

MEDICIÓN DE GAS RADÓN (Rn^{222}) EN AGUAS TERMALES DEL CERRO PACHO, CALDERA COATEPEQUE, EL SALVADOR

MEASUREMENT OF RADON (^{222}Rn) IN THERMAL WATER OF CERRO PACHO, COATEPEQUE CALDERA, EL SALVADOR

Ramiro Rodríguez^{1*}, Rodolfo Olmos² & Julio Payes³

¹Escuela de Química. Facultad Multidisciplinaria de Occidente. Santa Ana. El Salvador

²Instituto de Vulcanología de la Universidad de El Salvador. IV-UES

³Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares. CIAN. FIA. UES. El Salvador

*Autor para contacto: ramirrorodriguez@yahoo.com.mx

(Recibido: 4/02/2014 ; aceptado: 12/05/2014)

ABSTRACT: Radon (^{222}Rn) concentrations and radio (^{226}Ra) evaluation dissolved in thermal spring water are presented. The aim is to contribute to volcanic monitoring, adapting and validating analytical methodology. Sampling was discreet and monthly type, from June 2011 to March 2013. Radon levels vary from $0,48 \pm 0,1$ to $1,54 \pm 0,13$ Bq/L (average 1,24 Bq/L); radio concentrations were evaluated from January to December 2012, the values found do not show radio detection confidence level of 95% with respect to the detection limit (4,2 mBq/L). In November 2012 there was a reduction of radon possibly related to subduction anomalies with epicenter at 143 km from cerro Pacho, volcanic seismicity was also recorded 40 days before with increments of microearthquakes and volcano-tectonic activity. The study produced the first measurements of radon in thermal water, setting the baseline for evaluating the behavior of these radionuclides with seismic activity.

Keywords: Radon 222, Radium 226, caldera Coatepeque, cerro Pacho, spring water, El Salvador.

RESUMEN: Se presentan concentraciones de radón (Rn^{222}) y evaluación de radio (Ra^{226}) disueltos en agua. El objetivo es contribuir al monitoreo volcánico, adaptando y validando metodología analítica. El muestreo fue de tipo discreto y mensual, desde junio 2011 hasta marzo 2013. Las concentraciones de radón varían de $0,48 \pm 0,1$ a $1,54 \pm 0,13$ Bq/L (promedio 1,24 Bq/L); concentraciones de radio se evaluaron de enero a diciembre 2012, los valores encontrados no demuestran detección de radio al nivel de confianza del 95 % respecto al límite de detección (4,2 mBq/L). En noviembre 2012 se observó disminución de radón, posiblemente relacionado a anomalías de subducción con epicentro a 143 km del cerro Pacho, registrando sismicidad volcánica 40 días antes con incrementos de microsismos y actividad volcano-tectónica. Se ha generado las primeras mediciones de radón en agua termal, estableciendo la línea base para evaluar el comportamiento de estos radionucleidos con la actividad sísmica.

Palabras clave: Radón 222, Radio 226, caldera Coatepeque, cerro Pacho, aguas termales, El Salvador.

INTRODUCCIÓN

La utilización de trazadores radiactivos en geología ha obtenido un amplio desarrollo en los últimos años. Uno de estos trazadores es el radón, en especial su isótopo Rn^{222} . Este gas es producto de la desintegración del radio (Ra^{226}), de la cadena radiactiva del uranio (U^{238}) (García-Vindas et al., 2000). El radón (Rn^{222}) es un radionúclido con un semiperíodo de aproximadamente 3,8 días. El radón es químicamente inerte, su transporte en ambientes geológicos puede describirse mediante procesos físicos tales como flujos de advección, difusión, partición entre fases de líquido y gas, y decaimiento. Debido a la longitud de corto retardo de radón ($3,0 \times 10^{-8}$ cm), sólo los átomos producidos en la superficie de los granos de la roca logran transportarse en el agua subterránea circundante. Así, la concentración de radón en aguas subterráneas depende en gran medida de la superficie de las rocas que rodean el acuífero, y es proporcional a la concentración de uranio en las rocas adyacentes (Kuo et al., 2006).

El semiperíodo de radón (Rn^{222}) es relativamente largo comparado con sus descendientes (Po^{218} , Po^{214} , Bi^{214} , Pb^{214}), esto permite que una cantidad de radón pueda recorrer largas distancias antes de desintegrarse por completo. Las investigaciones realizadas en relación a este gas consisten en el estudio de las variaciones de la concentración, con el fin de encontrar una relación con eventos de origen sísmico o volcánico (García-Vindas et al., 2000).

El radio (Ra^{226}) es el progenitor del radón (Rn^{222}), pertenece al grupo II de la tabla periódica, por lo que comparte propiedades similares con Ca, Sr, y Ba. Su movilidad se realiza en condiciones reductoras, pH bajos, aumento de sólidos totales disueltos (TDS) o una combinación de estos (Bolton, 1998).

Los acuíferos cercanos a los volcanes, particularmente de origen termal (agua subterránea que emerge a la superficie con una temperatura mayor a la temperatura ambiente), recorren distancias del orden de metros antes de llegar a la naciente. Si la velocidad de circulación del agua

termal permite que el gas radón transportado por ella, en disolución, no se desintegre por completo antes de llegar a la naciente, entonces se podrá encontrar una cantidad medible de radón en este lugar. Por ello, los acuíferos termales deben ser considerados sitios de interés para efectuar mediciones de las concentraciones de radón, pues estos pueden llevar más rápidamente la señal geoquímica a la superficie, donde generalmente se instalan los equipos de medición (García-Vindas, 2001).

El estudio se realiza en el complejo volcánico Santa Ana, Izalco y Coatepeque, específicamente en el cerro Pacho, el cual tiene como característica la presencia de fumarolas y un acuífero termal que desemboca en la caldera Coatepeque, posiblemente como producto de procesos de infiltración de aguas meteóricas. Contenidos de radón han sido estudiados en los suelos del cerro Pacho, encontrando concentraciones en el rango de 0,22 a 50,6 Bq/L, actividades que evidencian las anomalías propias de sistemas hidrotermales (Olmos et al., 2006).

En el presente trabajo de investigación, se validó la metodología analítica que ha permitido obtener datos de las mediciones mensuales de radón (Rn^{222}) durante los meses de junio de 2011 a marzo de 2013 en las aguas termales del cerro Pacho; zona conocida por sus volcanes activos los cuales forman parte de la cadena volcánica de El Salvador. Adicionalmente, durante el periodo de julio de 2012 a marzo de 2013 estos radionucleidos se comparan con los registros de las precipitaciones mensuales, el contenido de cloruros y TDS.

Paralelamente se realizan las mediciones de radio (Ra^{226}) durante todo 2012. Existe escasa literatura de la medición de radio como elemento que permita identificar señales previas antes de actividad sísmica o volcánica. Sin embargo, en el presente estudio se realiza la medición del radio debido a que es un radionucleido asociado a las emisiones de radón (Rn^{222}), permitiendo conocer el aporte de dichos isótopos desde el manantial térmico en estudio hacia la caldera Coatepeque, como cuerpo de agua superficial.

METODOLOGÍA

Sitio de estudio

Después de procesos de formación y deformación volcánica, junto a actividades efusivas y plinianas durante los periodos del Terciario y Cuaternario, se desarrolló una serie de fenómenos en todo el complejo volcánico Santa Ana-Izalco-Coatepeque, hasta la formación de la caldera que hoy se conoce. La caldera Coatepeque ($13^{\circ}87'N$, $89^{\circ}55'O$) contiene el lago del mismo nombre, (que significa “*cerro de Culebras*” en lenguaje náhuatl), tiene una superficie de 25,3 km² con un largo máximo del eje sur hacia el norte de 7,1 km y una distancia de 5,0 km de oeste a este. Cuenta con una profundidad máxima de 110 m (FORGAES & SNET, 2006). El periodo de activación de la cámara magmática de la caldera finalizó cerca del año 8 mil a.C. con la formación del cerro Pacho (Fig. 1). Este es un domo de lava o domo tapón el cual es un montículo aproximadamente circular que se originó en una erupción lenta de lava viscosa de la cámara magmática (Pullinger, 1998).

En la figura 1 se detalla la zona de estudio, las curvas de nivel muestran que la topografía puede influir en el flujo del agua subterránea en dirección W-E, desde las faldas del volcán Santa Ana, pasando por el cerro Pacho y descargando hacia el lago de Coatepeque.

Medición de radón (Rn^{222})

El método para la cuantificación de radón es el estandarizado por la norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*) D5072-09 aplicado a matrices de agua potable (ASTM, 2009). Dicho método fue adaptado a las condiciones del tipo de muestra y los recursos de laboratorio disponibles. Para el muestreo se utiliza una botella plástica de polipropileno con tapón de hule de volumen de 1 L, la recolección de la muestra se

lleva a cabo de modo manual eliminando burbujas de aire dentro del recipiente debido a interacción aire-agua.

La muestra es llevada al laboratorio el mismo día del muestreo para reducir efectos de decaimiento. Se agregan a la muestra 40 mL de coctel centellador a base de solvente tolueno, el cual contiene los fluoróforos de PPO (2,5-Difeniloxazol) y POPOP (1,4-Bis-2-(5-fenilo-xazolil)-benceno), en concentraciones previamente evaluadas de 4,0 g y 0,01 g, respectivamente. Se agita vigorosamente la mezcla (agua-coctel) durante 1 minuto, de tal forma que el coctel centellador se hace pasar por todo el volumen de la muestra, luego de la separación de las fases se extraen 20 mL de coctel a un vial PET (polietilentereftalato), el vial se sella y limpia con un paño impregnado con alcohol, dejándolo en reposo durante 3 horas en oscuridad, durante este tiempo el radón alcanza el equilibrio secular con sus descendientes. Seguidamente, el vial se coloca en un contador de centelleo líquido modelo TRI-CARB 2100 TR y se analiza a ventana abierta en todo el espectro (0 a 2000 KeV) durante 60 minutos. El equipo de centelleo líquido tiene una eficiencia de detección calculada del 91% para radón y sus descendientes.

El factor de calibración adimensional utilizado es de $1,06 \pm 0,03$, calculado a partir de material de referencia certificado de radio (Ra^{226}) del NIST (*National Institute of Standards and Technology*), que está en equilibrio secular con su descendiente radón (Rn^{222}). El método tiene una eficiencia de extracción de radón del 24% utilizando coctel centellador a base tolueno. La precisión de patrones preparados a partir del material de referencia anterior es de 8,2%, con un sesgo de 2,5%; valores dentro del límite de exigencia de la norma ASTM D5072-09. Los conteos de fondo son 45,55 cpm (cuentas por minuto) para el blanco de agua destilada, obteniendo un límite de detección de 0,068 Bq/L para muestras de 1 L de volumen, con un rango lineal de medición de 0,01 a 2,0 Bq/L y una incertidumbre de la concentración de radón menor al 10%.

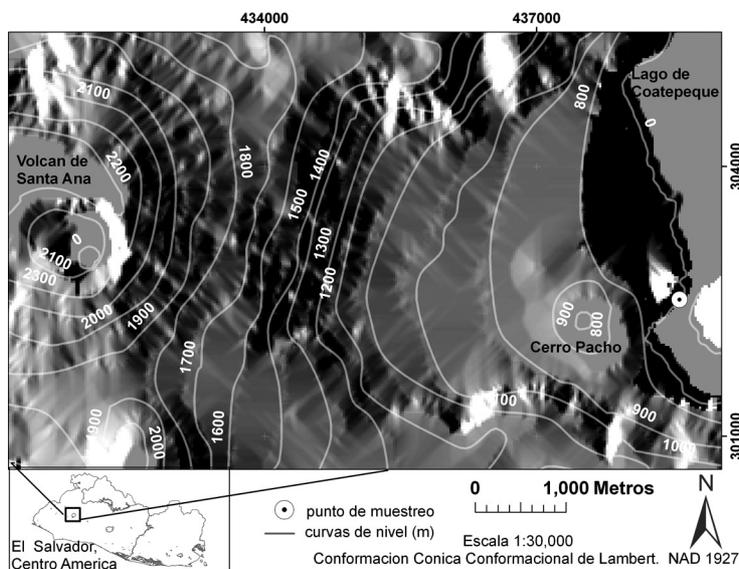
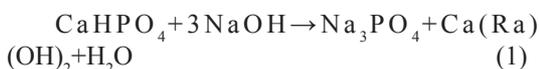


Fig. 1: Fuente termal del cerro Pacho, caldera Coatepeque, El Salvador.

Medición de radio (Ra^{226})

El método utilizado para la cuantificación de radio (Ra^{226}) en agua es el sugerido en el Proyecto RLA/5/0/48 de armonización de métodos de ARCAL (Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y Tecnología Nucleares en América Latina) (OIEA) (ARCAL, 2006), el cual extrae el radio (Ra^{226}) de la muestra mediante la precipitación del elemento como hidróxido, aprovechando la similitud química del radio con el calcio. Procedimiento resumido mediante la ecuación química siguiente:



Durante la implementación del método se realizaron algunas modificaciones principalmente al volumen de muestra y modo de separación del precipitado, debido a las condiciones de laboratorio. La recolección de la muestra se realiza en una botella plástica de 1 L, ésta se filtra y se acidifica para evitar efectos de auto-absorción. Se realiza el procedimiento agregando 200 mg de $CaHPO_4$

en condiciones ácidas hasta disolución completa y posterior coprecipitación en condiciones básicas mediante NaOH al 2,5 N, el punto final de la precipitación es a pH 10, el precipitado se deja reposar durante toda la noche, se decanta y se coloca en viales de vidrio donde se mezcla con coctel centellador a base tolueno en proporción 10:10 mL, el vial se sella y se permite el equilibrio secular de radio (Ra^{226}) y radón (Rn^{222}) durante 30 días para su posterior medición durante 1000 minutos.

Precipitando el radio como hidróxido $Ra(OH)_2$ se obtiene una recuperación del 100% del elemento, con un 85% de detección en el equipo de centelleo líquido; el procedimiento es realizado a partir de la medición indirecta de radio (Ra^{226}) por medio de su descendiente radón (Rn^{222}). El factor de calibración adimensional utilizado para la cuantificación es de $4,23 \pm 0,04$ a partir de material de referencia de radio (Ra^{226}) del NIST. El límite de detección obtenido para muestras de 1 L de volumen con un conteo de 1000 minutos es de 0,0042 Bq/L, con una precisión de 6,8% y una incertidumbre de la medición menor al 10%, calculada a partir de un modelo matemático basado en la ecuación utilizada en el método armonizado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Identificación de radón

En la figura 2 se muestra la identificación cualitativa del radionucleido radón, comparando el espectro de este y su progenie, de acuerdo a referencias bibliográficas (Kappel et al., 1993) y el espectro que presenta el contador de centelleo líquido utilizado.

En el espectro de referencia se identifican los picos correspondientes a los emisores de energía alfa de radón (Rn^{222}) y polonio (Po^{218} y Po^{214}), de igual forma aparecen estos picos en el espectro de la muestra en las regiones energéticas respectivas. Los valores de quenching de las muestras registran 875 ± 25 unidades con respecto al valor de referencia de 1000, esto evidencia escasos efectos de quenching presentes en el análisis.

Otro parámetro tomado en cuenta es el cálculo del semiperíodo ($T_{1/2}$) experimental, para determinar la selectividad del método con respecto a la medición de radón y su progenie. El semiperíodo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda \quad (2)$$

Para obtener el valor de la constante de desintegración (λ) se utiliza la ecuación:

$$\lambda = \ln(N_0 / N) / t \quad (3)$$

El valor de N_0 y N lo representan los conteos iniciales y finales registrados por el contador de centelleo líquido y el valor de t es el tiempo final menos el inicial en la medición.

El semiperíodo experimental para los primeros 6 análisis de radón es cercano al teórico de 3,82 días, con un promedio de 3,87 días y un sesgo del 10%. El valor experimental del semiperíodo y el espectro de medición de la figura 2 indican la presencia en disolución del gas radón en el punto de muestreo.

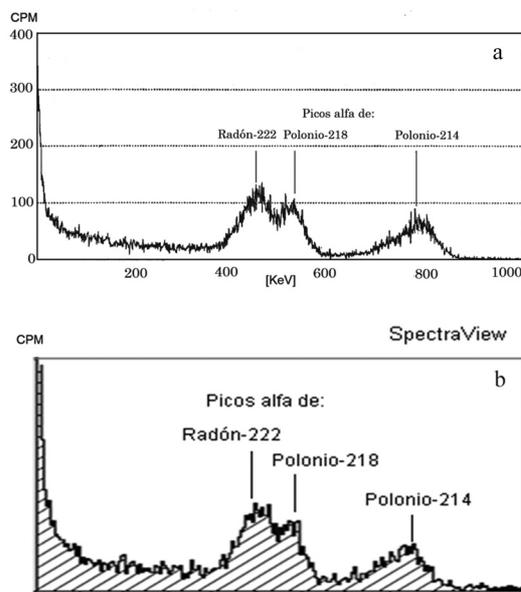


Fig. 2. Espectro de radón y su progenie. A) Espectro de referencia. B) espectro medición de radón en contador TRI-CARB 2100 TR, software SpectraView versión 1,3.

Radón y radio en el cerro Pacho

El monitoreo de las aguas termales del cerro Pacho se realizó durante junio de 2011 a marzo de 2013, las muestras se colectaron a temperatura de $60^\circ C$ aproximadamente. El cuadro 1 muestra las concentraciones de radón encontradas en el agua termal del cerro Pacho. La concentración de radón (Rn^{222}) durante el periodo de medición registró un promedio de $1,24 Bq/L$ con una desviación estándar de $0,29 Bq/L$.

La concentración de radio (Ra^{226}) en las aguas termales del cerro Pacho durante el año 2012 se encuentra por debajo del límite de detección o actividad mínima detectable (AMD) de $4,2 mBq/L$, determinada para muestras de 1 L de volumen. Por lo que, en el espectro de la muestra no se observaron los picos correspondientes a radón y sus descendientes.

Radón y sismicidad

Según las estadísticas elaboradas en China, el 70% de los terremotos son precedidos por anomalías de radón perceptibles en el suelo, aire o en agua subterránea. Sin embargo, el 40% de las anomalías de radón detectadas no son acompañadas por terremotos (IAEA, 1993).

Antes de la ocurrencia del terremoto, cuando aumenta la tensión regional, formación de microfisuras en macizos rocosos podría causar un aumento en la superficie de las rocas. Como resultado, se eleva la concentración de radón en el agua subterránea (Kuo et al., 2006).

Relación de radón con eventos sísmo tectónicos y de subducción.

Durante el periodo de monitoreo de radón en las aguas termales del cerro Pacho se registraron 107 eventos en la zona de interés, el cual comprende los departamentos de Ahuachapán, Sonsonate y Santa Ana, en la región occidental de El Salvador. De los eventos sísmicos 59 fueron sísmos tectónicos originados en la zona de la cadena volcánica del país, eventos con magnitud entre los 2,0 a 3,8 en la escala Richter; y 48 fueron sísmos de subducción con magnitud entre los 3,5 a 5,1 en la escala Richter, ocurridos en la zona de convergencia entre la placa de los Cocos y el Caribe. En el cuadro 1 se muestra el número de eventos ocurridos por mes.

Se realiza una comparación entre la concentración de la actividad de radón (Fig. 3a) y la magnitud de los eventos sísmicos tectónicos (Fig. 3b) y de subducción (Fig. 3c).

La figura 3b muestra que las concentraciones de radón durante 2011 se encuentran en el rango de ± 1 desviación estándar (s); la medición para el mes de enero de 2012 muestra una disminución por debajo de $1s$, sin embargo, no se evidencia la presencia de sísmos tectónicos o de subducción relacionados a dicha variación.

El año 2012 registra mayor actividad sísmica tectónica con un aumento para el mes de julio, presentándose un sísmo de 4,2 de magnitud (Fig. 3b), no obstante, para los meses cercanos a dicho

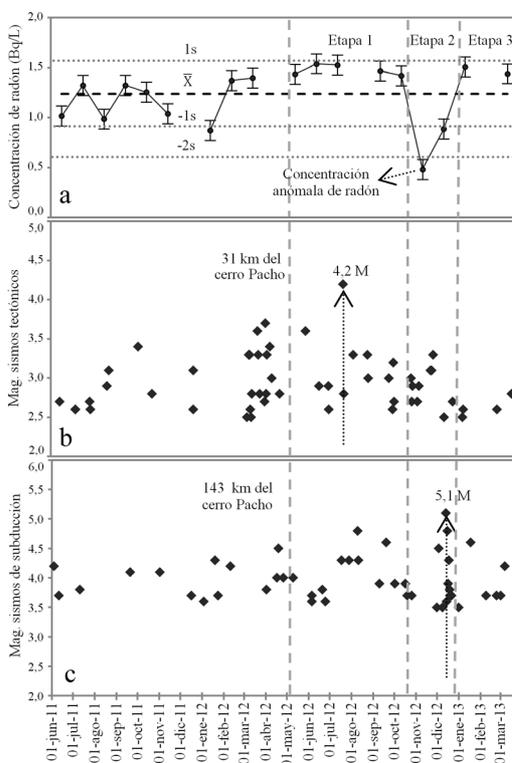


Fig. 3: Variaciones de la concentración de radón en fuente termal del cerro Pacho(a), comparadas con los sísmos tectónicos (b) y de subducción (c).

evento la actividad de radón no registra una variación significativa que sobrepase el valor de $\pm 1s$, por lo que no se observa contribución de los eventos tectónicos mayores en los contenidos de radón de las aguas termales del cerro Pacho.

En la figura 3c se muestra que para el año 2012 se registran la mayor cantidad de eventos de subducción, registrándose un aumento para el mes de diciembre con 12 sísmos, teniendo un evento máximo de 5,1 de magnitud frente a la costa del departamento de Sonsonate, con distancia epicentral de 143 km a la caldera Coatepeque. Un mes antes se registra un evento anómalo (según prueba estadística de Grubbs), el cual registró una disminución en casi 2/3 de la concentración de radón, con respecto al valor promedio.

Durante el periodo de medición, el comportamiento de radón en las aguas termales del cerro Pacho tiende a concentraciones bajas antes de eventos de subducción mayores. Sin embargo, los

Cuadro 1

Resultados mensuales de la concentración de la actividad de radón (Rn^{222}) y radio (Ra^{226}) en las aguas termales del cerro Pacho adjunto con la actividad volcánica, precipitación acumulada y sismos de la zona.

Mes de medición	Día de medición	Temp. agua termal (°C)	Concent. de radón (^{222}Rn) Bq/L	Concent. de radio (^{226}Ra) Bq/L	Microsismos	Sismos volca-no-tectónicos	Sismos tectónicos	Sismos de subducción	Precipitación acumulada (mm)
Junio-2011	16	60	1,02	--	178	16	1	2	341,3
Julio-2011	26	59	1,32	--	68	79	4	1	461,7
Agosto-2011	19	60	0,99	--	121	2	2	0	390,1
Septiembre-2011	29	61	1,32	--	89	9	0	1	175,1
Octubre-2011	14	60	1,25	--	103	15	2	0	906,5
Noviembre-2011	22	59	1,04	--	52	3	0	1	60,9
Diciembre-2011	m.n.r.	75	7	2	1	0,0			
Enero-2012	19	62	0,87	n.d.	78	11	0	3	0,5
Febrero-2012	23	60	1,37	n.d.	172	6	0	1	0,0
Marzo-2012	22	59	1,40	n.d.	163	12	16	0	42,7
Abril-2012	m.n.r.	116	5	3	4	95,8			
Mayo-2012	15	61	1,43	n.d.	106	11	1	1	247,2
Junio-2012	14	60	1,54	n.d.	124	10	3	4	110,9
Julio-2012	04	59	1,53	n.d.	110	18	3	2	322,8
Agosto-2012	m.n.r.	139	6	2	2	482,3			
Septiembre-2012	14	62	1,47	n.d.	243	27	4	2	332,3
Octubre-2012	01	60	1,42	n.d.	114	7	5	4	239,5
Noviembre-2012	09	61	0,48	n.d.	168	4	3	1	0,0
Diciembre-2012	12	60	0,89	n.d.	175	7	4	12	10,3
Enero-2013	28	63	1,51	--	129	13	0	1	0,0
Febrero-2013	m.n.r.	161	16	1	2	11,7			
Marzo-2013	07	61	1,44	--	144	6	2	3	0,0

n.d. = No se detectó el isótopo de radio (^{226}Ra) con un nivel de confianza del 95%.

m.n.r.= medición no realizada

Temp. = temperatura; Concent. = concentración

mecanismos y las condiciones geológicas para la interpretación de anomalías en la concentración de radón antes de eventos sísmicos son escasamente discutidos en la literatura.

De acuerdo a Kuo et al., (2006) dicho comportamiento puede concebirse a través de 3 etapas, las cuales se muestran en la figura 3a. En la etapa 1, la concentración de radón en el acuífero termal es estable y posiblemente exista una acumulación de tensiones tectónicas, que produzca un lento y constante aumento de la tensión efectiva (relación de la presión que existe entre cada partícula de suelo). Dependiendo de las condiciones geológicas en que se encuentra el agua termal del cerro Pacho, la dilatación de las masas de rocas frágiles pueden ocurrir y producir una saturación de gas (compresión del gas en las fisuras de la roca que se produce antes de que el agua circundante lo llene). Durante la etapa 2 el radón en el agua termal se volatiliza mediante la fase gaseosa. La concentración de radón en el agua termal comienza a disminuir y alcanza un valor mínimo. La etapa 3 se inicia en el punto de la concentración mínima de radón, la saturación de agua en la grietas de la roca y poros comienza a aumentar de nuevo. En esta etapa, la concentración de radón en las aguas termales aumenta y se recupera a niveles previos antes del evento sísmico. El descenso de la concentración de radón puede ser causado por el movimiento de sacudida de la corteza de la zona del hipocentro del sismo.

Relación de radón con eventos microsísmicos y sismos volcano-tectónicos

El punto de monitoreo de las aguas termales del cerro Pacho se encuentra ubicado en un complejo volcánico, donde sobresalen los volcanes activos Santa Ana e Izalco. En la figura 4 se analiza la actividad sísmica-volcánica en relación a la concentración de radón en la fuente termal.

Los eventos sismo-volcánicos comprende la microsismicidad (asociados a la presión de gases de la zona volcánica) y sismicidad volcano-tectónica (relacionados a la fractura de rocas por el desplazamiento de material magmático). Los registros respectivos fueron obtenidos de

la estación sismográfica de San Blas, ubicada a 6 km al oeste del cerro Pacho, perteneciente a la red de vigilancia sísmica del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET).

El número total de microsismos y sismos volcano-tectónicos durante el periodo de monitoreo es de 3118, con magnitudes en el rango de 1,0 a 2,5 en la escala Richter; el número de eventos mensuales se registran en el cuadro 1. De estos, 2828 corresponden a actividad microsísmica y 290 a sismos volcano-tectónicos.

En la figura 4b se registran 2 eventos sismo volcano-tectónicos, el primero se registró en el mes de julio de 2011 producto de la activación de fallas geológicas a 10 km de distancia del cerro Pacho, la liberación de energía del fenómeno días antes aumentó hasta 3 veces el valor promedio, llegando a registrarse un máximo de 19 eventos. Sin embargo no se observó una disminución o aumento de radón que sobrepase el valor de $\pm 1s$. El segundo evento se registró a finales del mes de septiembre de 2012 con un aumento de 5 veces el valor promedio de sismos volcano-tectónicos, producto de un pequeño enjambre sísmico ubicada 10 km al noroeste del cráter del volcán Santa Ana, con duración de 2 horas y media, el cual produjo 12 eventos en el rango de 1,4 a 2,8 de magnitud en la escala Richter. Una semana después del evento la concentración de radón para el mes de octubre se encuentra cercana al promedio, sin embargo, 40 días después del enjambre sísmico la medición realizada el 09 de noviembre de 2012 registra un valor anómalo en la concentración de radón.

La figura 4c muestra el número de microsismos registrados durante el periodo de medición. De igual manera, durante el enjambre sísmico de finales del mes de septiembre de 2012 se registra un aumento de hasta 24 eventos por día. Por lo que, el enjambre sísmico produjo un aumento del número de sismos volcano-tectónicos y de microsismos de la zona. Posteriormente, se verifica un incremento de actividad microsísmica de 5 veces para el mes de febrero de 2013, la medición de radón correspondiente al mes de marzo no registra aumentos o disminuciones, posiblemente para el mes de abril de 2013 se podría observar una variación de radón, si el comportamiento de éste fuese

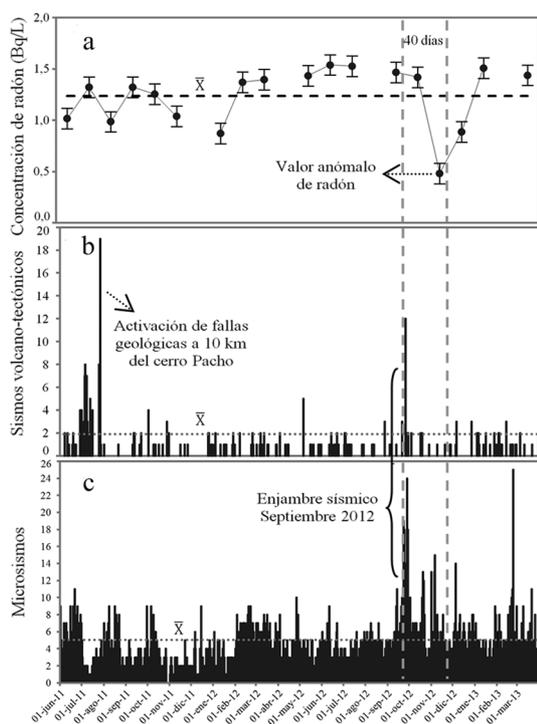


Fig. 4: Comparación de la concentración de radón (a) con el número de sismos volcano-tectónicos (b) y microsismos (c) del complejo volcánico Santa Ana-Izalco-Coatepeque.

sucesor a eventos sísmicos-volcánicos.

Relación de radón con las precipitaciones, cloruros y TDS

Si bien las anomalías en las concentraciones pueden ser interpretadas como precursoras de eventos sísmicos mayores, la interpretación de los datos que se obtienen es bastante compleja, pues existen diversos parámetros externos que influyen en la emanación de este gas. Estas variables son principalmente la lluvia, la presión atmosférica y la temperatura (García-Vindas, 2000).

Para evaluar la influencia de la lluvia sobre el contenido de radón, se obtiene el registro de la precipitación acumulada mensual en la caldera Coatepeque (SNET); datos que se muestran en el cuadro 1.

La figura 5 muestra que para el año 2012 se registró una época lluviosa normal en comparación a los efectos que tuvo la tormenta 12-E a mediados

de octubre del año 2011, la cual elevó significativamente los niveles del agua de la caldera Coatepeque. Durante el periodo de monitoreo las precipitaciones no influyen significativamente sobre las mediciones de radón en la fuente termal del cerro Pacho, de acuerdo al valor del coeficiente de correlación, el cual no supera el 95% de confianza.

Paralelamente, durante los meses de julio de 2012 a marzo de 2013 se analizan los contenidos de sólidos totales disueltos, TDS, y los iones cloruros mediante la evaporación de la muestra y utilizando el método argentométrico, respectivamente. Una comparación entre la concentración de radón para dicho periodo con los parámetros mencionados se muestra en la figura 6.

Los contenidos de TDS (Fig. 6b) registran un aumento una semana después del enjambre sísmico, lo que sugiere un aporte de material sólido y gases al acuífero, posiblemente debido al transporte de mayor contenido de sales disueltas, como carbonatos, sulfatos, fosfatos, etc., exceptuando los cloruros (Fig. 6c) debido a que la medición no presentó mayor variación en el mismo periodo. Después de 40 días los contenidos de TDS vuelven a valores promedio, sin embargo, se muestra una disminución del contenido de radón, con condiciones similares para el contenido de cloruros. Después de dicho fenómeno, el comportamiento del acuífero termal vuelve a estabilizarse a concentraciones dentro de $\pm 1s$ del valor promedio, y de igual forma lo hacen los contenidos de cloruros. Se evalúa el comportamiento similar entre la concentración de radón y cloruros mediante análisis de correlación, encontrándose un valor significativo a un 95% de confianza ($r=0,7592$). Comprobándose la relación de radón (Rn^{222}) con otros parámetros geoquímicos; como sucedió momentos antes de la erupción del volcán Santa Ana el 1 de octubre de 2005, registrándose cambios en las concentraciones de las especies hidrogeoquímicas: pH, cloruros, fluoruros y sulfatos (Funes et al., 2009).

Relación de radio y la sismicidad

Debido a que la actividad de radio (Ra^{226}) no fue detectada empleando el método y técnica descrita, no es posible relacionarlo con los eventos

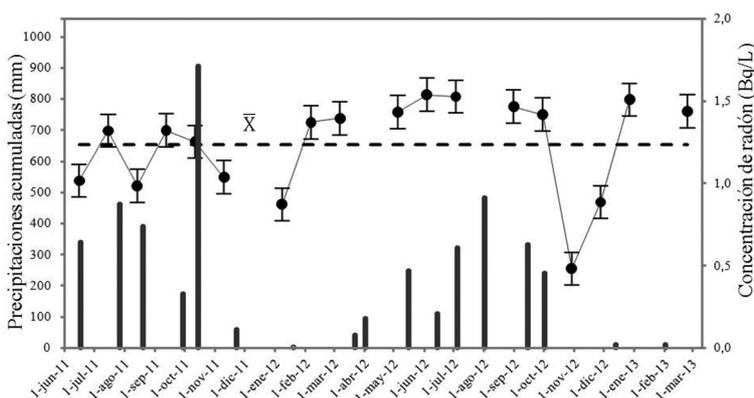


Fig. 5: Comparación de la concentración de radón y el nivel de precipitación acumulada mensualmente.

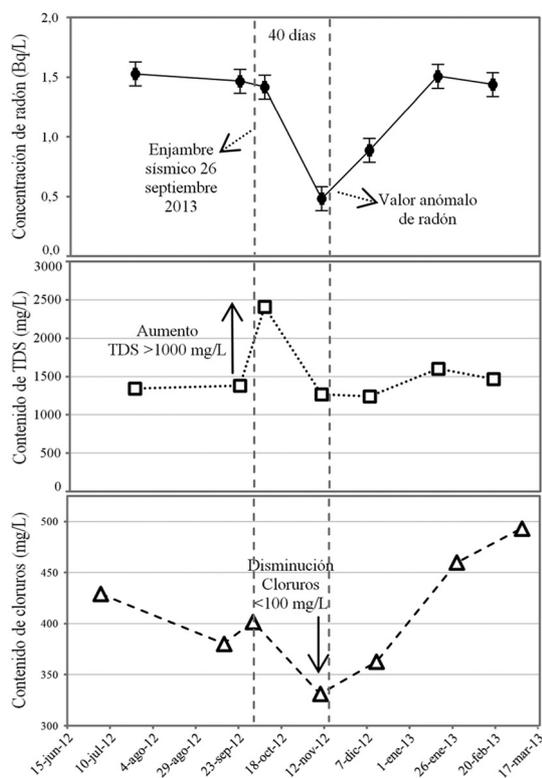


Fig. 6. Comparación de la concentración de radón (a) con el contenido de TDS (b) y los cloruros (c) en las aguas termales del cerro Pacho.

sísmicos ocurridos, a pesar de las fluctuaciones de su descendente radón y las variaciones en los TDS; las mediciones se encuentran dentro del conteo de fondo del blanco.

CONCLUSIONES

El aporte fundamental de este trabajo es la implementación y adaptación de métodos para la cuantificación de radionucleidos como: radón (Rn^{222}) y radio (Ra^{226}) en matrices acuosas, aplicando la técnica de centelleo líquido; contribuyendo a la vigilancia volcánica con la construcción de la línea base de la radiactividad de las aguas termales del cerro Pacho.

Durante la realización de este estudio el comportamiento del acuífero termal del cerro Pacho tiende a disminuciones en las concentraciones de radón ante eventos sísmicos. No se tiene claridad si el valor anómalo de radón registrado se debe a la influencia de actividad volcánica y/o sismos de subducción; por lo que, es necesario dar continuidad al monitoreo con intervalos menores de medición, aportando una mayor cantidad de datos que permitan identificar la tendencia del acuífero ante eventos sísmicos.

Cuadro 2
Concentración de radón (Rn^{222}) en puntos aledaños al cerro Pacho, caldera Coatepeque.

Punto de muestreo	Fecha	Coordenadas	Temperatura del agua (°C)	Concentración de radón (Bq/L)
Agua termal 1	15/05/2012	13°50'25,19" N 89°34'13,86" W	45	0,72 ± 0,08
Agua termal 2	15/05/2012	13°50'23,84" N 89°34'13,4" W	35	1,10 ± 0,09
Pozo 1	12/12/2012	13°51'38,07" N 89°34'25,07" W	38	1,42 ± 0,10
Pozo 2	12/12/2012	13°53'29,90" N 89°33'7,54" W	29	1,46 ± 0,10

La validación de la metodología analítica para la cuantificación de radón (Rn^{222}), permite disponer de un método confiable para expandir la línea de investigación a fuentes de aguas cercanas a la cadena volcánica de El Salvador, con la finalidad de establecer una red de vigilancia radiológica que permita conocer el comportamiento de este con la actividad sísmica. Es así, como durante el monitoreo de las aguas termales del cerro Pacho, se exploraron dos afluentes adicionales de agua termal en la zona y dos pozos de aguas subterráneas en los alrededores de la caldera Coatepeque. En el cuadro 2 se muestran las concentraciones de radón medidas en diversas fechas en dichos puntos, con el propósito de documentar la presencia de radón (Rn^{222}) en disolución acuosa; estos puntos se deben considerar para establecer una red de monitoreo en la zona.

Las mediciones de radio (Ra^{226}) no superaron el límite de detección del método implementado, se asume que las condiciones hidrogeoquímicas del acuífero no promueven la movilización de este isótopo en disolución, considerando los hallazgos citados por Bolton (1998), en concentraciones detectables con la técnica de centelleo líquido; es necesario realizar la medición de radio (Ra^{226}) con técnicas más sensibles, como por ejemplo, espectrometría alfa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal del Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares (CIAN) de la Universidad de El Salvador, por la iniciativa en abrir esta línea de investigación y permitir el uso del equipo de laboratorio e insumos de centelleo líquido para la medición de los radionucleidos en estudio; así también, aprecian la colaboración del Centro de Investigaciones en Ciencias Atómicas, Nucleares y Moleculares (CICANUM) de la Universidad de Costa Rica, por el aporte del material de referencia de radio (Ra^{226}) del NIST, con el cual se calibraron los métodos y se cuantificó la actividad de radón y radio. Además, manifiestan un especial agradecimiento al Dr. Luis Loría por sus oportunos comentarios y correcciones al trabajo escrito, y al SNET por proporcionar los datos de las precipitaciones y sismos aledaños a la zona de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCAL, 2006: Evaluación de la implementación del Manual de Procedimientos Técnicos Armonizados para la Determinación de la Contaminación Radiactiva en Alimentos.- Congr. ARCAL LXXIX, Proyecto RLA/5/048. Acapulco, Mexico: 88:101.

- ASTM, 2009: Standard test method for radon in drinking water.- 5 págs, D5072-09.
- BOLTON, D., 1998: Occurrence and distribution of radium, gross alpha-particle activity, and gross beta-particle activity in ground water in the Magothy Formation and Potomac group acuífers, upper Chesapeake Bay area, Maryland.- [Resumen] <http://www.mgs.md.gov/hydro/radsum.html>. [Consulta: 20 de marzo de 2013].
- FORGAES & SNET, 2006: Investigaciones hidrogeológicas, hidrológicas e hidroquímicas en el Lago Coatepeque.- 26 págs. Unión Europea [Resumen ejecutivo].
- FUNES, R., HERNÁNDEZ, A., BARAHONA, F., OLMOS, R., HENRÍQUEZ, B., CARTAGENA, R., ORELLANA, N. & LÓPEZ, D., 2009: Evolución hidrogeoquímica del manantial térmico en el sector suroeste de la Caldera de Coatepeque. El Salvador. Centro América.- [Resumen] Congr. II Seminario científico de la Universidad de El Salvador, Consejo de Investigaciones Científicas, San Salvador: 20.
- GARCÍA-VINDAS, J. R., LORÍA, L. G., & JIMÉNEZ, D. R., 2000: Ejemplo de anomalías del radón 222, como precursoras de eventos sísmicos en Costa Rica.- *Rev. Geol. América Central*, 23: 87-96.
- GARCÍA-VINDAS, J.R., 2001: Estudio experimental del tiempo de disolución del Rn-222 en agua y algunas implicaciones en la geología.- *Rev. Geol. América Central*, 24: 87-92.
- IAEA, 1993: Isotopic and geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruptions.- 155 págs. IAEA, Viena (Austria). <http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/>. [Consulta: 15 de abril de 2013].
- KUO, T., FAN, K., KUOCHEN, H., HAN, Y., CHU, H., & LEE, Y., 2006: Anomalous decrease in groundwater radon before the Taiwan M6.8 Chengkung earthquake.- *J. Environ. Radioactivity*, 88: 101-106.
- KAPPEL, R.J., KELLER, G., KREIENBROCK, L. & NICKELS, R., 1993: An epidemiological study using passive radon measurement by liquid scintillation counting.- *RADIOCARBON* 1993: 319-23.
- OLMOS, R., BARAHONA, F., HENRÍQUEZ, B., BENÍTEZ, E., HERNÁNDEZ, A., HERNÁNDEZ, P., PÉREZ, N. & LÓPEZ, D., 2006: Anomalías de radón y torón en el cerro Pacho (Caldera de Coatepeque) y en el cráter del volcán Santa Ana, El Salvador. *América Central*.- Congr. Seminario para la difusión de los resultados de la cooperación Argentina-Italia en ciencia y tecnología. Buenos Aires: 24-25.
- PULLINGER, C. 1998: Evolution of the Santa Ana volcanic complex, El Salvador.- 134 págs. Michigan Technology University, Michigan [Tesis M.Sc].

