

VARIACIÓN ESPACIAL DE LA COMPOSICIÓN DE ^{222}Rn EN LOS ACUÍFEROS BARVA Y COLIMA SUPERIOR, COSTA RICA

SPATIAL VARIATION OF ^{222}Rn COMPOSITION WITHIN THE BARVA AND COLIMA SUPERIOR AQUIFERS, COSTA RICA

Ricardo Sánchez-Murillo^{1, 2*}, Miguel Delgado¹, Diego Espinach¹, Marcela Lobo¹, Fabián Madrigal¹, Adolfo Morera¹, Karla Rojas¹, Wendy Sáenz¹, Susana Ugalde¹, Brayan Umaña¹, Roy Pérez¹, José Mora¹, Germain Esquivel^{1, 2}, Christian Birkel^{3, 4}, Franz Ulloa⁵, Luis D. Rojas⁵ & Guillermo E. Alvarado⁶

¹Escuela de Química, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 86-3000

²Grupo de Investigación en Isótopos Estables, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 86-3000

³Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 11501-2060

⁴Northern Rivers Institute, University of Aberdeen, Aberdeen, Scotland, AB24

⁵Empresa de Servicios Públicos de Heredia, S. A., Heredia, Costa Rica

⁶Instituto Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica, 10032-1000

*Autor para contacto: ricardo.sanchez.murillo@una.cr

(Recibido: 02/01/2016; aceptado: 23/05/2016)

ABSTRACT: Radon (^{222}Rn) is a useful natural-occurring tracer to elucidate groundwater to surface water connectivity with important implications for human health. This study presents the first spatial distribution of ^{222}Rn in groundwater, surface water, and tap water within the Barva and Colima Superior aquifers of the Central Valley of Costa Rica. Forty samples were analyzed for ^{222}Rn , $\delta^{18}\text{O}$, and in situ electrical conductivity, water temperature, pH, and redox potential. High elevation springs presented a nearly-uniform ^{222}Rn composition ($21,3 \pm 17,5$ Bq/L). In groundwater wells, ^{222}Rn composition ranged from 2,0 up to 50,5 Bq/L. High ^{222}Rn concentrations in groundwater could be attributed to natural degasification within the local faults system. Tap water ^{222}Rn concentration ranged from 4,7 up to 30,8 Bq/L. These concentrations are greater than the maximum contaminant level (11,1 Bq/L) proposed by the Environmental Protection Agency of the United States of America for drinking water purposes. The use of intermediate water storage tanks prior

to the distribution to residential areas could improve water aeration and facilitate longer residence times resulting in lower ^{222}Rn levels. A nation-wide assessment is still required with particular interest in areas near active faults and volcanic activity.

Keywords: Costa Rica, Barva and Colima Superior aquifers, ^{222}Rn , $\delta^{18}\text{O}$, natural-occurring radioactivity, faults.

RESUMEN: El ^{222}Rn es un trazador natural que permite determinar la conectividad entre las aguas subterráneas y las superficiales. El estudio presenta el primer análisis espacial de ^{222}Rn en aguas subterráneas, superficiales y agua potable de la red de abastecimiento en los acuíferos Barva y Colima Superior en el Valle Central de Costa Rica. Se analizó la composición de ^{222}Rn , $\delta^{18}\text{O}$ y otras variables físico-químicas in situ en un total de 40 sitios de muestreo. En general, las nacientes de la zona norte presentaron una composición homogénea de ^{222}Rn con una concentración promedio de 21,3 Bq/L. La concentración de ^{222}Rn en los pozos varió entre 2,0 Bq/L y 50,5 Bq/L. Las altas concentraciones de ^{222}Rn en algunos pozos pueden atribuirse a la desgasificación profunda a través de los fallamientos locales. En la red de abastecimiento de agua potable, la concentración de ^{222}Rn varió entre 4,7 Bq/L y 30,8 Bq/L. Los valores encontrados en la red de abastecimiento, superiores al límite sugerido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (11,1 Bq/L) para agua de consumo humano, pueden atribuirse al corto tiempo de residencia del agua de extracción subterránea en la red de abastecimiento. La utilización de tanques de almacenamiento o captación permitiría aumentar el tiempo de residencia del agua antes de ingresar a la red de consumo, facilitando la pérdida de ^{222}Rn hacia la atmósfera o por decaimiento radioactivo. Asimismo, un análisis espacial es requerido a escala nacional, especialmente, en áreas de fallas activas o actividad volcánica.

Palabras claves: Costa Rica, acuíferos Barva y Colima Superior, ^{222}Rn , $\delta^{18}\text{O}$, radioactividad natural, fallas.

INTRODUCCIÓN

El ^{222}Rn es un gas natural radioactivo, perteneciente al grupo de los gases nobles, que puede ser encontrado en el suelo, las rocas, el agua y el aire. Es uno de los productos de la serie radioactiva del ^{238}U , el cual es un elemento que está presente en rocas de origen volcánico, y que al meteorizarse generan radón en distintas concentraciones (Jofré, 2011; Iglesias & Taboada, 2014; Moreno et al., 2014). El ^{222}Rn posee una vida media de 3,82 días, lo cual provoca una intensa y continua radiación natural, emitiendo partículas alfa (α) que decaen a ^{218}Po y finalmente a ^{206}Pb (Iglesias & Taboada, 2014; Moreno et al., 2014). Los átomos del radón generados dentro de los granos minerales, pueden difundirse en la zona instaurada del suelo y eventualmente alcanzar un estado de equilibrio termodinámico; para finalmente disolverse en la fase acuosa (Prasad et al., 2009; Jofré, 2011; Barbosa et al., 2015). Al ser soluble, se puede incorporar en los flujos de aguas subterráneas, superficiales e inclusive puede estar presente en las redes de distribución de agua potable. Con respecto al agua subterránea, la cantidad de radón disuelto depende de las

características hidráulicas del acuífero, como por ejemplo el tiempo de residencia (Moreno et al., 2014; Barbosa et al., 2015).

Los efectos del ^{222}Rn en la salud, se observaron por primera vez en la década de 1960, cuando se determinó la correlación entre el padecimiento de cáncer de pulmón con la exposición de los trabajadores en las minas de uranio (Prasad et al., 2009). Por el riesgo que presenta para la salud humana la inhalación de aire con concentraciones elevadas de ^{222}Rn , ha sido ampliamente monitoreado principalmente en aguas subterráneas (Cuadro 1). La mayor parte del ^{222}Rn inhalado se exhala, pero algunos productos del decaimiento radioactivo (^{218}Po , ^{214}Po) se depositan en los pulmones, provocando la exposición de las células a la radiación α (Iglesias & Taboada, 2014). Estudios recientes han demostrado la correlación entre el cáncer pulmonar y la exposición a altas concentraciones de ^{222}Rn (Hahn et al., 2015). Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas inglés), cerca del 10% de las muertes producidas por cáncer de pulmón en Estados Unidos se atribuyen a este gas noble (Iglesias & Taboada, 2014; Hahn et al., 2015). El límite máximo sugerido por la US EPA es de

Cuadro 1

Comparación de la concentración de ^{222}Rn (Bq/L) en aguas subterráneas en diferentes escenarios geológicos.

Ubicación	Tipo o formación geológica primaria	^{222}Rn (Bq/L)	Referencia
La Garrotxa, Gerona, España	Rocas volcánicas y no volcánicas cuaternarias	Rango: 0,8-26,0 Media: 11,4	Moreno et al., 2014
Cáucaso Occidental, Rusia,	Arcilla, calizas, limolita y arenisca	Rango: 0,4-86,7	Nevinsky et al., 2015
Acuífero Bauru, Sao Paulo, Brasil	Rocas sedimentarias y Volcánicas	Rango 0,7-15,0 Media: 3,1	Santos & Bonotto, 2014
Isla Sakhalin, Rusia	Areniscas, esquistó micáceo, cuarcita, limolita, toba volcánica.	Rango: 0,1-7,2 Media: 4,1	Chelnokov et al., 2015
Cuenca Limari, Coquimbo, Chile	Rocas calco-alcalinas	Rango: 1,4-11,0	Oyazún et al., 2013
Saint Lawrence, Canadá	Rocas alcalinas y calizas	Rango: 0,2-310 Media: 8,6	Pinti et al., 2014
Heredia, Costa Rica	Roca volcánicas y piroclastos	Rango: 25-51	Loria et al., 1995
Río Haughton, noreste de Australia	Sedimentos	Media: 13,7	Cranswick et al., 2014
Karnas, Estocolmo, Suecia	Rocas predominantes como granitos, gneis graníticos y arcillas	Rango: 1,2–15,0	Knutsson & Olofsson, 2002
Santa Barbara, Brasil	Rocas volcánicas alcalinas	Rango: 0,02–113 Media: 17,8	Bonotto, 2014
Arabia Saudita	Arenisca, limolita, lutita, caliza, dolomita	Rango: 0,29–29,7 Media: 6,2	Alabdula'aly, 2014
Cuenca del Paraná, Brasil	Areniscas, areniscas lodosas, basaltos, diabasas	Rango: 0,23–50,5 Media: 13,3	Bonotto, 2011
Deep Creek, Río Maribymong, Australia	Rocas volcánicas	Media: 1588	Cartwright & Gilfedder, 2015

11,1 Bq/L para ^{222}Rn en agua y 250 Bq/m³ en aire. Por su parte, la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011) recomienda 300 Bq/m³ en aire. Costa Rica no posee actualmente un reglamento para sustancias radioactivas de origen natural.

^{222}RN ASOCIADO AL VULCANISMO

El ^{222}Rn se considera un trazador útil de la actividad volcánica debido a su naturaleza de gas noble y su capacidad para ser transportado desde la profundidad de formaciones geológicas (p. ej. por gases portadores, tales como CO₂), sin ser alterado químicamente, donde las anomalías positivas o picos en la emisión de radón se han asociado con cambios en la actividad volcánica o estado de estrés del volcán (Neri et al., 2006) y eventos

sísmicos (Koike et al., 2014). Los ambientes volcánicos son complejos y, en mayor medida, suelen estar asociados a sistemas de flujo a lo largo de fallas (Barbosa et al., 2015). La actividad del ^{222}Rn es variable, por lo que las concentraciones generalmente son el resultado de diferentes tipos de deformación del edificio volcánico, incluyendo la inflación/deflación, la inestabilidad de los flancos y el fallamiento asociado con la abertura de fisuras eruptivas. Por ejemplo, los mecanismos de deformación se activan generalmente por una nueva fuente de magma en niveles sub-volcánicos, intrusiones de diques de poca profundidad y las inyecciones de fluidos hidrotermales dentro del edificio volcánico (Neri et al., 2006).

Por otro lado, Oyazún et al. (2013) realizó estudios en las formaciones volcánicas de la cuenca del río Limarí en Chile. Según este estudio, la

medición de la actividad de ^{222}Rn en agua es útil para establecer el tipo de interacción entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas poco profundas. A pesar del carácter calco-alcalino de las rocas volcánicas chilenas (es decir, con contenido de uranio intermedio), fue posible establecer los valores distintivos de las aguas superficiales y las aguas subterráneas en un rango entre 1400 y 11000 Bq/L (Oyarzún et al., 2013). Según Oyarzún et al. (2013), otras regiones del mundo (p. ej. el centro de la península Ibérica, el macizo Central en Francia o en el macizo de Bohemia en Alemania), con mayor porcentaje de rocas magmáticas alcalinas, pueden presentar concentraciones mayores de ^{222}Rn , lo cual beneficiaría la utilización de esta técnica en estudios de conectividad hidrogeológica.

El presente análisis presenta la primera evaluación espacial de la concentración de ^{222}Rn en el sistema de los acuíferos Barva y Colima Superior en el Valle Central de Costa Rica. Debido a la importancia de esta región como una de las principales zonas de recarga y abastecimiento de agua potable para la población del Valle Central de Costa Rica, es indispensable mantener un registro continuo de las concentraciones de ^{222}Rn en las fuentes de agua subterráneas. Los datos generados conformarán la línea base para futuras investigaciones hidrogeológicas, además de proveer niveles de referencia como insumo para la generación de regulación nacional relacionada con niveles de sustancias radioactivas naturales en agua y aire.

GENERALIDADES DEL VULCANISMO EN COSTA RICA

Costa Rica es parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, ubicado en el extremo sur de la Fosa Centroamericana al oeste de la placa del Caribe; entre el océano Pacífico y el mar Caribe. Ahí se presenta un límite destructivo donde la placa de Coco se subduce bajo la placa Caribe. Este proceso de subducción generó una actividad volcánica que dio origen a la Cordillera Volcánica Central, siendo uno de ellos el volcán Barva (Brenes, 2003). Esta formación presenta múltiples conos volcánicos, constituidos por rocas piroclásticas (p. ej. cenizas, bombas, brechas, entre otras),

lavas, depósitos laháricos y fluvio-lacustres locales. En Costa Rica, se han reconocido unos 400 focos volcánicos (entre activos, dormidos y extintos), de los cuales solamente unos 20 poseen formas juveniles. De ellos, los volcanes Rincón de la Vieja, Arenal, Poás, Irazú y Turrialba han mostrado periodos de actividad eruptiva en los últimos 400 años. Algunos de ellos manifiestan cierta actividad residual (p. ej. solfataras, hornillas, aguas termales, microtemblores) y morfologías recientes, que no les permite recibir aún el calificativo de extintos (Alvarado, 2009).

Historia eruptiva del volcán Barva

El macizo volcánico del Barva se ubica a 22 km al norte de San José y tiene una altitud de 2906 m. Es un escudo andesítico-basáltico complejo con una docena de focos eruptivos en su cima y varios conos secundarios en sus laderas. El área aproximada del macizo se extiende hasta los 1500 km²; es el volcán de América Central más grande en cuanto a su extensión (Alvarado, 2009). Según Alvarado y Gans (2012), la colada de lava más antigua del Barva corresponde a 1,2 Ma, de acuerdo a dataciones de Kr/Ar. El volcán Barva es el único de los cuatro grandes volcanes del Valle Central que no ha presentado actividad eruptiva en los últimos 500 años (Alvarado, 2009). Estudios recientes, según Arredondo y Soto (2006), demuestran que la actividad del Barva en los últimos 13 000 años es muy exigua. Según un estudio realizado por Brenes (2003), la clasificación de las lavas del volcán Barva varía entre basaltos con contenido medio y alto de potasio, hasta dacitas con contenido alto de potasio.

El área del volcán Barva está delimitada al N, NO, y SE por tres fallas. Dos de ellas están orientadas al SO-NE. Una atraviesa el cauce del río Poás, mientras que una segunda discurre a lo largo del río Ciruelas, presentando sismicidad (Protti, 1986). La tercera falla orientada hacia el NNO-SSE. Estas fallas se caracterizan por una fuerte expresión morfológica y por tener un registro de actividad sísmica en años (Brenes, 2003). Regionalmente, Montero (2000) define la falla de Alajuela como una estructura tectónica

de gran importancia en el Valle Central de Costa Rica, la cual atraviesa el flanco sur del macizo del volcán Barva.

ÁREA DE ESTUDIO

El sistema de acuíferos Barva y Colima Superior se encuentra ubicado entre las provincias de Heredia, San José y Alajuela, al SO del Parque Nacional Braulio Carrillo (Castro et al., 2011) y al NO de la cuenca del río Virilla, presentando una altitud que puede ir desde los 800 m hasta los 2906 m (Reynolds & Fraile, 2009), con un área superficial estimada de 275 km² (Figura 1). Esta región presenta dos épocas climáticas: época seca (diciembre-abril) y época lluviosa (mayo-noviembre), entre junio y julio se presenta una disminución de la precipitación producto del desplazamiento norte de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés), periodo denominado ‘veranillo’ o *Mid-Summer Drought* (Magaña et al., 1999). La precipitación media anual en el macizo del volcán Barva puede variar desde 1800 mm hasta 3500 mm (Ramírez R., 2007).

El sistema del acuífero Barva está formado por cuatro miembros hidrológicamente bien diferenciados: Miembro Bermúdez, constituido por lavas andesíticas fracturadas; Miembro Porrosatí y Carbonal, formado por arenas volcánicas gruesas y tobas arcillosas meteorizadas; Miembro Los Ángeles y Los Bambinos que comprende coladas de lava superiores y por último Miembro Cráter, el cual está constituido por piroclastos recientes (Ramírez & Alfaro, 2002). En cuanto a las características hidráulicas de la zona, ésta presenta un tipo de litología de coladas de lavas y tobas de aparente moderada conductividad, variando entre 1 y 10 m/d, un espesor saturado de 50-100 m en promedio, una transmisividad de 100-500 m²/día, un coeficiente de almacenamiento de 0,1 (Ramírez & Alfaro, 2002). Además del acuífero Barva, el área de estudio también abarca la Formación Colima, la cual incluye tres miembros: Miembro Belén, formado por varias coladas de lava andesíticas, separadas por mantos de toba lítica; Miembro Puente Mulas, constituido

por tobas e ignimbritas con estructuras columnares; Miembro Linda Vista, formado por dos capas lávicas de composición andesíticas, con textura brechosa o masiva fracturada (Ramírez, 2007). El acuífero Colima Superior se recarga desde el acuífero Barva a través de las tobas de la unidad conocida como Formación Tiribí y desde el acuífero de La Libertad por percolación vertical (Arias-Salguero et al., 2006). Las características hidráulicas que presenta esta formación son: litología de lavas fracturadas e intercaladas con capas piroclásticas: tipo acuífero o acuicierre, un espesor saturado mayor a 100 m, una transmisividad de 500 m²/día o mayores a 5000 m²/día, un coeficiente de almacenamiento de $1,5 \times 10^{-3}$ a 0,1 y una producción de pozo de 50-100 L/s o mayores (Ramírez & Alfaro, 2002).

MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis físico-químicos

El muestreo consistió en la recolección de 40 muestras de agua, incluyendo aguas subterráneas (i.e. manantiales y pozos, N= 32), aguas superficiales (N=3) y muestras en la red de abastecimiento de agua potable (N=5), cuya administración es realizada mayoritariamente por la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH, S.A.). El muestreo se realizó durante los meses de agosto, setiembre y octubre de 2015. En cada punto de muestreo se recolectó una muestra en botella de vidrio de 250 mL para el análisis de ^{222}Rn y otra en un vial de vidrio de 16 mL para el análisis de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. Las botellas y viales se llenaron completamente bajo el agua (i.e. evitando el contacto con la atmósfera) y cerrados herméticamente en el sitio sin presencia de burbujas de aire (Figura 2). Se determinaron in situ los siguientes parámetros: temperatura (°C), conductividad eléctrica (CE, $\mu\text{S}/\text{cm}$), sólidos disueltos totales (SDT, mg/L), pH y potencial de óxido-reducción (ORP, mV). La determinación de temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales se realizó mediante un equipo portátil marca HANNA, serie HI98311; mientras que el pH y el ORP se determinaron mediante un equipo portátil marca HANNA, serie HI98121.

El análisis isotópico ($\delta^{18}\text{O}$) se realizó utilizando un espectrómetro láser mediante la técnica de *Cavity Ring Down Spectroscopy* (CRDS, por sus siglas en inglés), modelo L2120-i (Picarro, USA). Los estándares secundarios empleados fueron: Moscow Tap Water, MTW ($\delta^2\text{H} = -131,4 \text{ ‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -17,0 \text{ ‰}$), *Deep Ocean Water*, DOW ($\delta^2\text{H} = -1,7 \text{ ‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -0,2 \text{ ‰}$), y *Commercial Bottled Water*, CAS ($\delta^2\text{H} = -64,3 \text{ ‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -8,3 \text{ ‰}$). Los estándares MTW y DOW se utilizaron para normalizar los resultados a la escala VSMOW2-SLAP2, mientras el CAS fue utilizado como control de calidad.

El ^{222}Rn se determinó empleando un espectrómetro de radiación alfa, modelo RAD7 *Radon Detector* (DurrIDGE Inc., USA) (Figura 3). El análisis fue realizado el mismo día de recolección de la muestra, en un periodo menor a 8 horas. El RAD7 consiste en un detector de estado sólido con un material semiconductor (usualmente silicio), el cual convierte directamente la radiación α en una señal eléctrica. El detector es capaz de determinar electrónicamente la energía de cada partícula α , siendo posible conocer exactamente que isótopo (p. ej. ^{218}P , ^{214}Po) produce la radiación, y a la vez permite distinguir el radón viejo del radón nuevo, el torio y la señal de ruido. La técnica es conocida como espectrometría α que permite el análisis de agua subterránea en un amplio rango de concentraciones. El aire introducido en la botella desplaza el radón contenido en la muestra, el cual es conducido a través de un tubo con material desecante ($<2\% \text{ CoCl}_2$, $\geq 98\% \text{ CaSO}_4$, *W. A. Hammond Drierite Company, LTD*), posteriormente es conducido al detector para realizar la lectura (DurrIDGE, 2015) (Figura 3). La humedad relativa presente en el aire introducido al detector osciló entre 10 y 20%. La concentración de ^{222}Rn se corrigió empleando un factor de corrección (DFC, por sus siglas en inglés) con base en el decaimiento radiactivo entre el tiempo transcurrido de la toma de muestra y el análisis. El cálculo de la concentración inicial de ^{222}Rn está basado en la cinética de desintegración radiactiva de segundo orden según la siguiente ecuación:

$$^{222}\text{Rn}_i = ^{222}\text{Rn}_t e^{(t/132,4)} \quad (1)$$

donde:

$^{222}\text{Rn}_i$ = concentración de radón en la muestra de agua.

$^{222}\text{Rn}_t$ = concentración de radón en la muestra de agua al tiempo t (es decir, en el instante del análisis).

132,4 = conversión por el decaimiento radiactivo.

t = tiempo transcurrido entre la hora de análisis de la muestra y la toma de la muestra, según se muestra en la siguiente ecuación:

$$t = (t_{\text{análisis}} - t_{\text{muestreo}}) \quad (2)$$

Análisis estadístico y espacial

Se realizó una matriz de correlación de Pearson con un nivel de confianza del 95% ($p = 0.05$) utilizando el programa *StatPlus:Mac* desarrollado por *AnalystSoft Inc.* (California, USA). Además, se determinó la relación entre aguas subterráneas y nacientes mediante un análisis de conglomerados con el software *InfoStat* versión 2014p, empleando el método de Ward (1963), cuya representación se basa en la distancia Euclídea entre las muestras. Para el análisis de conglomerados se incluyeron los siguientes parámetros: ^{222}Rn , $\delta^{18}\text{O}$, temperatura, conductividad eléctrica, pH y ORP. Los mapas de distribución espacial de $\delta^{18}\text{O}$, ^{222}Rn y ORP fueron elaborados con el software *ArcGIS* 10.3 (ESRI, USA).

RESULTADOS

El cuadro 2 muestra los resultados correspondientes a los pozos analizados. Las muestras presentaron una concentración promedio de ^{222}Rn de $19,1 \pm 16,1 \text{ Bq/L}$ (1σ). Los valores oscilaron entre $2,0 \text{ Bq/L}$ hasta los $50,5 \text{ Bq/L}$. Estos valores corresponden a los pozos Real Santa María y Joya II, respectivamente (Cuadro 2). La composición promedio de $\delta^{18}\text{O}$ fue de $-8,0 \pm 0,8 \text{ ‰}$ (1σ). El $\delta^{18}\text{O}$ fluctuó entre $-8,9 \text{ ‰}$ (Pozo Matasanos) hasta $-6,8 \text{ ‰}$ (Pozo Santa Cruz) (Cuadro 2). La conductividad eléctrica promedio fue de $176 \pm 72 \text{ } \mu\text{S/cm}$ (1σ). La concentración de

Cuadro 2

Descripción de los pozos muestreados en el acuífero Colima Superior incluyendo coordenadas geográficas, elevación, fecha de muestreo y análisis, concentración de ²²²Rn, composición de δ¹⁸O y las variables fisicoquímicas medidas *in situ*.

Lugar	Prof. (m)	Longitud (grados decimales)	Latitud (grados decimales)	Altitud (m.s.n.m)	Fecha de muestreo y análisis	δ ¹⁸ O (‰)	²²² Rn (Bq/L)	DFC (±Bq/L)	C.E (µS/cm)	SDT (mg/L)	Temp. (°C)	pH	ORP (mV)
Real Santa María	245	-84,1208	9,9824	1070	23/09/2015	-6,84	2,0	1,018	149	74	20,5	6,59	224
Esperanza 2A	260	-84,1161	9,9805	1167	19/08/2015	-8,77	6,5	1,028	214	108	21,1	6,59	199
Esperanza 1A	134	-84,1234	9,9685	1050	23/09/2015	-8,22	14,9	1,026	322	160	21,8	6,80	181
Granada	209	-84,1492	9,9894	1145	23/09/2015	-7,96	19,5	1,033	184	92	21,0	6,80	182
Malinche	245	-84,1374	9,9929	1117	23/09/2015	-7,79	18,7	1,043	166	84	19,9	7,22	173
Claretiano II	350	-84,1279	10,0078	1142	23/09/2015	-7,57	5,0	1,052	331	165	21,2	7,31	174
Chamaco	350	-84,0976	10,0221	1327	09/09/2015	-8,71	9,5	1,014	149	73	20,1	8,26	119
Los Altos	139	-84,1097	10,0159	1220	09/09/2015	-8,74	27,9	1,031	137	68	20,3	5,85	161
Burial	280	-84,0906	10,0122	1245	09/09/2015	-7,14	9,0	1,036	114	56	18,5	8,13	101
Matasanos	124	-84,1057	10,0189	1250	09/09/2015	-8,99	36,0	1,052	135	67	20,2	6,44	61
Santiago	300	-84,1034	10,0101	1250	09/09/2015	-7,05	5,0	1,056	112	56	18,0	8,15	41
San Vicente	244	-84,1217	9,9925	1127	02/10/2015	-6,83	4,6	1,021	125	61	18,9	6,54	190
Aurora II	153	-84,1493	9,9911	1146	02/10/2015	-8,89	40,9	1,046	188	94	21,3	6,45	73
Boruca	184	-84,1283	10,0140	1136	02/10/2015	-8,85	4,0	1,055	1,2	262	22,4	6,53	145
Joya III	325	-84,1153	10,0061	1180	02/10/2015	-8,23	45,6	1,065	193	96	20,9	6,63	56
Joya II	350	-84,1095	10,0095	1220	02/10/2015	-8,81	50,5	1,074	90	45	19,3	6,90	114
Santa Lucía	275	-84,1155	10,0160	1211	07/10/2015	-8,74	22,4	1,023	290	140	23,8	6,10	40
Highland Ranch	160	-84,0765	10,0642	1807	07/10/2015	-8,02	50,4	1,031	93	46	18,1	6,58	35
Santa Cruz	243	-84,0485	10,0127	1312	07/10/2015	-6,78	3,8	1,040	124	60	19,9	6,95	117
Miraflores	270	-84,1071	9,9885	1161	07/10/2015	-6,91	3,9	1,048	121	60	19,4	6,58	175
El Trebol	300	-84,1343	9,9808	1087	07/10/2015	-7,19	26,5	1,053	196	98	20,3	6,60	140

Prof.: profundidad

Temp.: temperatura

SDT fue de $87,4 \pm 35,8$ mg/L (1σ). El pozo Joya II presentó los valores menores de conductividad eléctrica y SDT, $90 \mu\text{S/cm}$ y 45 mg/L, respectivamente, mientras que el pozo Claretiano II presentó los valores más altos, correspondientes a $331 \mu\text{S/cm}$ y 165 mg/L, respectivamente. La temperatura promedio observada fue de $20,3 \pm 1,4^\circ\text{C}$ (1σ). El rango de pH varió entre $5,85$ (Pozo Los Altos) a $8,26$ (Pozo Chamaco). El pH promedio fue $6,9 \pm 0,6$ (1σ). El valor promedio de ORP fue de $+129 \pm 59$ mV (1σ). El pozo Highland Ranch presentó las condiciones más reductivas con un valor de ORP de $+35$ mV, mientras que la condición más oxidativa se presentó en el pozo Real Santa María ($+224$ mV).

La concentración promedio de ^{222}Rn en las nacientes fue de $21,3 \pm 17,5$ Bq/L (1σ). La menor concentración fue de $2,7$ Bq/L en la naciente Flores, mientras que la mayor concentración se presentó en el manantial Ojo de Agua ($69,7$ Bq/L) (Cuadro 3). Con respecto a la composición de $\delta^{18}\text{O}$, el valor promedio fue de $-7,5 \pm 0,7$ ‰ (1σ). El $\delta^{18}\text{O}$ fluctuó entre $-6,2$ ‰ (naciente Botho) hasta $-8,5$ ‰ (naciente Sacramento). La conductividad eléctrica promedio en las nacientes fue de $88 \pm 55 \mu\text{S/cm}$ (1σ). La concentración promedio de SDT fue de 44 ± 27 mg/L (1σ). La naciente Flores presentó los valores menores de conductividad eléctrica ($16 \mu\text{S/cm}$) y SDT (11 mg/L), mientras que el manantial Ojo de Agua presentó una conductividad eléctrica de $225 \mu\text{S/cm}$ y una concentración de SDT de 112 mg/L. La temperatura promedio fue de $14,6 \pm 1,5^\circ\text{C}$ (1σ). El rango de pH varió entre $6,0$ (naciente Higuieron 2) hasta $7,0$ (naciente Flores). El pH promedio fue $6,6 \pm 0,4$ (1σ). El valor promedio de ORP fue de $+204 \pm 61$ mV (1σ). El menor valor de ORP fue de $+121$ mV (naciente Flores), mientras que el mayor valor se observó en el manantial Ojo de Agua ($+368$ mV) (Cuadro 3).

En la red de abastecimiento de agua potable el valor promedio de ^{222}Rn fue de $12,4 \pm 10,5$ Bq/L (1σ), presentando un máximo de $30,8$ Bq/L en la zona de San Joaquín y un mínimo de $4,7$ Bq/L en Barva (Cuadro 4). La conductividad eléctrica promedio fue de $138 \pm 85 \mu\text{S/cm}$ (1σ) y la concentración de SDT fue de 69 ± 43 mg/L (1σ). La muestra de agua potable de Barva presentó los valores

menores de conductividad eléctrica y SDT, $68 \mu\text{S/cm}$ y 34 mg/L, respectivamente, mientras que en Lagunilla se observaron los valores máximos con $282 \mu\text{S/cm}$ y 141 mg/L, respectivamente. El pH osciló entre $6,0$ (San Joaquín) hasta $6,3$ (Lagunilla). El pH promedio fue de $6,2 \pm 0,1$ (1σ). El valor promedio de ORP fue de $+475 \pm 110$ mV (1σ). El menor valor de ORP fue de $+335$ mV (Lagunilla), mientras que el mayor fue en la muestra tomada en la zona central de Heredia con $+589$ mV (Cuadro 4).

Las aguas superficiales presentaron un promedio de ^{222}Rn de $0,50 \pm 0,43$ Bq/L (1σ), con un valor máximo de $1,00$ Bq/L en Quebrada Cipresal y valor mínimo de $0,25$ Bq/L en el río Porrosatí. Para el $\delta^{18}\text{O}$, la composición promedio fue de $-7,6 \pm 0,5$ ‰ (1σ). La conductividad eléctrica promedio fue de $85 \pm 13 \mu\text{S/cm}$ (1σ) y la concentración de SDT fue de 43 ± 6 mg/L (1σ). La Quebrada Cipresal presentó los menores valores de conductividad eléctrica y SDT, $75 \mu\text{S/cm}$ y 39 mg/L, respectivamente, mientras que en el río Porrosatí se observaron los valores más altos de $100 \mu\text{S/cm}$ y 50 mg/L, respectivamente. La temperatura promedio fue de $16,0 \pm 1,2^\circ\text{C}$ (1σ). El pH varió entre $6,8$ (río Porrosatí) hasta $6,5$ (río Ciruelas). El pH promedio fue $6,7 \pm 0,2$ (1σ). El valor promedio de ORP fue de $+234 \pm 14$ mV (1σ), el menor valor de ORP fue de $+226$ mV en río Ciruelas, mientras que el mayor valor se observó en el río Porrosatí ($+251$ mV) (Cuadro 4).

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La figura 4 muestra la variación espacial de la concentración de ^{222}Rn en Bq/L. La alta variabilidad en la concentración de ^{222}Rn en los pozos puede deberse a la desgasificación producida en el fallamientos local (Loría et al., 1995; Koike et al., 2014). La región donde se encuentran los acuíferos acuíferos Barva y Colima Superior, es una zona sísmicamente activa. Varios fallamientos locales han sido reportados al norte de la ciudad de Heredia (Figura 1). Loría et al. (1995), en una zona cercana hacia el oeste de la zona de estudio, reportó valores de ^{222}Rn en el suelo entre 20 y 50 Bq/L en un transecto sobre la falla de Santa Bárbara.

Cuadro 3

Descripción de las nacientes muestreadas en el acuífero Barva incluyendo coordenadas geográficas, elevación, fecha de muestreo y análisis, concentración de ²²²Rn, composición de δ¹⁸O y las variables fisicoquímicas medidas *in situ*.

Lugar	Longitud (grados, decimales)	Latitud (grados, decimales)	Elevación (m.s.n.m)	Fecha de muestreo y análisis	δ ¹⁸ O (‰)	²²² Rn (Bq/L)	DFC (± Bq/L)	C.E (μS/cm)	SDT (mg/L)	Temperatura (°C)	pH	ORP (mV)
Botho	-84,1020	10,0938	2041	26/08/2015	-6,19	14,6	1,022	36	18	14,9	6,70	197
Arrieta	-84,1039	10,0908	2260	26/08/2015	-7,71	13,3	1,030	111	55	13,5	6,82	190
Anexa	-84,1039	10,1069	2251	26/08/2015	-7,55	14,1	1,040	100	50	13,6	6,90	181
Fuente 29	-84,1101	10,0964	2049	26/08/2015	-6,89	14,4	1,047	53	26	14,2	6,74	205
Fuente 29A	-84,1102	10,0951	2021	26/08/2015	-7,46	14,0	1,059	58	29	14,6	6,40	227
Higuerón 2	-84,0974	10,0639	1728	02/09/2015	-7,67	17,0	1,043	101	50	16,6	5,97	202
Higuerón 1	-84,0968	10,0642	1727	02/09/2015	-7,90	26,8	1,030	100	50	16,6	6,30	190
La Hoja-Chorretas	-84,0984	10,0651	1724	02/09/2015	-7,67	29,1	1,015	103	52	16,4	6,53	201
Flores	-84,0958	10,0993	2239	14/08/2015	-6,26	2,7	1,054	16	11	12,9	6,99	121
Sacramento	-84,1127	10,1138	2401	14/08/2015	-8,52	18,9	1,059	62	36	12,5	6,87	158
Ojo de Agua	-84,1953	9,9854	890	16/10/2015	-8,09	69,7	1,016	225	112	-	6,06	368

Cuadro 4

Descripción de los puntos de la red de agua potable y aguas superficiales muestreadas incluyendo coordenadas geográficas, elevación, fecha de muestreo y análisis, concentración de ^{222}Rn , composición de $\delta^{18}\text{O}$ y las variables fisicoquímicas medidas *in situ*.

Lugar	Longitud (grados. decimales)	Latitud (grados. decimales)	Elevación (m.s.n.m)	Fecha de muestreo y análisis	^{222}Rn (Bq/L)	DFC	(\pm Bq/L)	C.E ($\mu\text{S/cm}$)	SDT (mg/L)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	pH	ORP (mV)
Heredia Centro	-84,1098	10,0021	1270	16/10/2015	9,5	1,034	1,8	96	48	-	6,21	589
San Joaquín	-84,9150	10,0160	1260	16/10/2015	30,8	1,026	3,1	147	73	-	6,01	383
Barva	-84,1245	10,0290	1300	16/10/2015	4,7	1,054	1,3	68	34	-	6,27	525
San Rafael	-84,0550	10,0051	1296	16/10/2015	5,4	1,042	1,4	99	49	-	6,18	545
Lagunilla	-84,7603	9,5840	1050	16/10/2015	14,0	1,061	2,1	282	141	-	6,31	335
Río Ciruelas	-84,1106	10,0942	1994	09/10/2015	0,26	1,024	0,13	81	40	14,9	6,83	226
Río Porrosatí	-84,1068	10,0744	1879	09/10/2015	0,25	1,033	0,12	100	50	17,3	6,51	251
Quebrada Cipresal	-84,1141	10,0868	1730	09/10/2015	1,00	1,042	0,22	75	39	15,9	6,83	226

Asumiendo condiciones de equilibrio, el ^{222}Rn presente en el subsuelo puede disolverse en el agua subterránea, resultando en anomalías en el agua de consumo humano. Por ejemplo, la muestra de agua potable de la ciudad de San Joaquín presentó una alta concentración de ^{222}Rn de 30,8 Bq/L, tres veces mayor al límite máximo sugerido por US EPA (2012) (Cuadro 4), probablemente debido a que la falla activa de Alajuela cubre parte de la ciudad de San Joaquín y el suroeste de la provincia de Heredia. Las variaciones en la concentración de ^{222}Rn también pueden deberse a las variaciones naturales en la concentración de uranio en las formaciones geológicas. Sin embargo, Barquero et al. (2005) reportó concentraciones muy uniformes de uranio entre 6-10 ppm en el suelo de las cercanías del macizo del volcán Poás, al noroeste del macizo del volcán Barva, pero con una variación importante en la concentración de ^{222}Rn (1,0-7,8 Bq/L). Lo anterior sugiere que los procesos de desgasificación por el aumento de la actividad volcánica o sismicidad local son potenciales precursores de altas concentraciones de ^{222}Rn en aguas subterráneas y, por consiguiente, en las redes de abastecimiento de agua potable, especialmente, aquellas que dependen de la extracción en pozos. La profundidad de los pozos no presentó correlación significativa con la concentración de ^{222}Rn .

En general, las nacientes en la zona de recarga acuífera presentaron concentraciones muy uniformes de ^{222}Rn , posiblemente debido al corto tiempo de residencia del agua, que en la zona alta del macizo del volcán Barva oscila entre 1,1 y 1,5 meses (Sánchez-Murillo, información no publicada). Sin embargo, se reportaron desviaciones importantes en las nacientes de Higuera 1, La Hoja-Chorreras y Ojo de Agua (Cuadro 4). En los cuerpos de agua superficial en la zona alta del macizo del volcán Barva, se observaron concentraciones muy bajas de ^{222}Rn . Estos cuerpos de agua montañosos se caracterizan por altas pendientes, turbulencia y altos valores de oxígeno disuelto, lo que puede favorecer la rápida desgasificación de ^{222}Rn . Con excepción de la muestra de agua potable de San Joaquín, las muestras de agua potable de la red de abastecimiento presentan valores aceptables de ^{222}Rn de acuerdo al límite máximo

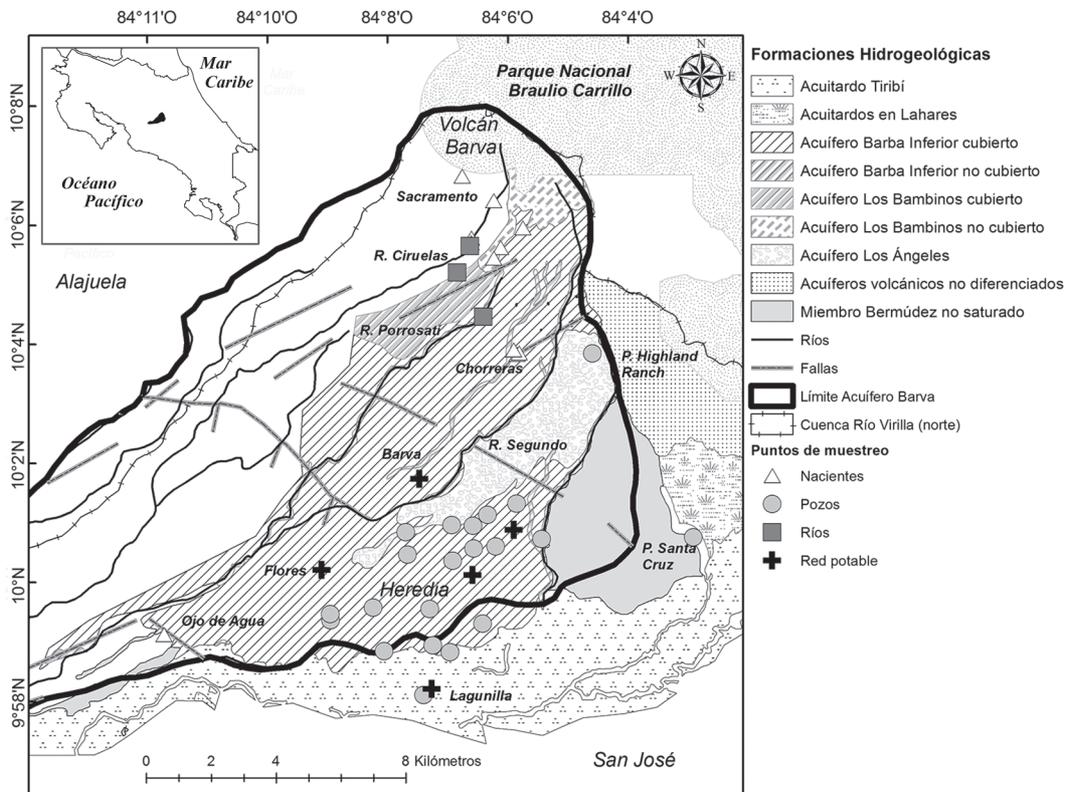


Fig. 1: Descripción del área de estudio incluyendo principales formaciones hidrogeológicas, puntos de muestreo (codificación por color y símbolo), límites provinciales, principales ríos, fallas (Atlas Digital de Costa Rica, 2014), y el límite sugerido del acuífero Barva (línea roja) (Reynolds y Fraile, 2009) y límite del margen derecho de la cuenca del Río Virilla.

sugerido por US EPA (2012). La existencia de tanques de captación y almacenamiento por parte de la ESPH permite aumentar el tiempo de residencia y favorece la desgasificación del ^{222}Rn .

Hidrológicamente, el área de estudio puede ser clasificada en dos grupos de agua con base en la señal isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ (Figura 5). En las muestras de agua entre $-7,9$ y $-6,2$ $\delta^{18}\text{O}$ (‰) predomina la recarga de origen Caribe, mientras que las muestras entre $-8,9$ y $-7,9$ $\delta^{18}\text{O}$ (‰) prevalece la recarga de origen Pacífico. El cuadro 5 muestra la correlación (Pearson) entre la concentración de ^{222}Rn , $\delta^{18}\text{O}$ y varias variables físico-químicas. La composición de ^{222}Rn , presenta una correlación significativa ($R = -0,47$; $P < 0,05$) con la composición de $\delta^{18}\text{O}$. En general, las muestras con mayor concentración de ^{222}Rn corresponden con composiciones empobrecidas en $\delta^{18}\text{O}$, mientras que las

muestras con menor concentración de ^{222}Rn pertenecen al grupo isotópicamente enriquecido en $\delta^{18}\text{O}$. La figura 6 muestra la variación de ORP en los acuíferos Barva y Colima Superior. Las zonas que presentan condiciones de mayor oxidación, y consecuentemente, mayor concentración de oxígeno disuelto o dióxido de carbono, presentan concentraciones menores de ^{222}Rn . La presencia de estos gases con mayor capacidad de disolución, pueden causar el desplazamiento del ^{222}Rn , y por ende, la concentración del mismo es menor en algunos pozos. Es importante reconocer que los valores de ORP, en el caso de los pozos, dependen en gran medida del estado activo o inactivo del mismo.

La figura 7 muestra la agrupación de las muestras de pozos y nacientes según el análisis de conglomerados. El manantial de Ojo de Agua,

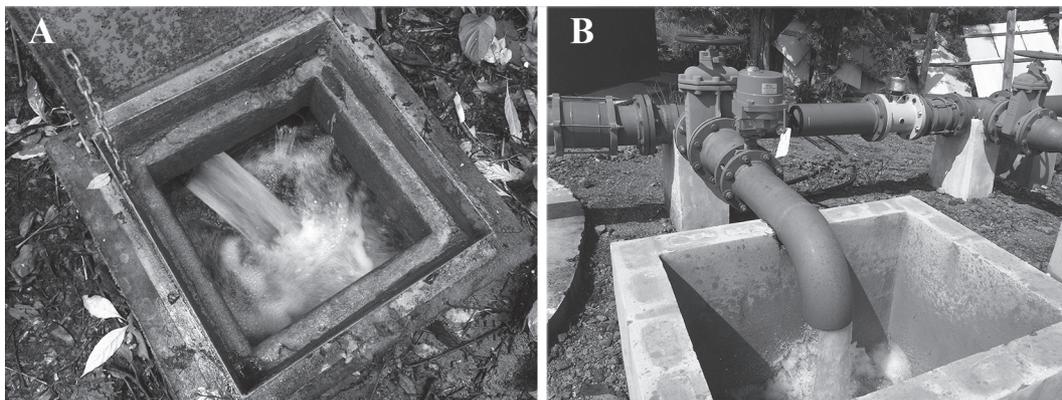


Fig. 2: Representación de las condiciones de muestreo en captaciones de nacientes (A) y pozos (B) administrados por la Empresa de Servicios Públicos de Heredia, S.A.

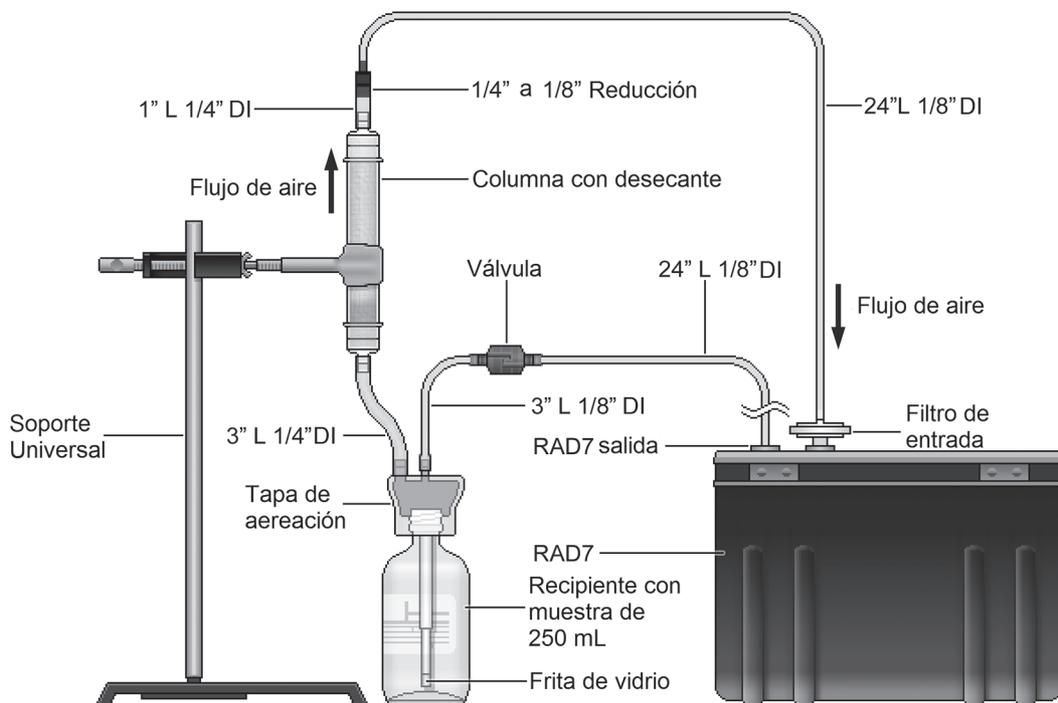


Fig. 3: Representación gráfica del sistema de análisis de ^{222}Rn con el RAD7 (DurrIDGE Inc., 2015). Nota: imagen reproducida y traducida al castellano con el permiso de DurrIDGE Inc.

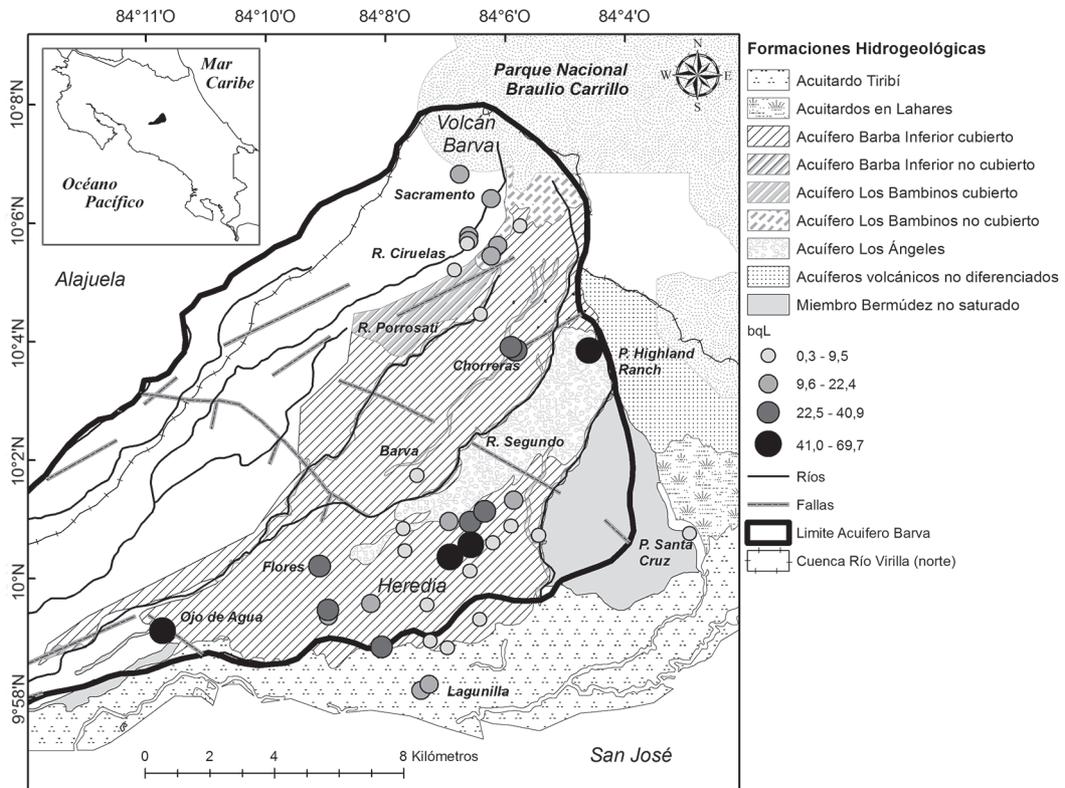


Fig. 4: Variación espacial de la concentración de ^{222}Rn (Bq/L) en agua subterránea, superficial y en la red de abastecimiento de agua potable.

el cual es una naciente en la parte más baja del acuífero Barva, con un tiempo de residencia y contacto roca-agua más largo, se agrupa entre la matriz de pozos. Las nacientes se agrupan en tres grupos distintos, básicamente por la cercanía entre ellas. El pozo Los Altos aparece en el grupo de las nacientes Higuerón 1, Higuerón 2 y La Hoja-Chorreras, posiblemente marcando el origen de la recarga del agua extraída en este pozo. Mayoritariamente, los demás grupos de pozos presentan agrupaciones dependiendo de la distancia superficial en las perforaciones (i.e. cercanía de las perforaciones) o en algunos relevando

conectividades entre zonas de recarga de origen Caribe versus Pacífico. El análisis de conglomerados no revela una relación consistente entre los grupos y las concentraciones de ^{222}Rn , reforzando la hipótesis sobre la desgasificación por fallamientos locales.

CONCLUSIONES

El presente análisis espacial de ^{222}Rn en los acuíferos Barva y Colima Superior provee datos relevantes respecto a la concentración de esta

Cuadro 5

Matriz de correlación de Pearson.

	Bq/L	Elev. (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	SDT (mg/L)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	pH	ORP (mV)
Bq/L	1,00							
Elev. (m)	-0,12*	1,00						
	0,48							
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-0,47	0,29	1,00					
	<0,05	0,10						
C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0,09	-0,66	-0,45	1,00				
	0,61	<0,05	<0,05					
SDT (mg/L)	0,09	-0,65	-0,46	1,00	1,00			
	0,61	0,00	0,01	0,00				
Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	0,12	-0,94	-0,46	0,81	0,80	1,00		
	0,52	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05			
pH	-0,31	0,05	0,21	-0,05	-0,05	-0,06	1,00	
	0,06	0,78	0,25	0,77	0,78	0,76		
ORP (mV)	-0,17	-0,10	0,23	-0,12	-0,11	-0,35	-0,43	1,00
	0,30	0,54	0,21	0,49	0,50	0,05	<0,05	

especie química radioactiva de origen natural en distintas fuentes y redes de abastecimiento de agua potable del Valle Central de Costa Rica. En los pozos analizados, se encontraron niveles altos de concentración de ^{222}Rn , los valores mayores corresponden a los pozos Joya II (50,5 Bq/L) y Highland Ranch (50,4 Bq/L). Las altas concentraciones de ^{222}Rn en algunos pozos pueden atribuirse a la desgasificación provocada en los fallamientos locales cercanos al punto de muestreo.

En general, las nacientes de la zona norte presentaron una composición homogénea de ^{222}Rn con una concentración promedio de 21,3 Bq/L. La muestra que posee una mayor desviación de la tendencia corresponde al manantial de Ojo de Agua, el cual se encuentra ubicado en la zona suroeste del acuífero Barva. Este punto se encuentra influenciado por un fallamiento local, la cual podría favorecer el aumento en la concentración de ^{222}Rn por procesos de desgasificación,

como también mayores tiempos de interacción roca-agua y poco contacto con la atmósfera.

En relación al límite máximo de ^{222}Rn sugerido por US EPA (2012) para agua de consumo humano, existen dos puntos de la red de abastecimiento que sobrepasan la norma sugerida: San Joaquín de Flores (30,8 Bq/L) y Lagunilla (14,0 Bq/L). Estas altas concentraciones de ^{222}Rn puede deberse al sistema de distribución propio de la zona, donde es posible que el tiempo de residencia del agua en las tuberías sea muy corto o no existe la posibilidad de pérdida del gas hacia la atmósfera. No obstante, es necesario realizar monitoreo de la variabilidad temporal de ^{222}Rn en agua en los pozos de abastecimiento de agua potable. La utilización de tanques de almacenamiento o captación permitiría aumentar el tiempo de residencia del agua que entra a la red de consumo, facilitando la pérdida de ^{222}Rn hacia la atmósfera o por decaimiento radioactivo.

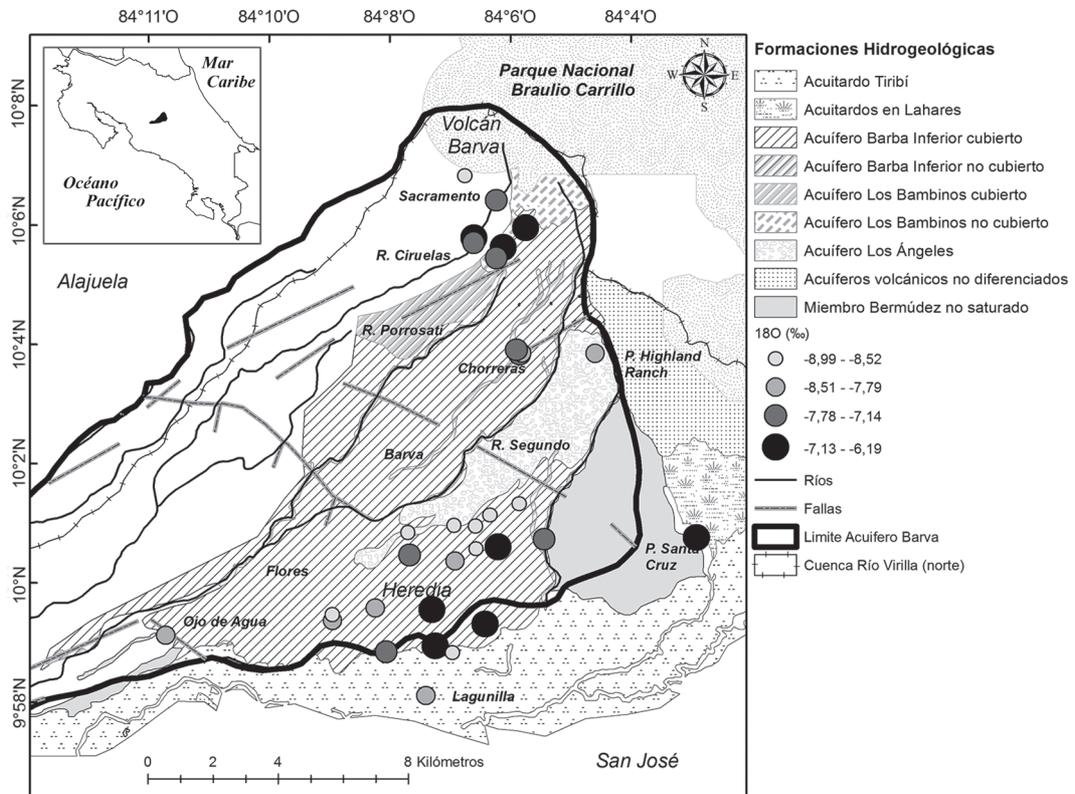


Fig. 5: Variación espacial de la composición de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) en agua subterránea y superficial.

RECOMENDACIONES

Es recomendable extender la presente investigación incluyendo otras mediciones como a) la composición de ^{222}Rn en el aire del suelo y en el aire interno de viviendas o edificaciones de servicios públicos y privados, b) la medición de la concentración de uranio en suelo y el agua subterránea; c) medición continua de ^{222}Rn en la red de abastecimiento, nacientes y pozos durante un año hidrológico completo, con el fin de conocer la dinámica de ^{222}Rn relacionada con los procesos de recarga y caudal base en la región norte del Valle Central de Costa Rica. Además de iniciar un análisis sobre problemas pulmonares en la población del flanco sur del macizo del volcán Barva, con

el fin de verificar si existe correlación entre este tipo de enfermedad con alguno de los vectores aquí estudiados.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue financiado mediante el Convenio Específico entre la Universidad Nacional y la ESPH (código SIA 0378-14), "*Sostenibilidad y seguridad hídrica en los principales acuíferos de la vertiente pacífica de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica*". Los autores desean agradecer la colaboración del personal de la ESPH durante la coordinación de las giras de muestreo en especial a Andrés

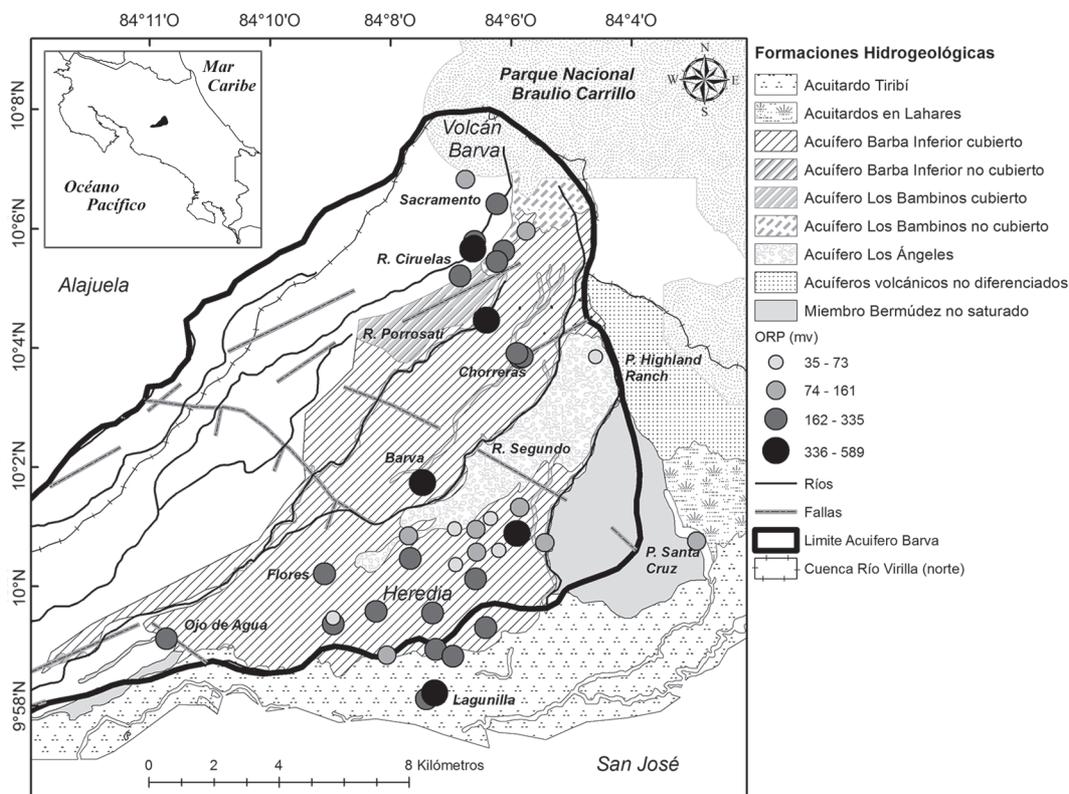


Figura 6: Variación espacial del potencial de oxidación-reducción, ORP (mV).

Vásquez, María José Calvo, José Vilchez y José Vargas. Los autores agradecen la revisión del Dr. Ricardo Oyarzún.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALABDULA'ALY, A., 2014: Occurrence of radon in groundwater of Saudi Arabia.- J. Environ. Radioactivity, 138: 186-191.
- ALVARADO, G. E., 2009: Los volcanes de Costa Rica: geología, historia y riqueza natural.- 269 págs. Editorial EUNED, San José.
- ALVARADO, G., & GANS, P. B., 2012: Síntesis de geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica, América Central.- Rev. Geol. Amér. Central, 46: 7-122.
- ARIAS, M., LOSILLA, M., & ARREDONDO, S., 2006: Estado del conocimiento del agua subterránea en Costa Rica.- Bol. Geológico y Minero, 63-73.
- ARREDONDO, S., & SOTO, G., 2006: Edad de las lavas del Miembro los Barbinos y sumario cronoestratégico de la formación Barva, Costa Rica.- Rev. Geol. Amér. Central, 34: 59-71.
- ATLAS DIGITAL DE COSTA RICA., 2014: Insituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica (CD-ROM).
- BARBOSA, S., DONNER, R., & STEINITZ, G., 2015: Radon applications in geosciences – Progress & perspectives.- The European Physical J. Spec. Topics, 224, 4: 597-603.

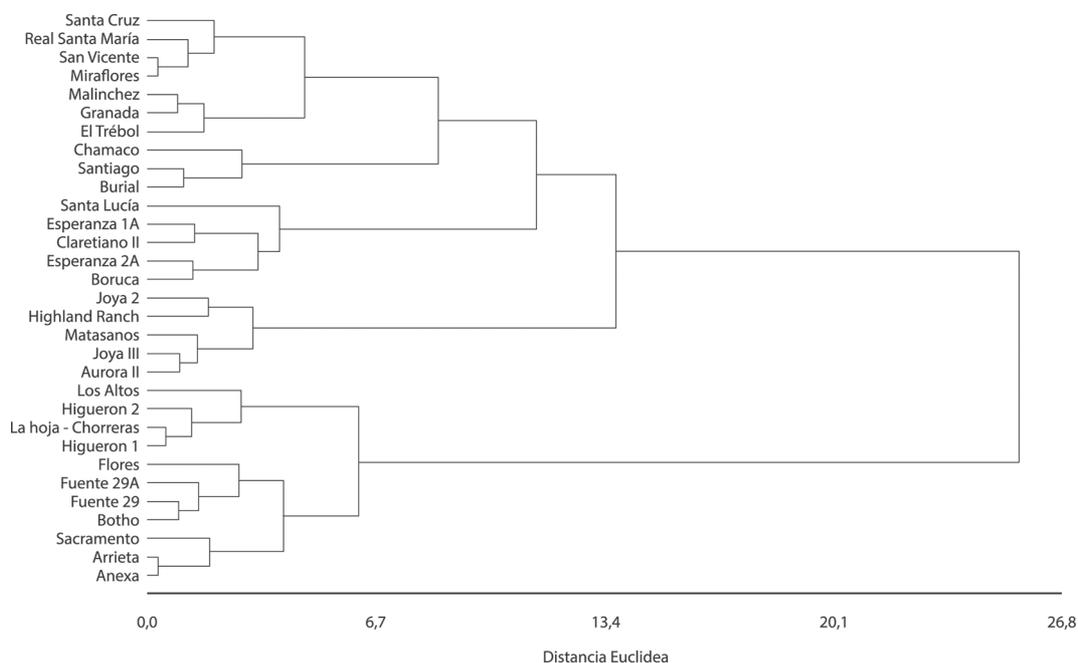


Figura 7: Representación gráfica del análisis de conglomerados para pozos y nacientes. El eje horizontal representa la distancia Euclídea según el método de (Ward, 1963).

BARQUERO, J., FERNANDEZ, E., MONNIN, M., SEIDEL, J., & SEGOVIA, N., 2005: Water chemistry and soil radon survey at the Poás volcano (Costa Rica).- *An. Geophys.* 48: 33-42.

BONOTTO, D., 2011: Natural radionuclides in major aquifer systems of the Paraná sedimentary basin, Brazil.- *Applied Radiation and Isotopes*, 69: 1572-1584.

BONOTTO, D., 2014: ^{222}Rn , ^{220}Rn and other dissolved gases in mineral waters of southeast Brazil.- *J- Environ. Radioactivity*, 132: 21-30.

BRENES, J., 2003: Geología y Peligros Volcánicos del Flanco Oeste y Suroeste del Volcán Barva, Costa Rica.- 83 págs. Universidad de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].

CARTWRIGHT, I., & GILFEDDER, B., 2015: Mapping and quantifying groundwater inflows to Deep Creek (Maribyrnong catchment, SE Australia) using ^{222}Rn , implications for protecting groundwater-dependant ecosystems.- *Applied Geochem.* 52: 118-129.

CASTRO, G., CHAVARRÍA, F., DE LA CRUZ, J., GELABERT, C., MARTÍNEZ, D., PANIAGUA, W., & TEJEDA, A., 2011: Impacto antrópico en el Manto Acuífero Barva (Heredia, Costa Rica).- *Cuadernos de Investigación UNED*, 3: 71-80.

CHELNOKOV, G., ZHARKOV, R., & BRAGIN, I., 2015: Radon Monitoring in Groundwater and Soil Gas of Sakhalin Island.- *J. Geosci. and Environ. Protection*, 3: 48-53.

- CRANSWICK, R., COOK, P., & LAMONTAGNE, S., 2014: Hyporheic zone exchange fluxes and residence times inferred from riverbed temperature and radon data.- *Hydrology*, 519: 1870-1881.
- DURRIDGE, INC. 2015: Rad7 Radon Detector User Manual.- 81 págs. DURRIDGE Company Inc, USA.
- HAHN, E., GOKUN, Y., ANDREWS, W., OVERFIELD, B., ROBERTSON, H., WIGGINS, A., & RAYENS, M., 2015: Radon potential, geologic formations, and lung cancer risk.- *Preventive Medicine Reports*, 2: 342-346.
- IGLESIAS, C., & TABOADA, J., 2014: Radon in Galicia.- *Procedia Earth and Planetary Science*, 8: 70-74.
- JOFRÉ, E., 2011: Caracterización de la interacción agua superficial/agua subterránea poco profunda en la parte baja de la cuenca del río Limarí, a través del uso de herramientas hidroquímicas e isotópicas.- 164 págs. Universidad de la Serena, Chile, [Tesis Lic.].
- KNUTSSON, G., & OLOFSSON, B., 2002: Radon content in groundwater from drilled wells in the Stockholm region of Sweden.- *Norges Geologiske Undersökelse Bull.* 439: 79-85.
- KOIKE, K., YOSHINAGA, T., UYAMA, T., & ASAE, H., 2014: Increased radon-222 in soil gas because of cumulative seismicity at active faults.- *Earth, Planets and Space*, 66, DOI: 10.1186/1880-5981-66-57
- LORÍA, L., BRENES, J., FERNANDEZ, E., JIMENEZ, R., GARCIA, R., MONNIN, M., & BALCAZAR, M., 1995: Radon and Seismicity in Costa Rica.- En: DUBOIS, C. (ed.): *Gas Geochemistry*.- Science Reviews, Northwood: 213-219.
- MAGAÑA, V., AMADOR, J., & MEDINA, S., 1999: The midsummer drought over Mexico and Central America.- *Climate*, 12: 1577-1588.
- MONTERO, W., 2000: Sismología y neotectónica.- En: DENYER, P. & KUSSMAUL, S. (comps): *Geología de Costa Rica*. - 520 págs. Ed. Tecnológica de Costa Rica, Cartago.
- MORENO, V., BACH, J., BAIXERAS, C., & FONT, L., 2014: Radon levels in groundwaters and natural radioactivity in soils of the volcanic region of La Garrotxa, Spain.- *J. Environ. Radioactivity*, 128: 1-8.
- NERI, M., BEHNCKE, B., BURTON, M., GALLI, G., GIAMMANCO, S., PECORA, E., & REITANO, D., 2006: Continuous soil radon monitoring during the July 2006 Etna eruption.- *Geophys. Res. Letters*, 33: 1-5.
- NEVINSKY, I., TSVETKOVA, T., & NEVINSKAYA, E., 2015: Measurement of radon in ground waters of the Western Caucasus for seismological application.- *J. Environ. Radioactivity*, 149: 19-35.
- OYARZÚN, R., JOFRÉ, E., MATURANA, H., OYARZÚN, J., & AGUIRRE, E., 2013: Use of ²²²Rn as a simple tool for surface water-groundwater connectivity assessment: a case study in the arid Limarí basin, north-central Chile.- *Water and Environ. J.* 28: 418-422.
- PINTI, D., RETAILLEAU, S., BARNETCHE, D., MOREIRA, F., MORITZ, A., LAROCQUE, M., & VALADEZ, A., 2014: ²²²Rn activity in groundwater of the St. Lawrence Lowlands, Quebec, eastern Canada: relation with local geology and health hazard.- *J. Environ. Radioactivity*, 136: 206-217.

- PRASAD, Y., PRASAD, G., CHOUBEY, V., & RAMOLA, R., 2009: Geohydrological control on radon availability in groundwater.- *Radiation Measurements*, 44: 122-126.
- PROTTI, R., 1986: Geología del Flanco Sur del Volcán Barva 1986.- *Bol. Vulcanol.* 17: 23-30.
- RAMÍREZ, R., 2007: Recarga Potencial del Acuífero Colima y Barva, Valle Central.- 41 págs. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA). San José, Costa Rica.
- RAMÍREZ, R. & ALFARO, A., 2002: Mapa de Vulnerabilidad Hidrológica de una parte del Valle Central de Costa Rica.- *Rev.Geol. Amér. Central*, 27: 53-60.
- REYNOLDS, J., & FRAILE, J., 2009: Utilización de isótopos estables en la precipitación para determinar zonas de recarga del acuífero Barva, Costa Rica. *Estudios de hidrología isotópica en América Latina 2006*.- 232 págs. Organismo Internacional de Energía Atómica. IAEA-TECDOC-1611. Viena. Austria.
- ARIAS-SALGUERO, M. E., LOSILLA, M., & ARREDONDO S., 2006: Estado del conocimiento del agua subterránea en Costa Rica.- *Bol. Geológico y Minero*, 117: 63-73.
- SANTOS, T., & BONOTTO, D., 2014: ^{222}Rn , ^{226}Ra and hydrochemistry in the Bauru Aquifer System, São José do Rio Preto (SP), Brazil.- *Applied Radiation and Isotopes*, 86: 109–117.
- WARD, J., 1963: Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function.- *J. Amer. Statistical Assoc.* 58: 236-244.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO), 2009: WHO Handbook on indoor radon: a public health perspective. Edited by Hajo Zeeb, and Ferid Shannoun.- 110 págs. Geneva, Switzerland.



