

## Distribución Log Normal de $^{222}\text{Rn}$ en el estado de Zacatecas, México

**María Luisa García, Fernando Mireles, Leopoldo Quirino,  
Ignacio Dávila, Carlos Ríos, José Luis Pinedo**  
*Unidad Académica de Estudios Nucleares  
Universidad Autónoma de Zacatecas  
Ciprés 10, Frac. La Peñuela  
Zacatecas, Zac., 98068 México  
mluisagb@hotmail.com; fmireles@cantera.reduaz.mx*

### Resumen

En este trabajo se muestra la evaluación de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en aire para Zacatecas. Los Detectores de Trazas Nucleares de Estado Sólido fueron utilizados como la técnica para la realización de las mediciones en gran escala con Nitrato de Celulosa LR-115, tipo 2, en cámaras de  $^{222}\text{Rn}$  abiertas. Las mediciones fueron realizadas durante tres meses en diferentes épocas del año. En los resultados se presenta la distribución log normal, media aritmética y media geométrica para la concentración en interior y exterior de construcciones habitacionales, la concentración en interior de construcciones ocupacionales y en las 57 cabeceras municipales del estado de Zacatecas. La estadística de los valores en la concentración mostró variación de acuerdo a la época del año, obteniendo cantidades altas en temporadas de invierno para ambos casos. La distribución de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  se presenta en el mapa estatal para cada uno de los municipios, representando los lugares de medición en todo el estado de Zacatecas. Finalmente se presentan los lugares donde los valores en la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en aire se encuentran cerca del límite establecido por la EPA de  $148 \text{ Bq/m}^3$ .

### 1. INTRODUCCIÓN

La radiación juega un papel importante en la vida diaria de la población en general. Cada individuo está expuesto a la radiación natural, debido a su existencia en aire, en suelo y cuerpo humano [1]. El radon en aire que se respira contribuye significativamente a la dosis de la población [2,3]. La UNSCEAR indica que de la dosis efectiva anual debido a fuentes naturales el  $^{222}\text{Rn}$  es el principal contribuidor [3,4].

Considerando estas importantes razones, el  $^{222}\text{Rn}$ , es el radioisótopo más abundante en la naturaleza con vida media de 3.16 días, decae a sus descendientes de vida media corta  $\text{Po}^{218}$  (3.05 min) y  $\text{Po}^{214}$  (0.000164 s), los cuales están cargados eléctricamente y pueden adherirse a las partículas presentes en el aire y al tejido pulmonar, emitiendo partículas altamente energéticas (5.998 MeV) y (7.683 MeV) respectivamente, las cuales tienen la capacidad de dañar las células del tejido pulmonar [5,6,7,8]. El coeficiente de riesgo por cáncer pulmonar debido a la inhalación de  $^{222}\text{Rn}$  y sus descendientes varía de acuerdo a diferentes factores en la población, y es importante tener un estudio de los niveles en la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  e identificar localidades de

riesgo para tener un análisis geográfico de la región en cuanto a niveles en las cantidades de  $^{222}\text{Rn}$  [4,9].

Existe un límite de seguridad de concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en aire establecido por la EPA (Environmental Protection Agency) y recomendado como adecuado para cualquier región de  $148 \text{ Bq/m}^3$  [10]. Conociendo los niveles de Radón se puede estimar el límite superior de la exposición a sus descendientes; aunque en la mayoría de los casos las mediciones son sólo de  $^{222}\text{Rn}$  y no de sus descendientes por simplicidad, conveniencia y costo efectivo en las mediciones [5,11,12] (Segovia *et al.*, 1993; George, 1996; Espinosa *et al.*, 1999).

Los sistemas de detección en la medición y detección de Radón se dividen en activos y pasivos, de los pasivos la técnica más usada es SSNTD de donde el LR-115 de nitrato de celulosa es uno de los más usados debido a que permite mediciones a gran escala, esto es que permite mediciones simultáneas y reproducción de las mismas, permitiendo la identificación de zonas con diferentes niveles en la concentración de radón [13, 14]. Aunque existen una serie de factores que influyen en la concentración de radón dentro de alguna construcción principalmente el contenido de Radio y la permeabilidad del suelo presente y los detalles de construcción. De tal modo que cada construcción tiene diferente ubicación y una combinación diferente de estos factores, el rango de los niveles en los valores de la concentración es amplio, por lo tanto se ha considerado que la distribución de las mediciones debe ser Log-Normal [15].

El objetivo de este trabajo es evaluar la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  mediante la distribución de los resultados enfatizando la distribución log-normal de los datos de la medición de  $^{222}\text{Rn}$  en el estado de Zacatecas, destacando los valores estadísticos importantes para cada distribución. La técnica de medición SSNTD fue la principal herramienta en la medición mediante el uso de LR-115 tipo 2.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

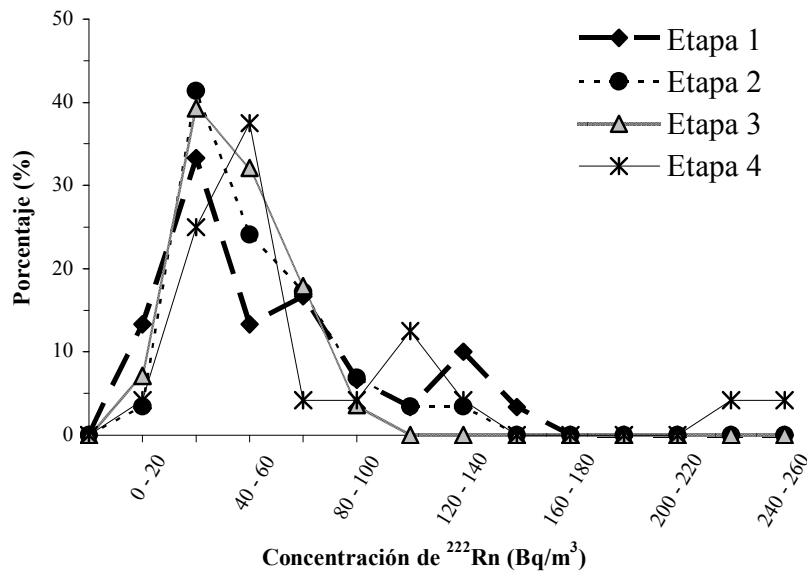
Los niveles de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  fueron hechas en poblaciones y cabeceras municipales que componen el estado de Zacatecas divididas de la siguiente manera: en interior y exterior de construcciones habitacionales y en el interior de construcciones ocupacionales. La medición se realizó mediante el método de pasivo SSNTDs usando la película de nitrato de celulosa LR-115 tipo 2 manufacturado por Kodak Pathé<sup>®</sup>, el cual permitió mediciones a gran escala, ya que en cada caso se hicieron simultáneamente y repetidas durante un año en cuatro periodos de 3 meses, para cada sitio se tomo en cuenta hora y fecha de colocación y de retiro, para normalizar los valores en días. El detector de medición de  $^{222}\text{Rn}$  se elaboró colocando piezas de  $2.5 \text{ cm} \times 3.0 \text{ cm}$  en cámaras de difusión abiertas y cerradas. Después de la exposición se retiraron las piezas de LR-115, luego se sometieron en grupos a un ataque químico para desgastar la película en un recipiente metálico termostático acoplado a un dispositivo controlador de temperatura y de tiempo, "TRAL-1M" [16]; usando hidróxido de sodio (NaOH) 2.5 N, a  $60^\circ \text{ C}$  durante 110 min. Después de que se enjuagaron con agua limpia y se secaron con papel absorbente se contaron en el contador de chispeo electrónico "AIST-2V" en  $1 \text{ cm}^2$  de área de conteo [17]; usando 750 V para rompimiento y 600 V para conteo. La conversión de trazas a concentración de  $^{222}\text{Rn}$  se hizo con los factores:  $k = 0.0350 \pm 0.0023 \text{ (m}^3 \cdot \text{tr)} / (\text{Bq} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{d)}$  para cámaras abiertas y  $k = 0.0282 \pm$

0.0010(m<sup>3</sup>·tr)/(Bq·cm<sup>2</sup>·d) para cámaras cerradas.

### 3. RESULTADOS

La distribución de la concentración de <sup>222</sup>Rn, obtenida con SSNTDs, como función del porcentaje para interior y exterior de construcciones habitacionales e interior de construcciones ocupacionales se muestra en las Figuras 1, 2 y 3 para cuatro etapas de medición. Los valores de la media aritmética de cada distribución se encuentran en la tabla I y los valores para la concentración en exterior tienden más hacia valores menores que las del interior. En cambio para construcciones ocupacionales los valores entre una etapa de medición y otra pueden diferenciarse, de los cuales la Etapa 1 tiene el mayor porcentaje entre 0 y 20 Bq/m<sup>3</sup>.

Se encontró que hay diferencia entre los valores de la media aritmética de la concentración del interior y la concentración del exterior de las cuatro etapas de medición de <sup>222</sup>Rn en construcciones habitacionales; mostrando una media aritmética de 55.57 ± 4.85 Bq/m<sup>3</sup> y 46.51 ± 5.25 Bq/m<sup>3</sup>, para el interior y el exterior, respectivamente. La media aritmética de las concentraciones de <sup>222</sup>Rn para construcciones ocupacionales fue de 57.80 ± 5.35 Bq/m<sup>3</sup>, con un máximo de 85.96 Bq/m<sup>3</sup> en la primera etapa y un mínimo de 33.83 Bq/m<sup>3</sup> en la segunda etapa.



**Figura 1. Distribución de la concentración de <sup>222</sup>Rn en el interior de construcciones habitacionales para cuatro etapas de medición.**

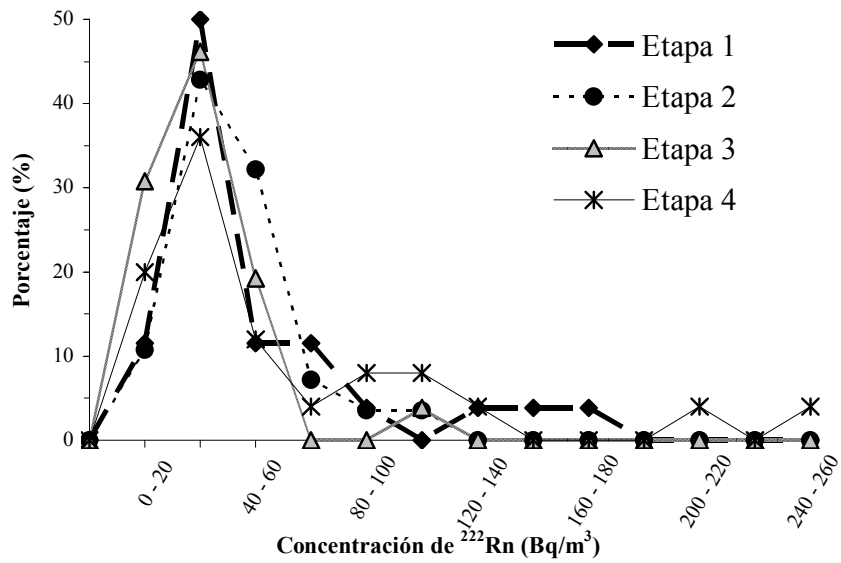


Figura 2. Distribución de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en el exterior de construcciones habitacionales para cuatro etapas de medición.

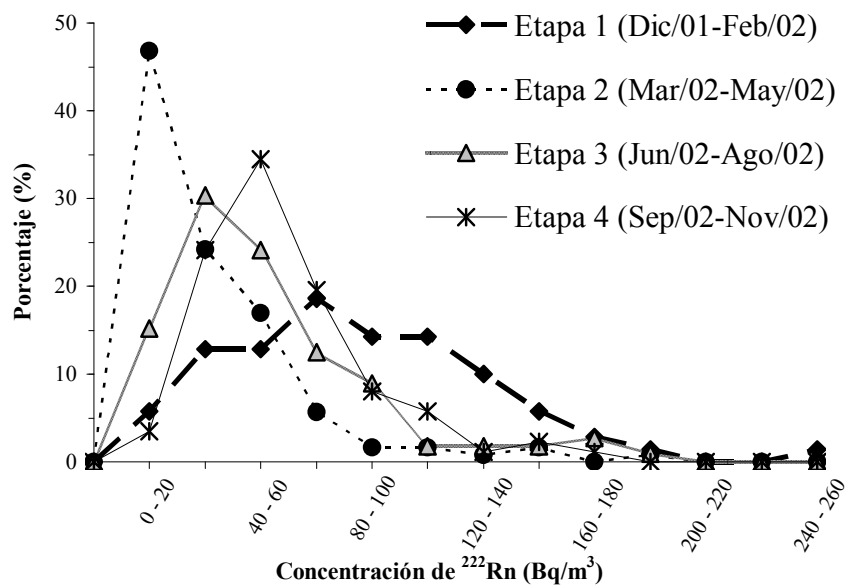
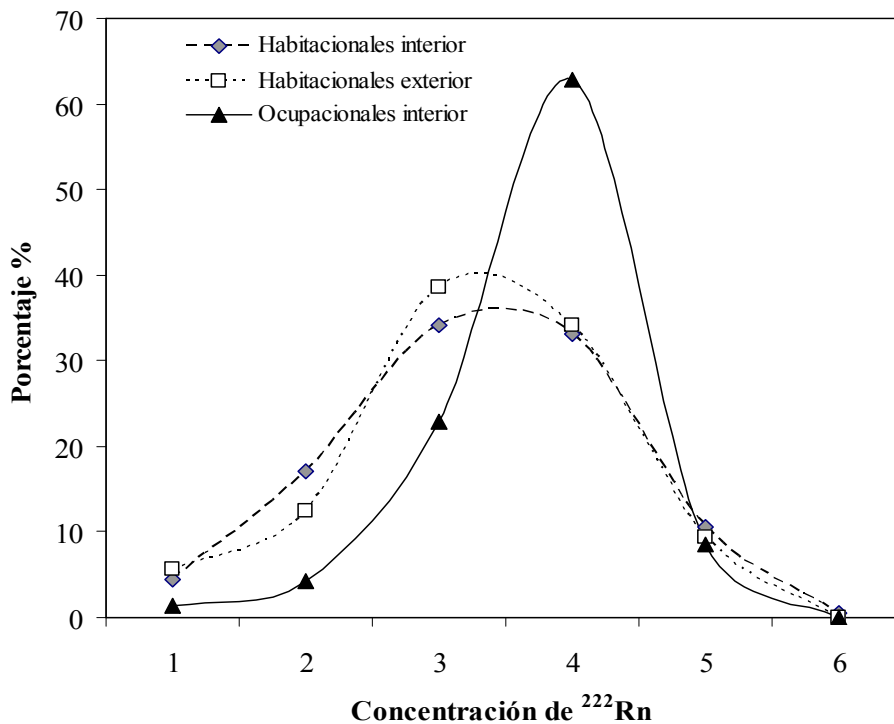


Figura 3. Distribución de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en el interior de construcciones ocupacionales para cuatro etapas de medición.

**Tabla I. Estadística de las distribuciones de concentración de  $^{222}\text{Rn}$  ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) para construcciones habitacionales y ocupacionales.**

Parámetro	Habitacionales								Ocupacionales			
	Interior				Exterior				Interior			
	Etapas				Etapas				Etapas			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Numero de muestras*	30	29	28	24	26	28	26	25	69	124	112	87
Media aritmética*	57.99	50.34	43.96	70.00	51.53	41.93	32.23	60.36	85.96	33.83	53.71	59.39
Desviación estándar*	7.04	5.36	3.60	12.11	8.26	4.22	4.02	12.27	5.67	2.89	3.53	3.24
Mínimo*	10.31	17.22	16.71	20.41	1.41	16.15	8.20	7.88	5.19	3.15	6.71	15.38
Máximo*	154.99	129.06	89.65	240.76	179.68	105.91	110.28	247.96	268.96	194.00	185.07	169.57
Mediana*	45.04	44.24	42.04	45.89	36.79	35.46	27.47	33.56	79.10	23.26	44.93	51.50
Sesgo	1.01	0.63	0.30	0.30	1.05	0.87	0.70	1.31	0.43	0.99	0.70	0.78
Curtosis	0.09	1.20	-0.17	3.51	3.10	1.93	7.70	3.35	1.87	7.73	2.52	2.62

\*Valores dados en  $\text{Bq}/\text{m}^3$



**Figura 4. Distribución Log-Normal de construcciones ocupacionales y habitacionales.**

La estadística indica que estas distribuciones tienen un comportamiento Log-Normal, de tal forma que se tomó un grupo de valores a los cuales se les aplicó el logaritmo obteniendo las distribuciones de interior y exterior de construcciones habitacionales e interior de construcciones ocupacionales, ver Figura 4; en esta figura puede observarse que tiene y aun aproximación normal. Los valores estadísticos de esta distribución se encuentran en la Tabla II donde los valores de media, mediana y moda contrastan mejor entre sí a diferencia de los valores estadísticos en la Tabla I, para las distribuciones 1, 2 y 3.

**Tabla II. Valores estadísticos de la distribución log-normal de construcciones habitacionales y ocupacionales**

	Habitacionales		Ocupacionales
	<i>Interior</i>	<i>Exterior</i>	<i>Interior</i>
No. De muestras	199	161	70
Media Aritmética	68.58	62.27	85.96
Media Geométrica	38.97	35.84	67.08
Media Log ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )	44.91	42.036	71.58
Mediana ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )	42.86	40.45	79.08
Moda ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )	19.15	30.79	77.46

En la Figura 5 se muestra la distribución de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en todo el estado, la media aritmética es  $55.28 \pm 2.52 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , mostrando un valor mínimo de  $22.30 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , para Vetagrande y con un valor máximo de  $117.51 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , para Villa González Ortega. Las cantidades para cada uno de los municipios del estado se encuentran influenciados por las cantidades específicas de cada sitio de medición, sin embargo al observar la distribución de la Figura 5, se encontró que no existen valores que se encuentran cercanos o por encima del límite de seguridad de la EPA:  $148 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , aunque existen sitios específicos en los cuales los valores si se acercan o exceden el límite debido a la naturaleza de las cantidades encontradas, es decir tienen un intervalo de fluctuación dando lugar a la distribución log-normal. Se encontraron 29 sitios en los cuales los valores se encuentran cerca o por encima de este límite, de estos valores en los municipios de Genaro Codina y Jerez concentran mayor número de localidades con concentraciones altas mientras que en Jalpa, Tepetongo y Tlaltenango se registraron las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  más altas.

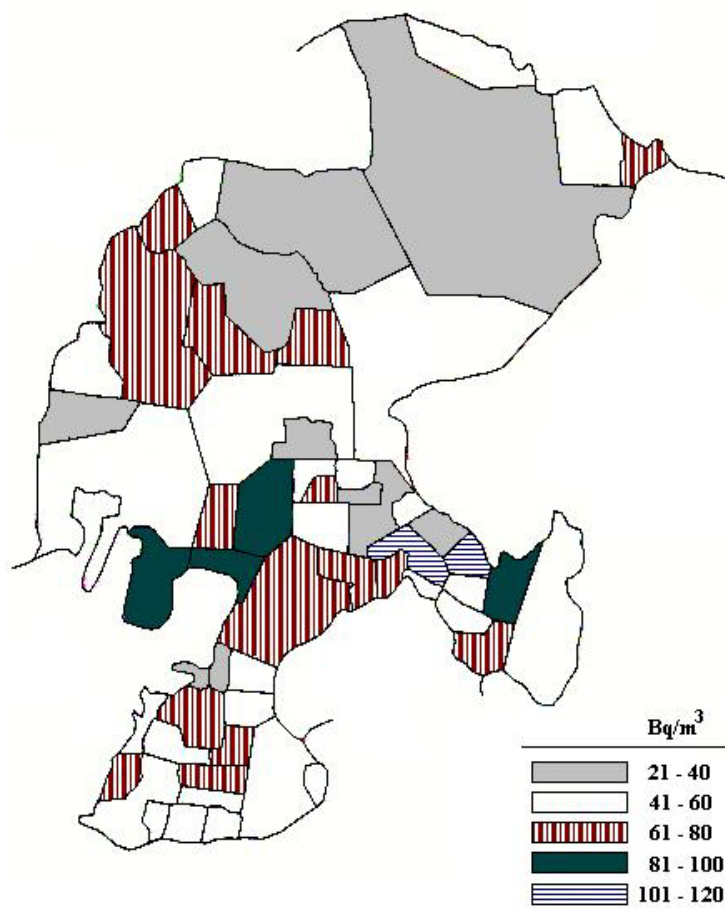


Figura 5. Distribución de la concentración de <sup>222</sup>Rn en el Estado de Zacatecas.

#### 4. CONCLUSIONES

El comportamiento de los valores obtenidos y presentados en este estudio tiene un comportamiento Log-Normal, dando lugar a una mejor interpretación de los resultados obtenidos en este estudio y a la comprensión de los resultados que arroja una medición de <sup>222</sup>Rn en la cual se observa la fluctuación en los valores. La naturaleza Log-Normal en los resultados de este trabajo es atribuida a los principales factores que influyen las cantidades, dichos factores son el tipo de suelo, el cual es variado para cada región en Zacatecas el material de construcción varía, aunque la mayoría de las construcciones tienen uno o dos pisos.

El promedio obtenido en este trabajo para Zacatecas fue de  $55.28 \pm 2.52$  Bq/m<sup>3</sup>, sin embargo, los sitios específicos donde se encontraron concentraciones altas si exceden el límite de seguridad establecido por la EPA (148Bq/m<sup>3</sup>), destacando Genaro Codina, Jerez, Jalpa, Tepetongo y Tlaltenango. Las causas de haber encontrado altas concentraciones pueden atribuirse a poca ventilación, material de construcción, estilo de vida de los habitantes y asentamiento geológico. Teniendo mayor peso en estos factores el asentamiento geológico ya que el estilo de vida de las personas en esta región es en función al clima en Zacatecas permitiendo tener buena ventilación

en cualquier tipo de construcción. De cualquier modo estos lugares quedan pendientes para futuras investigaciones y monitoreos de  $^{222}\text{Rn}$  con una técnica más especializada para ir al sitio específico.

La técnica usada permitió ejecutar mediciones a gran escala, esto significa que se lograron monitorear un grupo numeroso de lugares simultáneamente y en repetidas ocasiones, sin olvidar las limitaciones que la técnica implica.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer ampliamente a Servicios de Salud de Zacatecas y al Instituto del Seguro Social por el apoyo técnico brindado en la colocación, retiro y toma de datos de los detectores. También un reconocido agradecimiento a CONACYT-SIVILLA por el financiamiento mediante el proyecto número 20000402005-1.

### REFERENCIAS

1. El-Bahi S.M., "Assessment of radioactivity and radon exhalation rate in Egyptian cement", *Health Phys.* **86**, 517-522 (2004).
2. Tokonami S., "Experimental verification of the attachment theory of radon progeny onto ambient aerosols", *Health Phys.* **78**, 74-79 (2000).
3. El May M.V., Chaed N., Mtimet S., "Radon concentrations in some dwellings of Tunisia" *Health Phys.* **86**, 150-154 (2004).
4. Magalhães M.H., Amaral E.C.S., Sachett I., Rochedo E.R.R., "Radon-222 in Brazil: an outline of indoor and outdoor measurements", *J. Env. Radioactivity* **67**, 131-143 (2003).
5. George A.C. State of the art instruments for measuring radon/thoron and their progeny in dwellings – a review. *Health Phys.* **70**, 451-463 (1996).
6. Tso M.Y.W., Leung J.K.C., "Population dose due to natural radiation in Hong Kong", *Health Phys.* **78**, 555-558 (2000).
7. Abumurad K.M., Tamimi M.H., "Natural radioactivity due to radon in Soum region, Jordan", *Radiat. Meas.* **39**, 77-80 (2005).
8. Singh S., Kumar A., Singh B., "Passive integrating studies for environmental monitoring in Hamirpur district, Himachal Pradesh, India using solid state nuclear track detectors", *Radiat. Meas.* **39**, 81-85 (2005).
9. Andersen C.E., Ulbak K., Damkjær A., Kirkegaard P., Gravesen P., "Mapping indoor radon-222 in Denmark: design and test of the statistical model used in the second nationwide survey", *S. Total Environment* **272**, 231-241 (2001).
10. Jamil K., Al-Ahmady K.K., Ali S., Qureshi A.A., Khan H.A., Khan H.A. Relative performance of different types of passive dosimeters employing solid state nuclear track detectors. *Health Phys.* **73**, 629-632 (1997).
11. Segovia N., Peña P., Mireles F., Dávila I., Quirino L. Radon concentration levels in dwellings and mine atmospheres in México. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* **22**, 445-448 (1993).
12. Espinosa G., Golzarri J.I., Rickards J., Gammage R.B. Distribution of indoor radon levels in Mexico. *Radiat. Meas.* **31**, 355-358 (1999).
13. Baixeras C., Font L., Sánchez-Cabeza J.A., Pujol L., Fernández F., Domingo C. A comparative study of different methods for measuring radon concentrations. *Environ. Geo. Health* **16**, 489-497 (1994).



14. Tokonami S., Yang M., Sanada T. Contribution from Thoron on the response of passive radon detectors. *Health Phys* **80**, 612-618 (2000).
15. Miles J. Mapping <sup>222</sup>Rn-prone areas by lognormal modeling of house radon data. *Health Phys.* **74**, 370-378 (1998).
16. Nikolaev V. A., Gromov A.V., Vorobiov I.B. The device for track detectors etching “Tral-1M”. Description and Operating instructions. V. G. Khlopin Radium Institute. St.- Petesburg, Rusia. (2001a).
17. Nikolaev V. A., Gromov A.V., Vorobiov I.B. *Automated spark counter of tracks “Aist-2V”*. Description and Operating instructions. V. G. Khlopin Radium Institute. St.- Petesburg. (2001b).