para garantizar una muestra nueva. Este protocolo usa ciclos de 5 minutos e imprime tanto las concentraciones de radón y torón al final de cada ciclo. Sin embargo, ya que el torón tiene una vida media corta (un minuto) la bomba tiene que funcionar continuamente. Para el radón los dos primeros ciclos deben ser ignorados, hasta que la

lectura de radón alcanza el equilibrio. Posteriormente, se realizará una lectura cada cinco minutos.

3.3. Protocolo de medición

Las mediciones se realizaron para detectar el radón y torón presentes en una profundidad de 60 cm de la superficie del suelo (Ciotoli, et al. 1999, Bertolo, et. al. 2001, Cartagena, et. al. 2004, Iskandar, et. al. 2005, Prasad, et. al. 2008, Hasan, et al. 2011). Cada medición fue realizada en modo de protocolo Torón el cual realiza 4 lecturas de 5 minutos con una duración total de 20 minutos in situ por cada estación. Las primeras tres lecturas fueron despreciadas mientras que la cuarta lectura fue documentada. La cuarta lectura fue registrada, ya que en ese momento el radón en la cámara del RAD7 es el suficiente para un resultado confiable. Así se obtuvo un registro de torón y radón de cada estación.

La medición de cada estación se llevo de la misma forma. Tal procedimiento se describe a continuación:

1. PREPARACIÓN RAD7 EN CAMPO

Conectar la manguera con el filtro en el RAD7 en el espacio “INLET” (ver figura 11), el otro extremo en el tubo de secado, posterior al tubo de secado se conecta la manguera que va a la sonda.

Nota: Guardar los tapones amarillos para posteriormente colocarlos en el tubo nuevamente.

2. PURGA

La primera purga del día debe de ser de 10 minutos, las posteriores solo serán de 5 minutos.

Realizar la purga antes de conectar la sonda, pero con la unidad de secado conectada.

Nota: El mismo procedimiento se debe de seguir para las purgas de 5 minutos.

3. PROTOCOLO TORÓN

Con la impresora apagada, aún sin conectar la manguera a la sonda, poner el RAD7 en modo THORON

4. HUMEDAD RELATIVA

Ir a la ventana de estado, la humedad relativa dentro de la cámara debe ser igual o menor a 6%.

Detener la bomba cuando la humedad relativa llegue a 6% o menos. En caso que después de 2 ó 3 minutos no baje de 10%, seguir con el procedimiento.

5. SONDA.

Simultáneamente al realizar la purga es posible insertar la sonda en el punto en el cual se llevará a cabo la lectura.

- 1.- Enterrar la varilla guía más de 60 cm.
- 2.- Sacar la varilla.
- 3.- Introducir la sonda a una profundidad de 60 cm.
- 4.- Sellar entre la tierra y la sonda (para evitar cualquier filtración de aire del exterior).

6. INICIAR PRUEBA

Esperar a que se impriman los datos de inicio.

Se debe de cuidar que el manómetro siempre este en 0, ya que si marca algún vacío, se debe parar la prueba y limpiar la sonda. Entonces reanudar la prueba.

La prueba durará 20 minutos in situ. Se deben de realizar 4 períodos de 5 minutos.

Después de que se imprima la cuarta corrida, terminar la prueba.

7. RETIRAR LA SONDA

Retirar la sonda del suelo. Desconectar la manguera, solamente el extremo que está conectado a la sonda; esto es si se realizará otra medición de inmediato, para proseguir a purgar el equipo (RAD7).

8. LIMPIEZA DE LA SONDA

Al término de cada medición se debe de limpiar la sonda.

9. Retirar el tapón de la punta inferior e introducir la varilla de limpieza para retirar toda la tierra que se haya podido acumular durante la medición previa.

10. GPS

Ubicar las coordenadas del punto en el cual se tomará la medición.

11. DOCUMENTAR

Tomar fotos del lugar en el cual se tomará la medición, además de realizar el registro en cada una de las estaciones anotando información que se muestra en la tabla 2.

- Número de Estación
- Fecha
- Coordenadas
- Concentración Radón (cuarta lectura)
- Concentración Torón (cuarta lectura)
- Personas que realizaron la medición.

En cada punto se realizó el mismo procedimiento, el cual en forma resumida fue: 1.- Primera purga del día de 10 min, las siguientes son de 5 min. 2.- Protocolo thoron. 3.- Revisar humedad relativa $\leq 6\%$. 4.- Insertar la sonda en el punto de Medición. 5.- Medición de 4 periodos de 5 minutos. 6.- Retirar sonda. 7.- Limpieza de la sonda. 8.- Lectura del GPS. 9.- Documentación, fotos y anotaciones. La figura 12 presenta una imagen del sistema de medición.



Figura 11. Vista frontal del equipo y partes principales.

Tabla 2. Parámetros tomados y medidos durante el levantamiento de campo.

CONCENTRACIÓN						
PUNTO	FECHA	COORDENADAS		RADON (pCi/L)	THORON (pCi/L)	OPERADORES
		NORTE	ESTE			
G7R	22/03/12	3612530	645582	281	487	HUGO FAVELA JENIFER RAMIREZ
H8R	22/03/12	3614530	647582	47	109	
D9R	28/03/12	3606530	649582	23.1	217	
E9R	28/03/12	3608530	649582	69.6	400	
F7R	11/04/12	3610554.22	645649.3	71.2	653	FRANCISCO GOMEZ MARCELO LOMELI JENIFER RAMIREZ
F8R	11/04/12	3610515.92	647569.02	189	464	
F6R	11/04/12	3610531.58	643578.77	228	849	
E6R	11/04/12	3614593.00	641470.00	54.4	704	
E7R	11/04/12	3608527.75	645467.70	146	273	CARLOS SALAZAR HUGO FAVELA JENIFER RAMIREZ
H7R	13/04/12	3614502.80	645572.81	59.5	637	
H6R	13/04/12	3614546.10	643591.28	189	798	
H5R	13/04/12	3614593.36	641470.58	62.2	298	
H4R	13/04/12	3614566.00	639585.00	85	372	HUGO FAVELA JENIFER RAMIREZ
G4R	13/04/12	3612529.94	639578.07	8.6	135	



Figura 12. Instalación del equipo de medición en el campo.

3.4. Base de datos de mortalidad por cáncer

Para establecer los casos de muerte por cáncer pulmonar en la ciudad de Mexicali, se utilizó la base de datos de mortalidad por cáncer del sector salud (ISSESALUD, 2012) Esta base de datos abarcó un período de ocho años; esto es, del 2003 al 2011. La base de datos contenía múltiple información sobre los descensos por causa de cualquier tipo de cáncer. En este caso, el interés fue evaluar los casos de cáncer pulmonar, por lo cual se realizó un filtrado de la información para así poder manejar los datos necesarios para los objetivos del presente estudio.

La información requerida de la base de datos fue:

- Sexo: Masculino o Femenino
- Edad
- Domicilio
- Causa comprobada de fallecimiento

Lo importante de esta información filtrada fue ubicar los domicilios de las personas fallecidas por cáncer pulmonar. La tabla 3 presenta los porcentajes de muertes por cáncer pulmonar por cada año de la base de datos utilizada. Posteriormente con el programa Google Earth se procedió a ubicar los domicilios de los descensos por cáncer pulmonar y la obtención de las coordenadas geográficas para su posterior análisis geoestadístico y su correlación con los valores medidos de Radón. La figura 13 presenta la ubicación de todos los casos de cáncer pulmonar de la base de datos utilizada del periodo 2003-2011. El promedio anual en este periodo es de 95 casos de decesos por cáncer pulmonar.

Tabla 3. Casos de cáncer pulmonar de la ciudad de Mexicali, periodo 2003-2011.

AÑO	TOTAL MUERTES CÁNCER	TOTAL MUERTES CÁNCER PULMONAR	% CÁNCER PULMONAR
2003	622	96	15.43
2004	540	70	12.96
2005	623	103	16.53
2006	585	123	21.02
2007	691	93	13.45
2008	671	78	11.62
2009	711	101	14.2
2010	752	107	14.22
2011	376	84	22.43

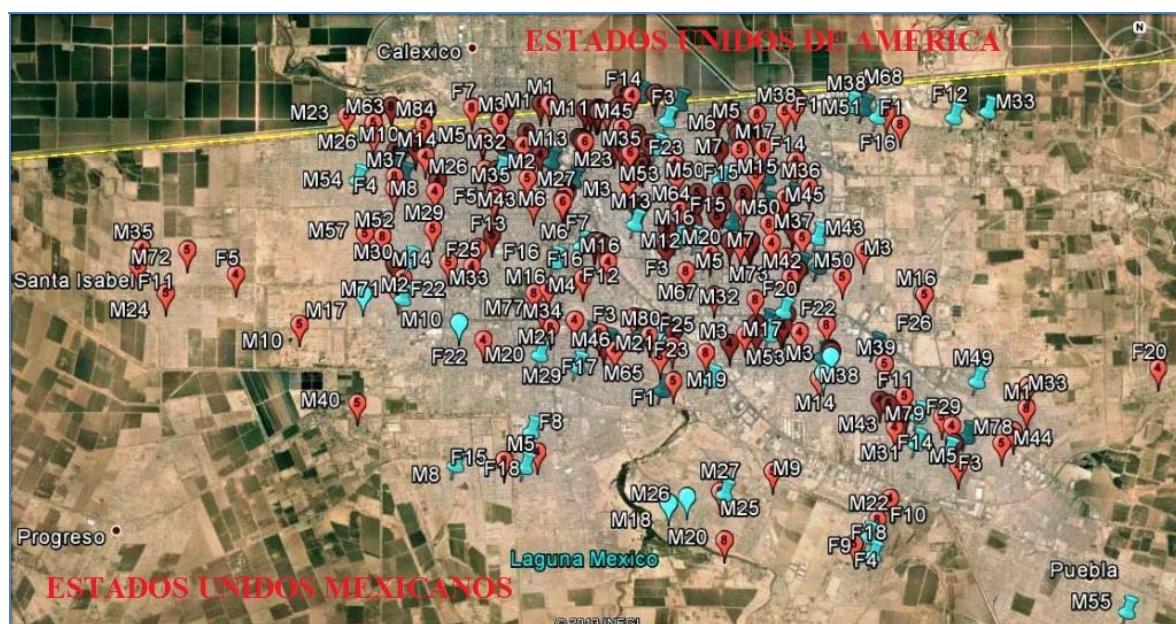


Figura 13. Ubicación de todos los casos de cáncer pulmonar de la base de datos utilizada del periodo 2003-2011

La información recabada se documento en una hoja de Excel. Anexando la información referente a las coordenadas. Un ejemplo del manejo de la información se presenta en la tabla 4.

Tabla 4. Ejemplo del manejo de información de la base de datos utilizada.

AÑO	PUNTO	LONGITUD	LATITUD	NOMBRE	SEXO	EDAD	DOMICILIO
2004	M1	653397.48	3608263.56	LUIS FRANCISCO	1	55	PASEO DE LAS GRANADAS #40
2004	M2	639265.87	3610974.22	MACEDONIO	1	70	AVE MÉDICOS 2580 COL UNIVERSITARIA
2004	M3	647010.99	3609823.45	BENJAMIN	1	79	CALLE 18 DE MARZO 210
2004	M4	642548.1	3610797.55	RAMON	1	79	LAGO PEIPUS 1215 JARDINES DEL LAGO
2004	M5	647216.92	3614784.79	ROSENDO	1	77	REP DEL SALVADOR 1002 FRACC SONORA
2004	F1	650457.66	3614605.6	SEVERA	2	77	AV. CORREGIDA SUR # 930 COL. CORREGIDORA
2004	F2	648060.12	3615130.06	JUANA	2	70	JAZMINES # 260 ALAMITOS
2004	F3	645658.04	3611228.11	MARIA ELVIA	2	79	CALLE MARIA #343 FRAC. RESIDENCIAS
2004	F4	639029.57	3612985	MARIA ENCARNACION	2	74	AV. ALCERREGA #2580 COL. ORIZABA
2004	F7	640761.32	3614829.63	GLORIA	2	43	CALLEJÓN AGUASCALIENTES # 1395

3.5. Representación gráfica

Para las representaciones gráficas se utilizó el programa SURFER 9 (Versión 9.9). Este software realiza mapas de datos tanto equidistantes como irregularmente espaciados, utilizando un sistema de cuadrícula de datos. Estos se representan en contornos (2-dimensiones) y en superficies en tercera dimensión.

Se interpolaron los valores recolectados tanto de radón como de torón con el método de kriging con la herramienta de análisis de variación espacial del programa SURFER (SURFER Versión 9.9). Este método de interpolación se escogió sobre el método IDW debido a que es óptimo para el tipo y cantidad de datos recabados.

3.6. Análisis estadístico

En el presente apartado se describe el tratamiento que se dio a los datos de concentración de gas radón y torón en suelo. También se explica el arreglo y tratamiento estadístico realizado a los datos de cáncer pulmonar de la población en la Cd. de Mexicali. En este análisis estadístico se explica como se realizó la estadística descriptiva de los datos de concentración de gas radón obtenidos, las gráficas de Sinclair y el análisis de correlación.

3.6.1. Estadística descriptiva

La estadística descriptiva se ejecuto sobre los datos de gas radón medidos en cada una de las estaciones. Los estadísticos utilizados para analizar el comportamiento de los datos son:

Moda (M_0): valor con una mayor frecuencia en una distribución de datos.

Mediana (M_e): valor que ocupa el lugar central de todos los datos cuando éstos están ordenados de menor a mayor. La mediana se obtuvo ordenando los datos de menor a mayor, así se delimito el número central de la serie.

Media: valor obtenido al sumar todos los datos y dividir el resultado entre el número total de datos. El símbolo de la media es \bar{x} .

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}$$

Error típico: puede definirse también como la variación producida por factores distorsionantes tanto conocidos como desconocidos. Estas variaciones a menudo son inevitables.

Desviación estándar: raíz cuadrada de la varianza, se representa por el símbolo σ .

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

Otros estadísticos usados fueron: el rango, el valor mínimo, el valor máximo, la sumatoria y el número de datos utilizados.

Estos datos estadísticos se obtuvieron del programa Microsoft Office Excel, con la herramienta de análisis de datos estadísticos que es parte de los complementos de este programa.

La herramienta de análisis estadística descriptiva genera un informe estadístico de una sola variable para los datos del rango de entrada, y proporciona información acerca de la tendencia central y dispersión de los datos.

Para poder utilizar la herramienta de análisis de datos es necesario especificar la referencia de celda correspondiente al rango de datos que se analizaron. Los datos contenían dos o más rangos adyacentes organizados en columnas o filas como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Datos de ejemplo utilizados en el análisis de datos de regresión y correlación.

POINT	RADON (pCi/L)
G7R	281
H8R	47
D9R	23.1
E9R	69.6
F7R	71.2
F8R	189
F6R	228
E6R	54.4
E7R	146
H7R	59.5
H6R	189

Finalmente la herramienta del programa arroja un resumen de resultados estadísticos con las variables mencionadas y que se resumen a continuación: Media, Error

típico (de la media), Mediana, Moda, Desviación estándar, Rango, Mínimo, Máximo, Suma, Cuenta, Número Mayor y Número Menor.

3.6.2. Gráfica de Sinclair

Las gráficas de Sinclair permiten identificar las poblaciones existentes en los datos colectados. Las poblaciones que se identifican en dicha gráfica son: población base, población normal y población anómala (Cartagena et al, 2004; Tennant and White, 1959). Para realizar la gráfica de Sinclair se utilizó el programa Grapher 6 (Grapher Versión 6.1) que permite apreciar el gráfico de una manera eficiente, ya que la identificación de las poblaciones existentes se realiza visualmente a partir de reconocer los puntos de inflexión de los datos graficados.

A continuación se describe el procedimiento utilizado para preparar los datos y poder llevar a cabo la gráfica de Sinclair:

1. En una hoja de Excel se situaron los datos de concentración de emanación de gas radón en suelo. Los datos se acomodaron de menor a mayor en una columna, y en otra columna se estimó la probabilidad acumulada, como se muestra en la tabla 6.
2. El primer valor de ambas columnas se despreja y el último valor de la probabilidad acumulada siempre debe de ser 1.
3. Ya que los datos están debidamente organizados se realiza la gráfica en el programa Grapher. Los datos que se deben de graficar son en las abscisas el \log_{10} de los datos de concentración de emanación de gas radón, mientras que en el eje de las ordenadas corresponde a los datos de la probabilidad acumulada.
4. Con la gráfica realizada se procedió a buscar los puntos de inflexión, posteriormente se identifican los valores en el eje de las abscisas para conocer los rangos de las poblaciones.
5. Los puntos de inflexión de los datos de concentración de emanación de gas radón frente a la probabilidad acumulada permite identificar tres tipos distintos de población.

Tabla 6. Datos de ejemplo utilizados para realizar la gráfica de Sinclair.

CONC. ²²⁰ Rn	PROB. ACUMULADA
3.57	0.007407407
4.3	0.014814815
6.72	0.022222222
7.91	0.02962963
8.6	0.037037037
9.6	0.044444444
9.76	0.051851852
10.7	0.059259259
11.2	0.066666667
12.6	0.074074074
12.9	0.081481481
18.3	0.088888889
18.6	0.096296296
19.4	0.103703704
20.6	0.111111111
20.8	0.118518519
23.1	0.125925926
23.1	0.133333333
23.6	0.140740741

6. Finalmente con la herramienta de análisis de datos estadística descriptiva de Microsoft Office Excel, se aplica a cada rango de datos de cada una de las poblaciones resultantes, para obtener un resumen de estadísticas con cada una de las siguientes variables estadísticas: Media, Error típico (de la media), Mediana, Moda, Desviación estándar, Rango, Mínimo, Máximo, Suma, Cuenta, Mayor (#), Menor (#).

3.6.3. Análisis de correlación

Para realizar nuestro análisis de correlación se utilizaron los siguientes programas: ArgGis 9 (Versión 9.3), SURFER 6 (Versión 6.1) y Microsoft Office Excel.

La actividad con la que se inicio fue en el mapa de AGEBS (Área Geoestadística Básica) del municipio de Mexicali, auxiliados por el programa ArcGis 9 (versión 9.3) se identificaron y situaron los puntos medios de cada uno de los Agebs existentes en el municipio.

En el mapa de contorno de las concentraciones de emanación de gas radón realizado en el programa SURFER 6 se marcaron las isolineas que delimitaban cada población obtenida de la gráfica de Sincalir.

Posteriormente se sobrepusieron en el programa SURFER, el mapa de AGEBS con los puntos medios (identificado y marcado) de cada Ageb, y el mapa de concentración de emanación de gas radón. Con lo cual se consiguió determinar visualmente la concentración de emanación de gas radón en cada punto medio de cada AGEB. Esto es, la concentración del Radón en cada Ageb se estipuló identificando el valor de la isolínea que cruzaba por el punto medio de cada ageb. Un ejemplo de los valores obtenidos se presenta en la tabla 7.

Tabla 7. Valores de radón. Un ejemplo de valores obtenidos en el punto medio de cada AGEB.

AGEB	²²⁰Rn_P.MEDIO pCi/l
4242	170
031A	186
4420	146
501A	148
4613	140
269	128
95	122
017A	172
4308	42
339	158
2778	78
555	140
4238	108
063A	132

El siguiente paso fue realizar en el programa ArcGis el mapa de los casos de fallecimientos por causa de cáncer pulmonar. Una vez obtenido este mapa se procedió a realizar la trasposición del mapa de Agebs y el mapa de los casos de descensos por cáncer pulmonar del municipio de Mexicali. El objetivo de esto fue identificar el número de fallecimientos por cáncer pulmonar que existen en cada ageb. De este modo, el procedimiento consistió en localizar los fallecimientos y relacionarlo con el Ageb correspondiente. Esto se documento debidamente como se muestra en la tabla 8.

En la actividad siguiente se procedió a normalizar los datos, para esto la información que se necesita conocer es la población total que existe en cada Ageb, además de tener los números de muertes por cáncer pulmonar en cada Ageb identificados.

El procedimiento consistió en dividir el número de casos de fallecimiento por causa de cáncer pulmonar sobre el número de población total esto multiplicado por 10,000 para escalar los datos.

$$\left(\frac{\text{\# de muertes de cáncer pulmonar por ageb}}{\text{población total por ageb}} \right) * 10\ 000$$

Los resultados se plasmaron como se muestra en la tabla 9.

Tabla 8. Datos de ejemplo de las muertes de cáncer pulmonar para cada AGEB.

MUERTES CÁNCER PULMONAR	AGEB
21	4242
12	031A
10	4420
9	501A
9	4613
9	269
9	95
8	017A
8	4308
8	339
8	2778
7	555
7	4238
7	063A

Con el programa Microsoft Office Excel y su herramienta de análisis de datos se realizó la regresión lineal. Este modelo de regresión puede ser expresado como:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \epsilon$$

Y_i : Variable dependiente

Tabla 9. Datos de ejemplo utilizados para realizar el análisis de correlación

AGEB	# MUERTES CÁNCER PULMONAR AGE B	POBLACIÓN TOTAL AGE B	POBLACIÓN NORMALIZADA
4242	21	1015	206.89
031A	12	1269	94.55
4420	10	1769	56.52
501A	9	1225	73.47
4613	9	1597	56.36
269	9	2073	43.41
95	9	3492	25.77
017A	8	1701	47.02
339	8	3058	26.15
2778	8	3077	26
4308	8	2517	31.78
555	7	1364	51.31
063A	7	2445	28.62
4238	7	2433	28.77

La herramienta de análisis de datos - regresión efectúa el análisis de regresión lineal utilizando el método de "mínimos cuadrados" para ajustar una línea a un conjunto de observaciones. Los datos de entrada se acomodan de la siguiente manera:

1. Los valores en eje "y" corresponde a los casos de cáncer pulmonar por población normalizada. Para fines de facilidad estos valores se presentan en una única columna de datos.

2. Los valores en eje "x" son los datos correspondientes al rango de datos independientes, esto es los valores de radón en cada punto medio del Ageb.

La tabla de resultados debe incluir: el coeficiente de correlación múltiple, el coeficiente de determinación o correlación R^2 , el coeficiente R^2 ajustado, el error típico y el número de observaciones.

4. Resultados y discusiones

Este capítulo presenta la descripción de los datos medidos de Radón y Torón y su distribución espacial en la ciudad de Mexicali, resaltándose los rasgos anómalos relacionados a las concentraciones altas medidas en diferentes puntos de la ciudad. Se presentan los casos de cáncer pulmonar y como estos se distribuyen en la ciudad. Para su mejor apreciación toda la información generada se representa en forma gráfica, esto es, en mapas de contornos realizados con programas especializados. En este caso, se usaron tanto el SURFER como el ARCGIS, que además manejan entre sus opciones de procesamiento el análisis geoestadístico de datos. Finalmente, se presenta este análisis estadístico donde se discuten los gráficos de Sinclair y la correlación entre los datos de Radón y las muertes por cáncer pulmonar.

4.1. Radón

La figura 14 muestra el mapa de contornos, en tonos de color, de la concentración de gas radón emanado del suelo. Este mapa incluye las mediciones de las 135 estaciones documentadas durante la etapa de trabajo de campo. En esta figura se puede observar que la estación con mayor concentración de gas radón tiene un valor de 326 pCi/l, así también se registró la estación con menor concentración de gas radón con un valor de 3.57 pCi/l. Estas estaciones se localizan hacia la parte Sur-Sureste del área de estudio. También se aprecian varios picos máximos (> 200 pCi/L, tonos rosáceos a blancos) distribuidos en la zona de estudio. Una de estas alineaciones de valores máximos (zona III y V) tiene una orientación NW-SE. Esta orientación NW-SE es paralela al sistema de fallas geológicas de rumbo que dominan la tectónica de la región. Algunos de los valores máximos, por ejemplo el valor de 296 pCi/L, coincide con las fallas tectónicas que atraviesan la zona de estudio, es decir, la proyección de la denominada Falla Michoacán (valor de 296 pCi/l) y la Falla Imperial hacia el Este (valor de 200 pCi/L). Aunque esta última falla, en su proyección hacia el SE no presenta valores muy altos (valores alrededor de 50 pCi/l). Estas dos fallas, convergen hacia el sur-sureste con la conocida zona geotérmica de Cerro Prieto. De este modo, aunque el presente trabajo es a escala regional se puede observar cierta relación entre valores altos

de Radón con la evidencia superficial de fallas geológicas. Para mayor detalle hay necesidad de realizar lecturas a escala local alrededor de estas anomalías máximas.

La zona de valores altos de Radón hacia la parte central del área de estudio, coincide con la zona con una densidad de población mayor. De este análisis cualitativo de datos se prevé que debe existir un efecto negativo en la salud (en este caso, cáncer pulmonar) para la población de la ciudad. Esto se volverá a analizar y discutir posteriormente con los análisis estadísticos realizados.

En la figura 14 se identificaron diferentes zonas con valores relativamente altos y/o bajos de Radón. De este modo, se establecieron ocho grandes zonas. Las zonas I, III y V como las zonas de altas concentraciones de gas radón, mientras que las zonas II, IV y VI se identificaron como zonas con concentraciones bajas de gas radón. Las zonas de valores altos pueden ser de riesgo para la salud si se considera que el valor de riesgo es de 4 pCi/L (EPA 2012), aunque también la mayoría de las estaciones medidas fueron mayores a este valor. Se resalta el hecho que este valor de referencia es de riesgo en interiores de casas y en USA, cuando la EPA (2012) detecta concentraciones superiores a este valor, emite una recomendación a los habitantes de reparar sus casas para evitar la entrada de radón al interior. Para exteriores varios autores han señalado que existen valores altos. Al-shereideh, et. al. (2006) encontró como valor máximo 35.5 KBq/m^3 (959.45 pCi/l) en la zona de Deir Abu-Said District, Irbid – Jordan. Otros autores han mencionado valores superiores a 53.76 KBq/m^3 ($1,452 \text{ pCi/l}$) considerándolos valores anómalos altos (Chen et. al. 2008, Iskandar et. al 2005, Chung et al 1998, Segovia et al 1995, Azimi-Garakani 1988).

Al realizar una relación de la población por manzanas en la zona urbana de Mexicali que se encuentra influenciada o cercana a alguna estación con una concentración mayor de 40 pCi/l se encontró que 439,455 habitantes están en esta zona y con el riesgo asociado de estar expuestos a altas concentraciones.

Entre otros datos encontramos que las escuelas (Preescolar, primaria, secundaria, medio superior, superior, técnicas, institutos, etc.) son muebles sobre los que debemos poner especial atención. El recuento de estos inmuebles en el área cubierta en este estudio es: en las zonas I y II se encuentran situadas 78 edificaciones, en la zona III se localizaron 364 escuelas, en la zona IV y VI están localizadas 93 escuelas y finalmente en la zona V están localizadas 15 escuelas. Se resalta que la zona III es la que mayor número de escuelas tiene y desgraciadamente una de las zonas que presenta las concentraciones de radón más elevadas.

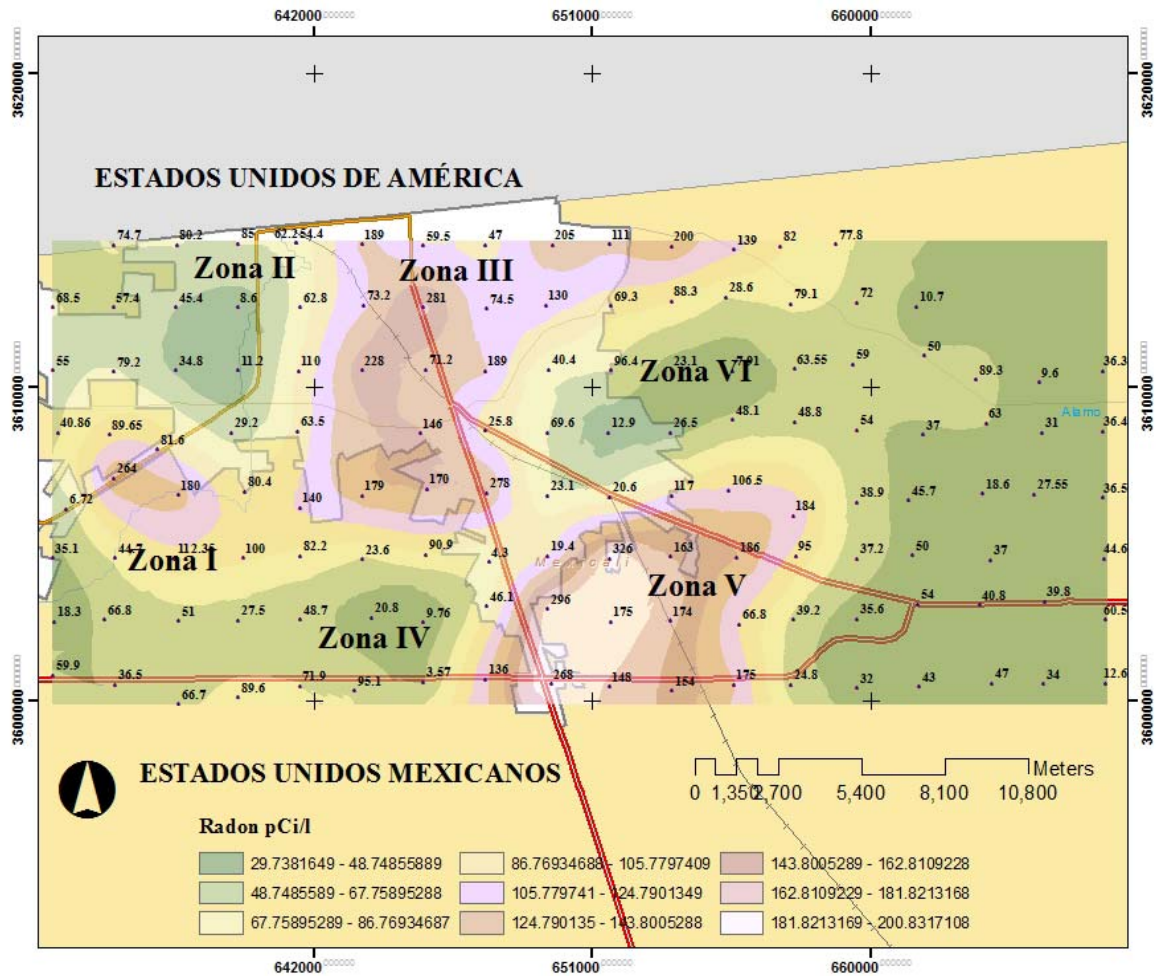


Figura 14. Mapa de concentración de gas radón (pCi/l) emanado de suelo de Mexicali.

4.2. Torón

En el figura 15 se reportan las concentraciones de gas torón las cuales se documentaron con un valor máximo de 1,060 pCi/l y un valor mínimo de 1.9 pCi/l. En esta figura se identificaron cuatro zonas, siendo tres de ellas de concentraciones altas de gas torón (>500 pCi/l). Esto es, las zonas I, II y III cuentan con altas concentraciones (>500 pCi/l), mientras que la zona IV es de bajas concentraciones (<500 pCi/l). En el caso del torón no se ha registrado un valor de referencia para riesgo a la salud. Yamada et al (2006) han considerado que el torón juega un papel muy importante en la evaluación de riesgo para la salud.

Se aprecia una alineación NW-SE de las zonas de concentraciones altas (I, II y III) que coincide con la alineación regional de fallas geológicas, como se había mencionado para el radón. Es decir esta orientación NW-SE es paralela al sistema de fallas geológicas de rumbo que dominan la tectónica de la región. Estas fallas tectónicas que atraviesan la zona de estudio son la Falla Imperial al Este y la proyección de la denominada Falla Michoacán al Oeste, cuya proyección hacia el sur es hacia la ciudad de Mexicali y podría ser la causa de esta alineación de concentraciones máximas.

En nuestro caso, el gas torón (^{220}Rn) se midió con el objetivo de discernir sobre la fuente de origen de estos gases radiactivos. Se considera que entre mayor sea la concentración de gas torón (^{220}Rn), la fuente de origen de ambos gases (radón y torón) se encontrara más cercano a la superficie. Esto se da por el hecho de que la vida media del torón es muy corta (55 segundos). En consecuencia el gas radón se transporta con gran velocidad desde su origen. Etiope y Martinelli (2002) presentan una revisión de los mecanismos de transporte de los gases. Estos autores mencionan que Brown (2000) ha asociado velocidades muy altas para el transporte de gases de hasta 7 km/día debido a un mecanismo de burbujas a través de fracturas.

En este trabajo de investigación no se abordó esta temática del origen y mecanismos de flujo y transporte del radón, sin embargo estará considerando para futuras investigaciones. De ahí la importancia de tener ya una base de datos del torón que puede

ayudar a discernir sobre este tema.

4.3. Salud

La figura 16 presenta el mapa de los descensos por consecuencia de cáncer pulmonar distribuidos por Ageb. Al llevar a cabo el análisis de las muertes por cáncer pulmonar en cada ageb se encontró que existen distintos agebs en los que se localizaron más de un fallecimiento. En el ageb en el que más fallecimientos se localizaron fue el ageb 4242 con un total de 21 fallecimientos, seguido de los agebs 031A con 10 descensos y 4420 con 9 fallecimientos. Se encontró que en 179 Agebs existe algún caso de fallecimiento de casos de cáncer.

También en esta figura se muestra la superposición entre: los fallecimientos por consecuencias de cáncer pulmonar, los agebs y el mapa de contornos de emanación de gas radón. A simple vista se puede apreciar que una gran cantidad de los descensos son en las zonas en las cuales las concentraciones de emanación de gas radón son altas. Así la zona III es la que presenta el mayor número de casos de fallecimiento por cáncer pulmonar. Por otro lado, la zona IV que presenta pocos casos de muertes por cáncer, representa la zona con menor densidad poblacional, aunque focos rojos deben prenderse ya que esta zona de la ciudad ha crecido a un ritmo acelerado. Es de resaltar que las autoridades deben tomar las medidas preventivas adecuadas para disminuir o evitar el riesgo por la emanación de gas radón.

De este modo, con el simple análisis visual se puede apreciar el riesgo que existe en la ciudad de Mexicali por las emanaciones de Radón del suelo. En un gran número de estudios se ha encontrado esta relación. Hasta la fecha, este trabajo representa el primer esfuerzo por medir las concentraciones de gas Radón emanados del suelo. Aunque la entrada de gas Radón al interior de los domicilios depende de las características constructivas de las viviendas y no hay un valor fijo, se ha establecido que el 60.4% de radón en el interior de los domicilios proviene del suelo (Ren, 2001)

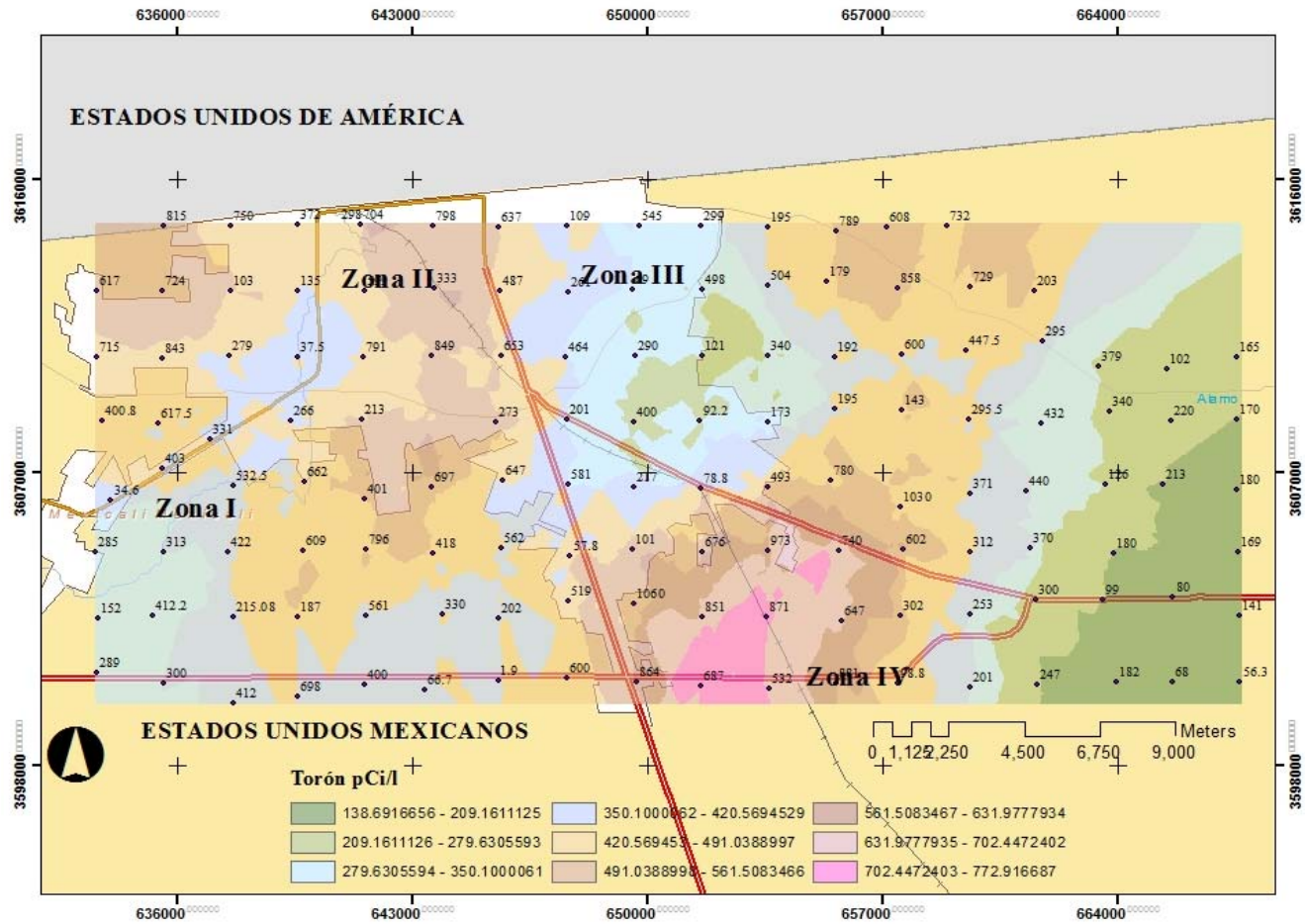


Figura 15. Mapa de concentración de gas torón (pCi/l) emanado de suelo de Mexicali.

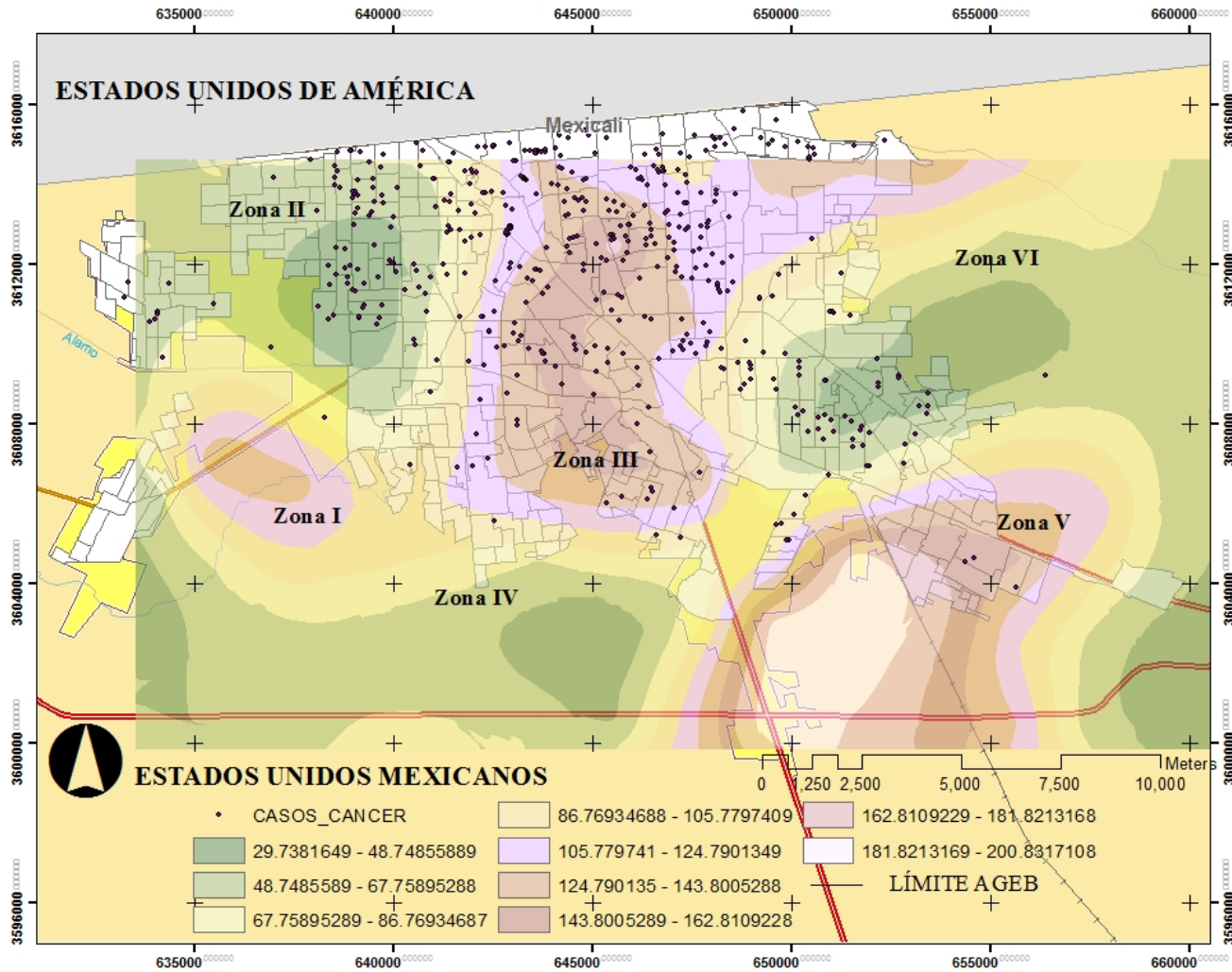


Figura 16. Mapa de los descensos por consecuencia de cáncer pulmonar distribuidos por Ageb.

4.4. Análisis estadístico

En este apartado se muestran los resultados del análisis de datos estadístico realizado. Para su mejor análisis se ha separado en tres partes: 1.- la estadística descriptiva, 2.- análisis de Sinclair y 3.- análisis de correlación.

4.4.1. Estadística descriptiva

En la tabla 10 se despliegan los resultados de la estadística descriptiva aplicada a los datos de concentración de emanación de gas radón. El promedio encontrado en las estaciones medidas es de 80.81 pCi/l con una desviación estándar de 67.50, lo que muestra la gran dispersión en los datos. Esto se comprueba con los valores máximos y mínimos medidos de 326 y 3.57 pCi/l, respectivamente. El valor con mayor frecuencia (la moda) es de 47 pCi/l, aunque la mediana (valor central) es de 60.5 pCi/l.

Así las mediciones con mayor frecuencia o sea la moda, con una concentración mayor a 47 pCi/l se orientan en la dirección NW-SE (ver fig 14). Como se ha mencionado, esta orientación NW-SE es paralela al sistema de fallas geológicas de rumbo que dominan la tectónica de la región y su proyección hacia la parte central de la zona de estudio y la ciudad es la denominada Falla Michoacán.

Tabla 10. Valores estadísticos obtenidos de los datos de radón.

RADON (pCi/L)	
Media	80.81718519
Error típico	5.809267613
Mediana	60.5
Moda	47
Desviación estándar	67.49759016
Rango	322.43
Mínimo	3.57
Máximo	326
Suma	10910.32
Cuenta	135

Para conocer el número de apariciones de un valor en un conjunto de datos, se realizó los histogramas de radón (tabla 11 y figura 17) y de torón (tabla 12 y figura 18). Como es conocido, un histograma presenta las frecuencias individuales y acumulativas de rangos de celdas de datos y de clases de datos.

Histograma Radón

En el histograma de radón (fig. 17) se aprecia claramente que el rango de entre 30 pCi/l a 60 pCi/l es el más frecuente con un total de 41 valores, lo que representa el 30.33%, mientras que los rangos que van entre 210 pCi/l a 240 pCi/l y 300pCi/l a 330 pCi/l se encuentran una sola incidencia. También se observa que más del 70% de la frecuencia se encuentra acumulada en tan solo tres rangos, esto es los valores de 0 a 90 pCi/L representan un porcentaje alto de frecuencias en la toma de datos y valores medidos.

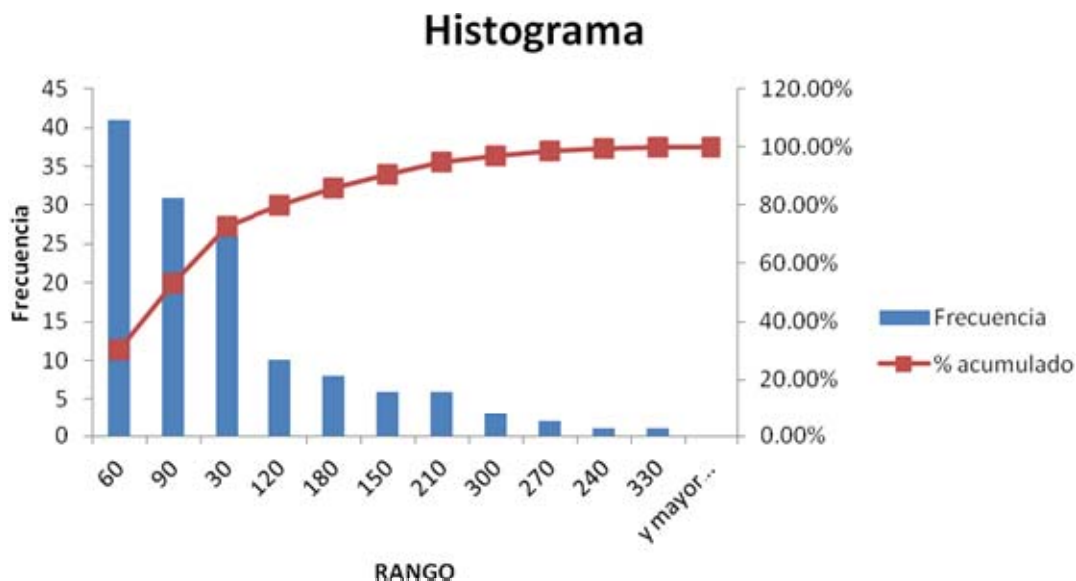


Figura 17. Histograma obtenido de los datos de radón.

Tabla 11. Distribuciones de frecuencia obtenida de los datos de radón.

Orden ascendente en rango			Orden ascendente en frecuencia		
Rango	Frecuencia	% acumulado	Rango	Frecuencia	% acumulado
0 - 30	26	19.26%	30 - 60	41	30.37%
30 - 60	41	49.63%	60 - 90	31	53.33%
60 - 90	31	72.59%	0 - 30	26	72.59%
90 - 120	10	80.00%	90 - 120	10	80.00%
120 - 150	6	84.44%	150 - 180	8	85.93%
150 - 180	8	90.37%	120 - 150	6	90.37%
180 - 210	6	94.81%	180 - 210	6	94.81%
210 - 240	1	95.56%	270 - 300	3	97.04%
240 - 270	2	97.04%	240 - 270	2	98.52%
270 - 300	3	99.26%	210 - 240	1	99.26%
300 - 330	1	100.00%	300 - 330	1	100.00%

Histograma Torón

El histograma del torón (fig. 18), se observa que el rango con mayor recurrencia es aquel entre 240 pCi/l a 300 pCi/l con una frecuencia de 15 lo cual representa el 11.11%, mientras tanto el rango que va desde 900 pCi/l hasta 960 pCi/l no cuenta con ninguna incidencia. Se puede distinguir que los datos de torón tienen una distribución más equilibrada, ya que el 70% está acumulado en nueve rangos.

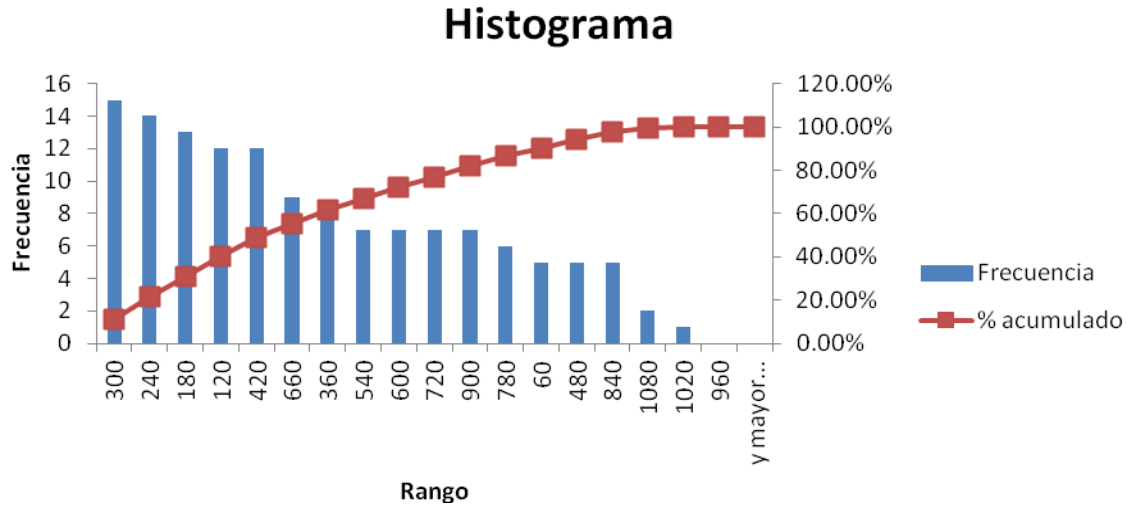


Figura 18. Histograma obtenido de los datos de torón.

Tabla 12. Distribuciones de frecuencia obtenida de los datos de torón.

Orden ascendente en rango			Orden ascendente en frecuencia		
Rango	Frecuencia	Rango	Frecuencia	Rango	Frecuencia
0 - 60	5	3.70%	240 - 300	15	11.11%
60 - 120	12	12.59%	180 - 240	14	21.48%
120 - 180	13	22.22%	120 - 180	13	31.11%
180 - 240	14	32.59%	60 - 120	12	40.00%
240 - 300	15	43.70%	360 - 420	12	48.89%
300 - 360	8	49.63%	600 - 660	9	55.56%
360 - 420	12	58.52%	300 - 360	8	61.48%
420 - 480	5	62.22%	480 - 540	7	66.67%
480 - 540	7	67.41%	540 - 600	7	71.85%
540 - 600	7	72.59%	660 - 720	7	77.04%
600 - 660	9	79.26%	840 - 900	7	82.22%
660 - 720	7	84.44%	720 - 780	6	86.67%
720 - 780	6	88.89%	0 - 60	5	90.37%
780 - 840	5	92.59%	420 - 480	5	94.07%
840 - 900	7	97.78%	780 - 840	5	97.78%
900 - 960	0	97.78%	1020 - 1080	2	99.26%
960 - 1020	1	98.52%	960 - 1020	1	100.00%
1020 - 1080	2	100.00%	900 - 960	0	100.00%

4.4.2. Gráficas de Sinclair

Como se mencionó en el apartado 3.6.2, las gráficas de Sinclair identifican las poblaciones existentes en los datos de concentración de gas radón a partir de graficar la probabilidad acumulada en “Y” contra el LOG10. Estas poblaciones se dividen en: población base, población normal y población anómala.

La figura 19 muestra la gráfica de Sinclair, la cual presenta las 3 poblaciones en los datos. Estas diferentes poblaciones están delimitadas por los puntos de inflexión en la tendencia de los datos. Se observa claramente la ubicación de los puntos de inflexión, lo que permite establecer las 3 distintas poblaciones. De este modo, los rangos de cada población se localizan al proyectar los puntos de inflexión con el valor que intercepta al eje “Y” (probabilidad acumulada), con este valor se buscó en la tabla de datos el valor que corresponda a la concentración de radón. Estos valores se presentan en la tabla 13, los que definen las 3 poblaciones.

La gráfica de Sinclair ha sido utilizada en distintos estudios. Por mencionar alguno, Cartagena et. al (2004) en una investigación realizada en el volcán de San Miguel (El Salvador) determinaron las poblaciones de gas radón y torón en un estudio sobre la desgasificación difusa en suelo para entender el flujo de gases en el volcán y el estado de la actividad volcánica.

La definición de estas familias permite establecer que conjuntos de datos tienen los valores de “background” (población base), los valores medios (población normal) y los valores altos (población anómala).

RADÓN pCi/l

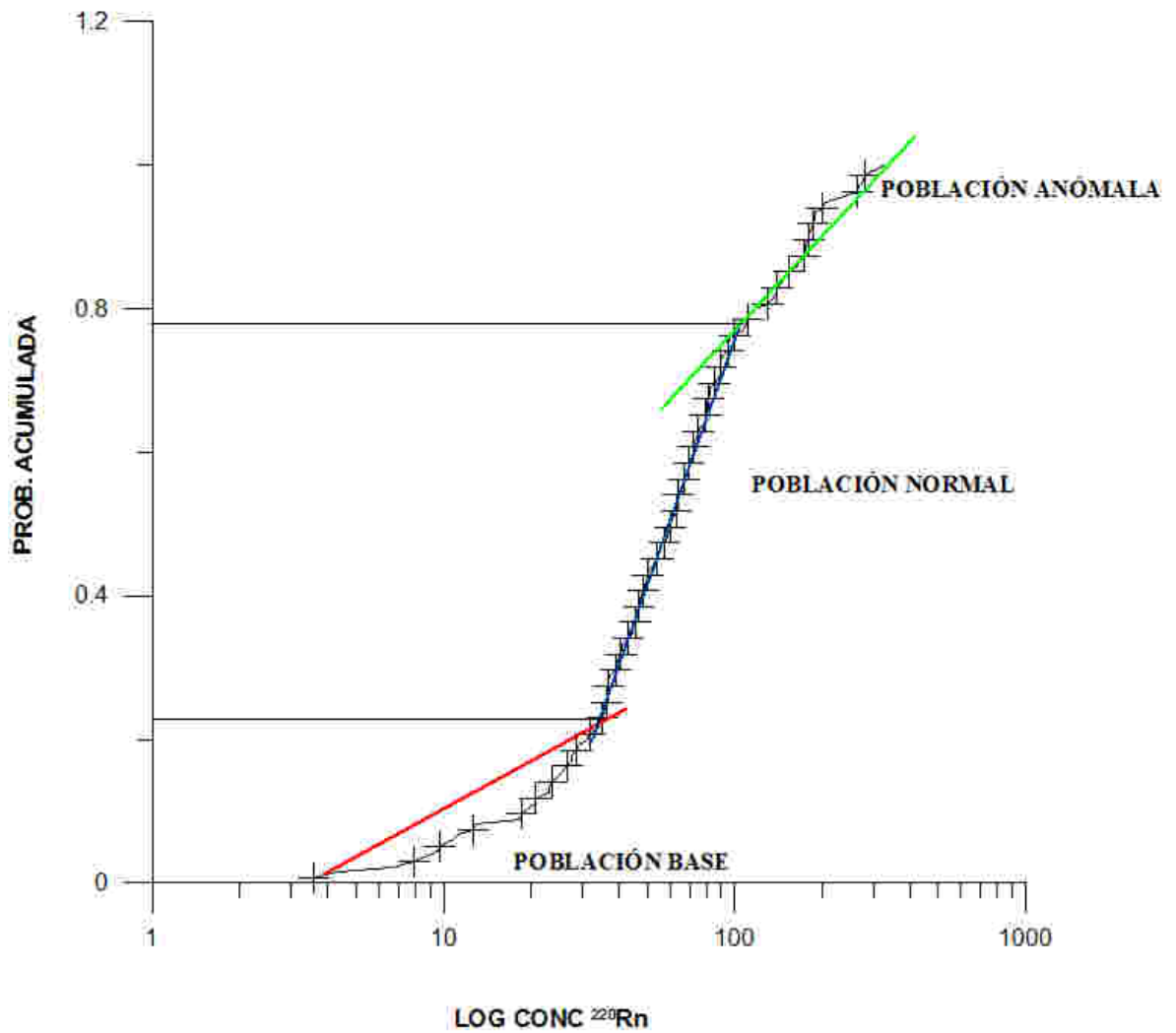


Figura 19. Gráfica de Sinclair con las tres poblaciones identificadas en los datos de radón.

El valor mayor de la población base (36.3 pCi/l) coincide aproximadamente con las observaciones realizadas al mapa de radón donde parece ser que el valor de 40 pCi/l coincide con el inicio de la zona con concentraciones medias y altas.

Tabla 13. Rangos de concentración de gas radón en las tres poblaciones obtenidas del gráfico de Sinclair.

TIPO DE POBLACIÓN	RANGO CONC (²²⁰ Rn pCi/l)
POBLACIÓN BASE	0 - 35.6
POBLACIÓN NORMAL	35.6 - 100
POBLACIÓN ANÓMALA	100-326

De las tablas 14 a 16 se presentan la estadística descriptiva de cada población:

POBLACIÓN BASE (tabla 14). El promedio encontrado en las estaciones medidas es de 19.93 pCi/l con una desviación estándar de 10.32. Los valores máximos y mínimos son de 0 y 35.6 pCi/l, respectivamente. El valor con mayor frecuencia (la moda) es de 23.1 pCi/l, mientras que la mediana (valor central) es de 20.8 pCi/l. Cabe resaltar que aunque esta población se considera como valor de fondo (background), el promedio de esta población es alto de acuerdo a las recomendaciones de la EPA (2012). Es importante señalar que esta recomendación de la EPA es para valores medidos en interiores de casas.

Tabla 14. Estadística descriptiva de la población base.

POBLACIÓN BASE	
Media	19.93363636
Error típico	1.79737713
Mediana	20.8
Moda	23.1
Desviación estándar	10.32514553
Rango	35.6
Mínimo	0
Máximo	35.6
Suma	657.81
Cuenta	33

POBLACIÓN NORMAL (tabla 15). El promedio encontrado en las estaciones medidas es de 61.87 pCi/l con una desviación estándar de 18.37. Los valores máximos y mínimos son de 36.3 y 60.5 pCi/l, respectivamente. El valor con mayor frecuencia (la moda) es de 36.5 pCi/l, mientras que la mediana (valor central) es de 60.5 pCi/l. Los valores en esta población ya están muy por encima de los valores recomendados por la EPA (2012), aunque esta recomendación es para valores medidos en interiores de casas.

Tabla 15. Estadística descriptiva de la población normal.

POBLACIÓN NORMAL	
Media	61.8684507
Error típico	2.180044668
Mediana	60.5
Moda	36.5
Desviación estándar	18.36938288
Rango	63.7
Mínimo	36.3
Máximo	100
Suma	4392.66
Cuenta	71

POBLACIÓN ANÓMALA. El promedio encontrado en las estaciones medidas es de 183.12 pCi/l con una desviación estándar de 58.82. Los valores máximos y mínimos son de 326 y 106.5 pCi/l, respectivamente. El valor con mayor frecuencia (la moda) es de 175 pCi/l, mientras que la mediana (valor central) es de 175 pCi/l, en este caso coinciden. Los valores en esta población se pueden considerar anómalamente altos sobre todo si se considera el valor recomendado por la EPA (2012), aunque es para valores medidos en interiores de casas.

Tabla 16. Estadística descriptiva de la población anómala.

POBLACIÓN ANÓMALA	
Media	183.1203125
Error típico	10.39861815
Mediana	175
Moda	175
Desviación estándar	58.82346725
Rango	219.5
Mínimo	106.5
Máximo	326
Suma	5859.85
Cuenta	32

4.4.3. Análisis de correlación

En la figura 20 se muestra el mapa de puntos medios en cada Ageb: Estos puntos medios fueron el inicio para obtener en estos, los valores de concentración de gas radón y torón. Las concentraciones de radón y torón se dan en la tabla 17. En esta también se presentan los casos de cáncer pulmonar por cada Ageb normalizados de acuerdo al procedimiento que se mostró en el apartado 3.6.3. A partir de esta tabla se procedió a realizar el análisis de correlación con el objetivo de conocer si la emanación de gas radón tiene relación directa con los fallecimientos a causa de cáncer pulmonar. De este modo, se aplicó la regresión lineal a los datos. Los resultados se muestran en las tablas 18 y 19 para radón y tablas 20 y 21 para torón.

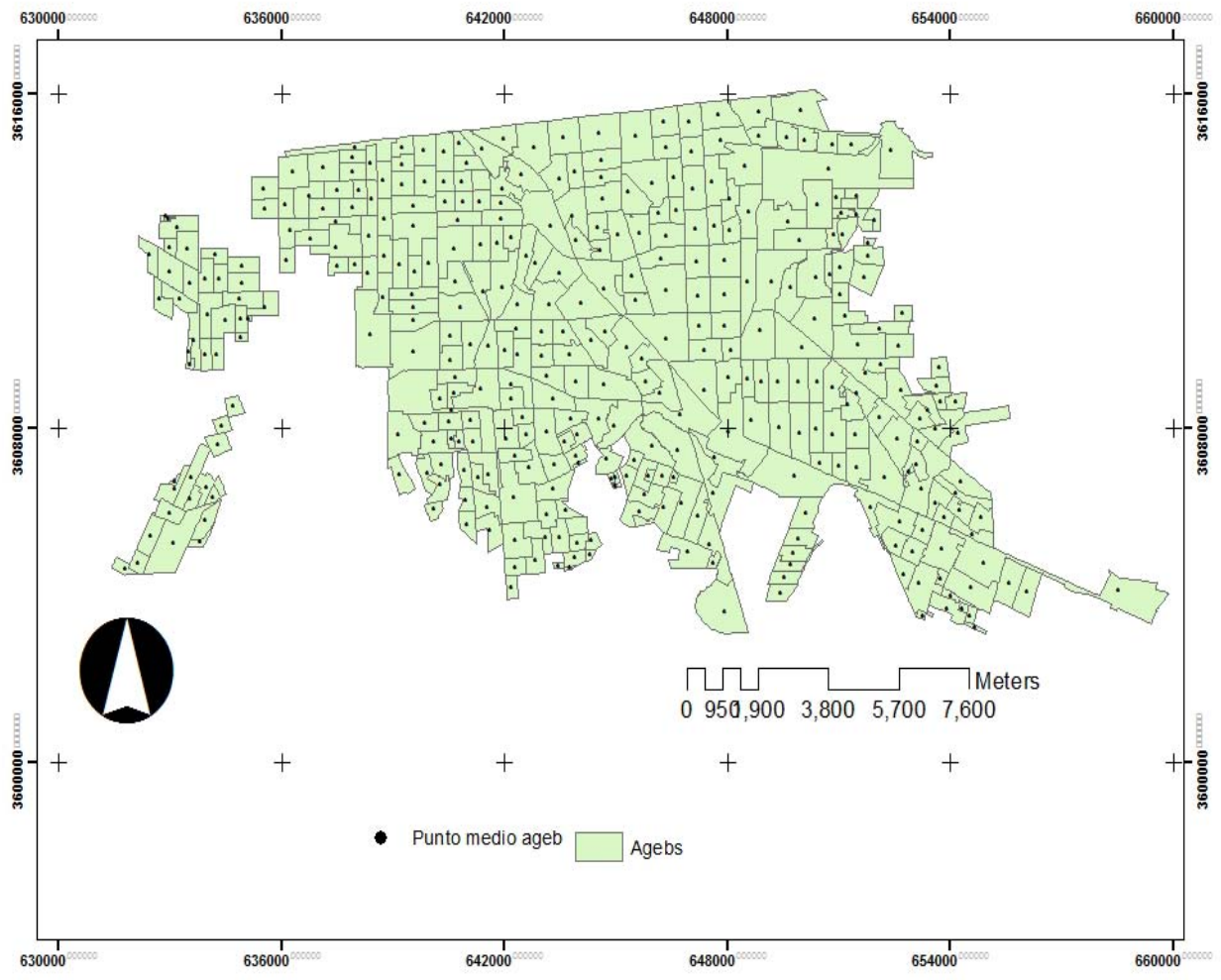


Figura 20. Mapa de puntos medios en cada AGEB.

Tabla 17. Valores de radón y torón en los puntos medios de cada AGEB.

AGEB	Población normalizada	²²² Rn en puntos medios	²²⁰ Rn en puntos medios
4242	206.89	170	750
031A	94.55	186	440
4420	56.52	146	640
501A	73.47	148	650
4613	56.36	140	560
269	43.41	128	710
95	25.77	122	250
017A	47.02	172	480
339	26.15	158	140
2778	26	78	560
4308	31.78	48	210
555	51.31	140	600
063A	28.62	132	410
4238	28.77	108	400
184	15.64	104	310
377	26.9	66	250
362	18.76	34	270
444A	27.87	130	400
4596	32.22	38	340
2513	21.04	26	160
4219	27.75	160	330
4539	30.69	142	330
2759	17.01	134	550
540	10.53	110	750
4897	25.85	96	190
298A	71.12	76	360
2886	15.13	74	340
437A	54.34	36	365
574	12.4	30	590

AGEB	CAN_POB	²²⁰ Rn_P. MEDIOS	²²² Rn_P.MEDIOS
4558	10.42	200	430
451A	26.98	116	270
2829	19.12	114	760
610	15.97	110	490
273A	19.3	90	100
409	6.61	92	170
2388	8.85	70	500
6200	17.23	66	140
280A	20.12	64	390
4736	17.8	64	110
5560	13.03	60	800
6747	13.18	26	60
4280	8.8	26	230
4435	12.18	22	510
5749	21.65	196	440
5151	19.95	194	400
4632	14.06	188	570
4577	15.77	176	450
4492	20.75	166	485
4562	18.69	166	610
4647	24.38	156	460
4416	14.65	156	590
2725	17.18	150	630
2439	8.93	146	480
4488	18.77	144	600
4331	10.72	140	270
4702	15.39	90	490
5804	25.68	80	740
2532	9.32	74	150
2744	9.81	68	690

AGEB	CAN_POB	²²⁰ Rn_P. MEDIOS	²²² Rn_P.MEDIOS
4350	11.14	66	420
2320	8.76	60	300
288	5.3	60	80
4261	9.53	56	480
4473	14.32	36	160
4346	11.14	34	200
615A	7.17	26	80
2496	11.25	190	540
2763	4.73	175	620
2299	7.26	168	610
241A	39.68	156	330
663	5.07	156	560
4755	13.43	150	100
4670	7.78	150	400
4401	6.88	150	180
5791	19.61	148	390
4666	9.11	148	300
4793	8.67	146	325
4806	14.27	142	410
4454	11.09	136	715
533A	53.04	134	570
4774	10.77	124	610
2867	7.69	114	410
3850	5.9	108	330
2797	7.55	106	210
2782	7.73	104	600
4469	8.07	102	700
3140	7.94	100	430
6022	13.39	96	620
108	5.65	92	220

AGEB	CAN_POB	²²⁰ Rn_P. MEDIOS	²²² Rn_P.MEDIOS
5556	11.22	90	170
2918	9.39	88	300
736A	5.3	84	500
6164	14.52	82	350
316A	21.15	78	185
4223	8.02	78	685
4685	7.4	78	320
5607	11.14	74	670
5700	12.81	70	730
6215	40	66	760
2443	5.42	64	180
3225	7.9	64	360
3155	4.9	60	120
4952	12.61	58	230
165	5.15	56	350
432	4.65	56	360
4312	13.53	52	150
517	4.03	52	520
4882	7.92	48	170
4172	5.69	44	140
451	7.48	40	800
2814	6.65	38	270
381	4.03	35	95
42	4.86	30	175
659	4.38	21	280
6408	23.46	200	600
6018	5.92	192	500
4581	4.13	192	680
4863	2.96	188	470
597A	140.85	182	150

AGEB	CAN_POB	²²⁰ Rn_P. MEDIOS	²²² Rn_P.MEDIOS
5984	5.28	182	750
5325	13.69	178	510
4844	3.9	172	390
2871	2.58	172	570
521	4.32	171	745
4789	3.21	164	770
2462	2.85	164	525
6126	6.36	154	370
5880	6.11	150	680
5698	4.69	148	700
6855	11.06	146	680
6003	7.5	146	340
387A	13.61	142	500
4168	2.7	140	415
6516	10.28	138	350
4914	2.7	138	400
5518	5.11	136	440
5217	4.69	136	140
4204	2.29	124	480
5170	4.71	118	450
5062	3.69	118	680
5128	3.78	108	400
5715	6.46	106	110
6376	12.85	104	320
654A	196.08	96	320
2852	2.95	96	690
4276	2.05	94	385
5857	6.82	88	330
5058	4.86	88	310
5005	3.09	88	870

AGEB	CAN_POB	²²⁰ Rn_P. MEDIOS	²²² Rn_P.MEDIOS
4384	2.91	86	565
7336	11.6	82	400
5166	6.82	82	730
4191	4.11	82	450
4083	1.85	82	630
4651	3.14	80	130
4295	6.76	78	170
6056	6.23	78	680
647A	29.4	76	280
6357	6.55	76	300
6450	10.97	74	360
4399	3.67	74	700
4365	2.92	74	180
3884	1.84	74	325
5310	3.44	70	760
4543	4.42	68	195
5819	5.4	66	290
4628	5.17	66	650
4967	3.69	66	220
5024	3.92	64	460
2246	1.57	60	300
4327	2.71	58	690
4505	2.22	56	710
4948	2.88	54	460
5594	5.88	50	170
5753	3.71	40	360
4859	4.36	34	320
4609	3.73	26	510
469A	14.56	22	780
6041	4.88	21	390

Como resultado a esto tenemos un resumen de la regresión lineal realizada, la cual se muestra seguidamente:

- Estadística de la regresión

Tabla 18. Resultados de la regresión utilizando concentraciones de radón y muertes de cáncer pulmonar por AGEB'S.

ESTADÍSTICA DE LA REGRESIÓN	
Coefficiente de correlación múltiple	0.20062003
Coefficiente de determinación R ²	0.04024839
R ² ajustado	0.03482607
Error típico	25.6301624
Observaciones	179

- Análisis de la varianza

The F-Test Two-Sample for Variances analysis tool performs a two-sample F-test to compare two population variances.

Tabla 19. Análisis de varianza Prueba-F utilizando concentraciones de radón y muertes de cáncer pulmonar por AGEB'S.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	4875.07756	4875.07756	7.42121959	0.007092386
Residuos	177	116273.17	656.910566		
Total	178	121148.248			

Para obtener el valor de F calculado necesitamos conocer el valor de F crítico.

$$F_{Calculada} = 1 - F_{Crítico}$$

$$F_{Calculada} = 1 - .007092386$$

$$F_{Calculada} = .99290761$$

Encontrando el porcentaje de relación entre los fallecimientos a causa de cáncer pulmonar y la emanación de gas radón. Para esto solo resta multiplicar por 100 el valor obtenido de F calculada.

$$.9929 \times 100 = 99.29\%$$

Es así como encontramos que la correlación muertes cáncer pulmonar, población, emanación de gas radón es de 99.29%.

El mismo procedimiento fue efectuado para los datos de gas torón. Con la diferencia que solo se aplico a los 79 datos colectados en una primera etapa del trabajo de campo.

- Estadística de la Regresión

Tabla 20. Resultados de la regresión utilizando concentraciones de torón y muertes de cáncer pulmonar por AGEBS.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.17351766
Coefficiente de determinación R ²	0.03010838
R ² ajustado	0.02462876
Error típico	25.7652013
Observaciones	179

- Análisis de la varianza

Tabla 21. Análisis de varianza Prueba-F utilizando concentraciones de torón y muertes de cáncer pulmonar por AGEB'S.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	3647.5771	3647.5771	5.4946167	0.0201849
Residuos	177	117500.671	663.845597		
Total	178	121148.248			

Para obtener el valor de F calculado necesitamos conocer el valor de F crítico.

$$F_{Calculada} = 1 - F_{Crítico}$$

$$F_{Calculada} = 1 - .0201849$$

$$F_{Calculada} = .9798151$$

Encontrando el porcentaje de relación entre los fallecimientos a causa de cáncer pulmonar y la emanación de gas radón. Para esto solo resta multiplicar por 100 el valor obtenido de F calculada.

$$.9798 \times 100 = 97.98\%$$

Es así como encontramos que la correlación entre las muertes por cáncer pulmonar, la población y la emanación de gas radón es de 97.98%. De este modo, se muestra que si existe una relación entre los casos de muerte por cáncer pulmonar y las concentración medidas de gas Radón.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Las subsecuentes conclusiones se relacionan a los resultados y análisis colectados y efectuados durante el presente trabajo de investigación, estas se enlistan según la etapa en la cual se realizó.

- Radón

Se documentaron altas concentraciones de emanación de gas radón. La mayor concentración de gas radón medida en suelo es de 326 pCi/l lo que nos indica que se debe poner especial atención en dicha zona ya que la principal fuente de radón en interiores es el radón proveniente del suelo.

Además se localizaron cinco zonas consideradas como de altas concentraciones de gas radón o de población anómala, en las cuales se debe de prestar cuidado, ya que están localizadas en la zona urbana de Mexicali y podrían llegar a contribuir a aumentar los casos por cáncer pulmonar.

- Torón

En relación al torón la máxima concentración medida es de 1060 pCi/l, se encontró que el torón tiene concentraciones altas donde el radón es alto, esto debido que el torón es utilizado como indicador de radón. Este gas dará indicios para conocer la fuente y procesos de migración de los isotópos de radón. Las medidas de torón indican que los procesos de flujo y transporte en el medio son altos, quizás por la presencia de fallas no visibles o la alta permeabilidad hidráulica del medio. La vida media corta del torón (55 seg) permite realizar estas conclusiones.

- Salud

Con base al tratamiento y análisis realizado a la base de datos de fallecimientos por cáncer, se encontró que los porcentajes de fallecimientos a causa de solo cáncer pulmonar

en los años 2006 y 2011 se encuentran por encima del porcentaje mundial de 18% registrado por la IARC (2012). Mientras que el porcentaje en el resto de los años es menor en un rango de entre cuatro y siete por ciento.

El análisis visual de la información permite concluir que existe cierta relación entre los casos de fallecimiento por cáncer pulmonar y las zonas identificadas con altas concentración de emanación de gas radón.

- Análisis estadístico

El coeficiente de variación no es el óptimo, debido a la naturaleza de los datos.

- Gráficas de Sinclair

La identificación de las poblaciones base, normal y anómala permiten establecer los rangos en la distribución de los datos de concentración de emanación de gas radón.

- Análisis de correlación

A partir del análisis de datos realizado a las mediciones de gas radón, los datos de población por Ageb y las muertes por cáncer pulmonar del período 2004 – 2011 se concluye que entre estos factores hay una relación del 99.29%. Esto permite concluir la fuerte relación entre los casos de cáncer pulmonar con respecto a las concentraciones de radón.

5.2. Recomendaciones

Se detectaron zonas en Mexicali, con una alta emanación de gas radón, por lo cual se recomienda se realicen mediciones con menos distancia entre cada punto, así como mediciones intradomiciliarias.

Es necesario alertar a las autoridades para que inicien estudios más detallados y establezcan en el reglamento de construcción medidas de prevención. Estas medidas pueden iniciar con tratar de aislar el basamento de las viviendas para disminuir la entrada de radón a los interiores de las habitaciones o lugares cerrados.

Se propone establecer estaciones de medición continua de gas radón en las zonas detectados con altos valores de emanación de gas radón.

6. Referencias

1. Al-shereideh, S. A., Bataina, B. A., & Ershaidat, N. M. (2006). Seasonal variations and depth dependence of soil radon concentration levels in different geological formations in Deir Abu-Said District , Irbid — Jordan. *Radiation Measurements*, 41, 703–707. doi:10.1016/j.radmeas.2006.03.004
2. American Cancer Society, Inc (2010). Learn about cancer. Radon. <http://www.cancer.org/cancer/cancercauses/othercarcinogens/pollution/radon?>
3. Atlas de Riesgo del Municipio de Mexicali, Riesgos Geológicos (2012).
4. Azimi-Garakani, D; Flores, B; Piermattei, S; Susanna, A.F.; Seidel, J.L; Tommasino, L; Torri, G. (1988). Azimi-et al_1988_RadProtDosi_Indoor-soil.pdf. *Radiation Protection Dosimetry*, 24(1/4 pp), 269–27.
5. Badr I, Oliver M.A., Durrani S.A. (1996). Statical Evidence of the geological control over radon soil gas concentration and its implications for mapping radon potential. *Radiation Protection Dosimetry*, 63(4), 281–291.
6. Bertolo, a, & Verdi, L. (2001). Validation of a geographic information system for the evaluation of the soil radon exhalation potential in South-Tyrol and Veneto, Italy. *Radiation protection dosimetry*, 97(4), 321–4.
7. Bodansky David (1987) *Indoor Radon and its hazards* (p. 147). Washington, University of Washington Press 1987. ISBN 0295965169, 9780295965161.
8. Bulbulian S., *La Radiactividad* (1996), Fondo de Cultura Económica. http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/42/htm/sec_8.html Accesado: [15 de Octubre 2013]
9. Burian, I., & Otahal, P. (2008). History of the measurement of radon in central Bohemia. *Radiation protection dosimetry*, 130(1), 95–7.

10. Carapezza, M. L., Barberi, F., Ranaldi, M., Ricci, T., Tarchini, L., Barrancos, J., Fischer, C., et al. (2012). Hazardous gas emissions from the flanks of the quiescent Colli Albani volcano (Rome, Italy). *Applied Geochemistry*, 27(9), 1767–1782.
11. Cartagena, R., Olmos, R., Lopez, L. D., Soriano, T., Barahona, F., Hernandez, P. A., & Perez, N. M. (2004). Diffuse soil degassing of carbon dioxide , radon , and mercury ut. *Geological Society of America*, 203–212.
12. Chen, J., Falcomer, R., Ly, J., Wierdsma, J., & Bergman, L. (2008a). Long-term monitoring of soil gas radon and permeability at two reference sites. *Radiation Protection Dosimetry*, 1–6.
13. Chen, J., Ly, J., Bergman, L., Wierdsma, J., Klassen, R. A., Bureau, R. P., & Canada, H. (2008b). Variation of soil radon concentrations in southern Ontario. *Radiation Protection Dosimetry*, 131(3), 385–389.
14. Chung, W. H., Tokonami, S., & Furukawa, M. (1998). PRELIMINARY SURVEY ON RADON AND THORON CONCENTRATIONS IN KOREA. *Radiation protection dosimetry*, 80(4), 423–426.
15. Ciotoli, G., Etiope, G., Guerra, M., & Lombardi, S. (1999). The detection of concealed faults in the Ofanto Basin using the correlation between soil-gas fracture surveys. *Tectonophysics*, 301(3-4), 321–332.
16. Cruz-Castillo, M., & Mexicano, I. (2002). Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de baja california , méxico. *GEOS, Union Geofísica Mexicana*, 37–42.
17. Darby, S., Hill, D., Barros-Dios, J. M., Falk, R., Forastiere, F., Hakama, M., Tirmarche, M. (2005). Radon in homes and risk of lung cancer : collaborative analysis of 13 European case-control studies. *BMJ*, (November 2008). doi:10.1136/bmj.38308.477650.63
18. DurrIDGE Stainless Steel Soil Gas Probe. DurrIDGE Company Inc., Bedford, MA,

2009.

19. EPA (Environmental Protection Agency) (2012). Acerca del radón, riesgos para la salud. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés). http://www.epa.gov/iaq/espanol/radon_riesgos_para_la_salud.html. Accesado: [25 de septiembre de 2013]
20. Etiopie, G. y Martinelli G., 2002. Migration of carrier and traces gases in the geosphere: an overview. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 129, 185-204.
21. Gastil, R.G., Phillips, R.P., Allison, E.C., 1975. Reconnaissance geology of the state of Baja California. *Geological Society of America Bulletin* 140, 170 pp.
22. Giammanco, S., Immè, G., Mangano, G., Morelli, D., & Neri, M. (2009). Comparison between different methodologies for detecting radon in soil along an active fault: the case of the Pernicana fault system, Mt. Etna (Italy). *Applied radiation and isotopes: including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine*, 67(1), 178–85.
23. Guo, Q., Sun, K., & Cheng, J. (2004). Methodology study on evaluation of radon, 112(2), 291–296.
24. Hasan, A. K., Subber, A. R. H., & Shaltakh, A. R. (2011). Measurement of Radon Concentration in Soil Gas using RAD7 in the Environs of Al-Najaf Al-Ashraf City-Iraq. *Advances in Applied Science Research*, 2(5), 273–278.
25. Hosoda, M., Tokonami, S., Sorimachi, A., Janik, M., Ishikawa, T., Yatabe, Y., Yamada, J., et al. (2009). Experimental system to evaluate the effective diffusion coefficient of radon. *The Review of scientific instruments*, 80(1), 013501.
26. IARC International Agency for Research on Cancer (2012). GLOBOCAN: Estimated Cancer Incidence, Mortality and Prevalence Worldwide in 2012. http://globocan.iarc.fr/Pages/fact_sheets_population.aspx. Accesado 25 de

Noviembre 2013.

27. Ingeniería de Control Ambiental y Riesgo Industrial, S.de R. L. M. I., 1999. Inventario de Emisiones de Mexicali. Informe Final.
28. Instituto Nacional de Ecología (INE). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002) Calidad del aire.
29. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Mexicali, Baja California
30. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).(2010). Censo de población y vivienda 2010.
31. Iskandar, D., Iida, T., Yamazawa, H., Moriizumi, J., Koarashi, J., Yamasoto, K., Yamasaki, K., et al. (2005). The transport mechanisms of 222 Rn in soil at Tateishi as an anomaly spot in Japan, 63, 401–408.
32. Iskandar, D., Iida, T., Yamazawa, H., Moriizumi, J., Koarashi, J., Yamasoto, K., Ishikawa, S. (2005). The transport mechanisms of 222 Rn in soil at Tateishi as an anomaly spot in Japan. Applied radiation and isotopes, 63, 401–408. doi:10.1016/j.apradiso.2005.03.012
33. ISSESALUD (2012). Base de datos de muertes por cáncer pulmonar. Departamento de Epidemiología de Mexicali. Gobierno del Estado de Baja California.
34. Je, H.-K., Kang, C.-G., Choi, J.-Y., Lee, J.-S., & Chon, H.-T. (2007). Assessment of soil and soil-gas radon activity using active and passive detecting methods in Korea. Environmental geochemistry and health, 29(4), 295–301.
35. Kravchenco, A. (2003). Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. Soil Science Society of American Journal. 91:393-400.
36. Lira H. (2005). Actualización del modelo geológico conceptual del campo

geotérmico de Cerro Prieto, BC. Geotermia. Vol. 18 No. 1. Enero-Junio.

37. Malczewski, D., & Zaba, J. (2007). ^{222}Rn and ^{220}Rn concentrations in soil gas of Karkonosze-Izera Block (Sudetes, Poland). *Journal of environmental radioactivity*, 92(3), 144–64.
38. NAS (Academia Nacional de Ciencias) (1998.). V Informe sobre efectos biológicos de la radiación ionizante (BEIR): Efectos sobre la Salud de la Exposición al Radón en Espacios Cerrados. Centro de Sanidad Ambiental. (Dependiente del Consejo Nacional de Seguridad). <http://www.envtox.ucdavis.edu/cehs/toxins/SPANISH3/radon/ionizing.html>
Accesado: [30 Mayo 2013]
39. NAS (Academia Nacional de Ciencias) (1999). VI Informe sobre efectos biológicos de la radiación ionizante (BEIR): Efectos sobre la Salud de la Exposición al Radón en Espacios Cerrados. Centro de Sanidad Ambiental. (Dependiente del Consejo Nacional de Seguridad). <http://www.envtox.ucdavis.edu/cehs/toxins/SPANISH3/radon/ionizing.html>
Accesado: [30 Mayo 2013]
40. Nazaroff, W.W., Moed, B.A., . Sextro, R.G., 1988. Soil as a source of indoor radon: generation, migration, and entry. In: Nazaroff, W.W., Nero, Jr., A.V. (Eds.), *Radon and Its Decay Products in Indoor Air*. Wiley, New York.
41. Nazaroff, W.W. and Nero, A.V. (1988). *Radon and Its decay products in indoor air*. New York: John Wiley & sons, p.74.
42. NRC (National Research Council) 1988. Health effects of exposure to radon, BEIR VI. Committee on health risks of exposure to radon (BEIR VI), board on radiation effects research, commission on life sciences National Academy Press, Washington, DC 1988.
43. OMS (Organización Mundial de la Salud) (2002). El radón y el cáncer Nota descriptiva N° 291. Septiembre de 2009. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/es/index.html>. Accesado 25 de Noviembre

de 2013.

44. OMS (Organización Mundial de la Salud), 2009. Nota descriptiva No. 291. Septiembre de 2009. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/es/index.html>. Accesado 25 de Noveimbre de 2013.
45. Prasad, Y., Prasad, G., Gusain, G. S., Choubey, V. M., & Ramola, R. C. (2008). Radon exhalation rate from soil samples of South Kumaun Lesser Himalayas, India. *Radiation Measurements*, 43, S369–S374.
46. Press, F. and Siever, R. 19982. *Understanding Earth*. W. H. Freeman and Company. USA. p. 477
47. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Mexicali, Baja California <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/02/02002.pdf>
48. Quindós Poncela, L. S. (2002). Radón. Un gas radioactivo de origen natural en su casa (p. 48). Cantabria, Spain: Consejo de Seguridad Nuclear.
49. RAD7 Radon Detector User Manual. DurrIDGE Comapany Inc., Bedford, MA, 2009.
50. Ren, T., (2001). Source, level and control of indoor radon. *Radiat. Prot.* 21(5), 291 (in Chinese).
51. Reyna, M.A., Badilla, G. (2002). Estudio del efecto del radón en los casos de muerte por cáncer pulmonar en la población de Mexicali , Baja California , México. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, 23(2), 68–73.
52. Ruiz Ortiz N.S., Reyna Carranza, M.A., 2005. Detección de gas radón (Rn) intradomiciliario en 25 hogares de Mexicali, BC usando pruebas cortas. *Revista Mexicana de Ing. Biomédica*. Vol. XXVI, Núm. 2. pp. 87-91.
53. Ruiz Ortiz N.S., Reyna Carranza, M.A., 2006. Contaminación del ambiente en espacios interiores ¿Es seguro nuestro hogar? *Revista UABC* No. 54.

54. Sainz, C (2012), El radón: gas noble radiactivo. Universidad de Santiago Compostela. <http://www.usc.es/radongal/documcursoradon2010/Dia%201/CSainz/caracteristicas%20del%20radon.pdf>
Accesado: [12 de febrero 2012].
55. Segovia, N., Maciel, R., Tamez, E., Rosas, J., Universitaria, C., & Geofluides-bassins-eau, L. (1995). Radon in soil studies at Jalisco state, Mexico. *Radiation Measurements*, 25, 617–620.
56. Sevc, J., Placek, V. and Jerabek, J. (1971). Lung cancer risk in relation to long-term radiation exposure in uranium mines. In *Proceedings of the Fourth Conference on Radiation Hygiene*. Trnovec, T. and Gaal, P., Eds. Part II (Hradec Kralove, Czechoslovakia: Purkyne Medical Research and Postgraduate Institute) pp. 315–326
57. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol I: Sources. New York: United Nations, 2000.
58. US EPA (2012). “A citizen’s guide to radón.” The guide to protecting yourself and your family from radon. Indoor environments división (660J). EPA 402/K-12/002
59. US.EPA, 1993. United States Environmental Protection Agency. A Physician’s Guide Radon The health threat with a simple solution. Document 402-K-93-008.
60. Villatoro, M., Henríquez, C., & Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores idw y kriging en la variación espacial de ph, ca, cice y p del suelo. *Agronomia Costarricense*, 32(1), 95–105.
61. Wang, N., Xiao, L., Li, C., Mei, W., Hang, Y., & Liu, D. (2009). Level of Radon Exhalation Rate from Soil in Some Sedimentary and Granite Areas in China. *Nuclear Science and Technology*, 46(3), 303–309.
62. Yamada Y., Sun Q., Tokonami S., Akiba S., Zhuo W., Hou Ch., Zhang S., Ishikawa

T., Furukawa M., Fukutsu K., Yonehara H., 2006. Radon–thoron discriminative measurements in gansu province, china, and their implication for dose estimates. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 69:723–734. Online DOI: 10.1080/15287390500261265.