

MEDICIONES DE GAS RADÓN EN UN SEGMENTO DE LA FALLA DE BOCONÓ, ESTADOS TÁCHIRA Y MÉRIDA

Martín Rengifo¹; Reina Aranguren¹; Jaime Laffaille¹; Carlos Ferrer¹; Franck Audemard²

Forma de citar: Rengifo, M., Aranguren, R., Lafaille, J., Ferrer, C., y Audemard, F. 2015. Medición de gas radón en un segmento de la Falla de Boconó, estados Táchira y Mérida. Boletín de Geología, 37 (2): 57-74.

RESUMEN

Utilizando el denominado método activo para la medición de gas radón en suelos, se ha realizado un conjunto de perfiles transversales a la traza de la Falla de Boconó entre las poblaciones de La Grita, edo. Táchira, y Santo Domingo, edo. Mérida. Esto se hace con el objetivo de realizar una caracterización de la Falla de Boconó en el mencionado segmento, y a la vez, comprobar la eficiencia del procedimiento en la detección de trazas de fallas geológicas activas en provincias diversas. Se trazaron 36 perfiles transversales a la falla, la mayoría entre 100 y 800 m de longitud y en la escogencia de los sitios privaron las consideraciones de carácter geológico - geomorfológico, sísmico, ambiental, así como los estudios paleosismológicos previos mediante trincheras realizados en la zona. De esta manera, se trazaron perfiles cortando escarpas de fallas, lomos de obturación, ensilladuras, trincheras, ciénagas de falla, depresiones, deslizamientos y hasta en una morrena desplazada; en escarpas y lomos de obturación la detección de la falla puede ser problemática, pero en ensilladuras es donde mejor se detecta. Así, los resultados indican que en un 40% de los casos se detectó débilmente o no se logró detectar la traza de la falla, y que la eficacia del método y la caracterización efectuada, aparte de las condiciones ambientales y climáticas conocidas, puede verse afectada por las condiciones geológico - geomorfológicas de cada sitio. Los valores relativos de mayor concentración de radón total se encuentran en la zona del Mocotíes (Tovar – Estánques) y los más bajos en el páramo de Mucuchíes.

Palabras clave: Gas Radón, Falla de Boconó

GAS RADON MEASUREMENTS ALONG A SEGMENT OF THE BOCONÓ FAULT IN THE MERIDA ANDES

ABSTRACT

A survey of total radon soil gas have been accomplished on the Boconó fault in the Merida Andes, where a segment of this active fault of ~170 km long, between the city of La Grita, in the Táchira state, and the Santo Domingo village, in Mérida state, was considered. Measurements of soil gas were taken along traverse lines perpendicular to the trace using a portable radiation monitor. The aim of this work is to characterize the diverse provinces traversed by this active fault, as well as, to evaluate the response of the method in different geological – geomorphological site conditions such as fault scarps, shutter ridges, saddles, trenches, sag ponds, depressions, landslides and an offset moraine. Along the fault trace, 36 profiles were taken and the results indicate that in 40 percent of the transects the trace was weakly detected, or not detected; the best results are in saddles and hillsides, the worst in scarps and shutter ridges. This suggests that, leaving aside the meteorological conditions, geology and geomorphology are important factors for keeping in mind when this method is applied. The relative concentration of total radon found is highest in the Mocotíes zone (Tovar – Estánques) and it is lowest in the páramo de Mucuchíes.

Keywords: Radon gas, Boconó Fault

¹ Universidad de Los Andes, martinr@ula.ve

² Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas

INTRODUCCIÓN

El radón es un gas radiactivo, producto de la desintegración natural del ^{238}U , del ^{232}Th y del ^{235}U que dan lugar a tres isótopos: el radón (^{222}Rn), el torón (^{220}Rn), y el actinón (^{219}Rn), con vida media de 3,82 días, 51,5 segundos y 3,92 segundos, respectivamente. Este gas inerte es monoatómico, inodoro, incoloro y no tiene sabor; es de baja movilidad debido a su corta vida media y se disuelve fácilmente en el agua y en disolventes orgánicos. El radón puede encontrarse en el suelo y en el agua debido a que elementos como el uranio y el torio están ampliamente difundidos entre los minerales; es un gas poco difusivo, y dada su corta vida media, a menos que sea transportado por otro fluido proviene desde corta distancia del sitio de detección. Altas concentraciones de gas radón en suelos se han asociado con la litología y el lecho rocoso (ver por ejemplo Choubey *et al.* 2007; Hyun-Kuk *et al.*, 1999), así como con discontinuidades tectónicas, deformación y esfuerzos corticales (Toutain and Baubron, 1999; King, 1980; Etiope and Lombardi, 1994; Juárez y Núñez-Cornú, 1999; Inceoz *et al.*, 2005), de tal forma que en zonas sísmicas la mayor concentración de gas radón se asocia con su escape a través de fallas o fracturas de las rocas de la corteza. Aparte de estos factores la proporción de este elemento en el suelo puede verse afectada por la lluvia, la presión atmosférica, la temperatura y el contenido de humedad: se ha encontrado, por ejemplo, que la concentración de radón en el suelo aumenta en verano con relación al invierno (Virk *et al.*, 2000), y que como consecuencia de una lluvia suave la emanación de radón puede aumentar, pero con lluvia copiosa ésta decae y se recupera después de algunos días (Virk *et al.*, 2000; Megumi and Mamuro, 1973). De igual forma, mientras más saturado de agua se encuentre el suelo menores son los niveles de gas radón (Schutz and Keller, 1994), al respecto, Choubey *et al.* (2007) señalan que cuando el contenido de agua del suelo es menor que el 16% de la mesa de agua, el radón aumenta, pero que decrece al superarse ese valor. Por otra parte, se ha encontrado una relación inversa entre la concentración de radón y la presión atmosférica en fuentes gaseosas (Shapiro *et al.* 1982 y Toutain *et al.*, 1992; en Toutain and Baubron, 1999), así como también que la alta temperatura y el incremento relativo de la humedad mejoran la emanación de gas radón, mientras que la velocidad del viento tiene correlación inversa (Virk *et al.*, 2000). Algunos autores sugieren que los factores atmosféricos no son importantes a más de 60 cm de profundidad (Schutz and Keller, 1994; Virk *et al.*, 2000), y otros, como King (1980) y Yang *et al.* (2005), simplemente no encontraron influencia de estos factores sobre la concentración de radón a esa de profundidad.

Debido a que el contenido de radón (^{222}Rn y ^{220}Rn) en el terreno puede ser controlado por los procesos tectónicos, se considera de utilidad para identificar trazas de fallas activas, aunque el torón (^{220}Rn) se utiliza mucho menos que el ^{222}Rn , según LaBrecque (2002), probablemente por la falta de métodos confiables de medición. En este sentido el gas radón (^{222}Rn , ^{220}Rn o Rn total) se ha utilizado solo o en combinación con otros gases como el helio, nitrógeno, oxígeno, argón, etc., con este propósito, ver por ejemplo, Bayraktutan *et al.* (1996); Mahajan *et al.* (2010); Zhou *et al.* (2010); Toutain and Baubron (1999) y Fu *et al.* (2008). En Venezuela LaBrecque and Cordovés (2003) y Urbani *et al.* (1998), aplicaron con éxito esta herramienta en la ubicación de fallas activas en el centro del país. Aranguren *et al.* (1999), Rengifo *et al.* (2004) y Rengifo y Aranguren (2005), muestran los primeros resultados de mediciones de radón en los Andes venezolanos.

En este trabajo se presentan y discuten los datos de varios perfiles de radón total tomados transversalmente a la Falla de Boconó a lo largo de varios años. Muchos de estos perfiles cruzan la traza de la falla en sitios de clara evidencia geomorfológica como escarpas, lomos de obturación, ciénagas de falla, ensilladuras y depresiones; en algunos perfiles se controla la ubicación de la traza con datos de trincheras paleosísmicas (Audemard *et al.*, 1999 y 2008; Alvarado *et al.*, 2007b) y en otros no se sabe con precisión el lugar de la traza. El objetivo es verificar la factibilidad de asociar anomalías de gas radón total con la posición de la traza de la falla en los sitios planteados como una forma de evaluar la eficiencia del método al aplicarlo en los Andes venezolanos.

LA FALLA DE BOCONÓ

Entre la depresión del Táchira y Morón, cortando longitudinalmente los Andes venezolanos se encuentra la Falla de Boconó, con una longitud aproximada de 500 km. Esta falla descrita originalmente por Rod (1956), se considera el límite SE del bloque triangular de Maracaibo, que forma parte de la frontera activa entre las placas del Caribe, Nazca y Suramericana (Audemard and Audemard, 2002). Se ha estimado su desplazamiento promedio anual en 7,3-10,7 mm (Audemard *et al.*, 1999) a partir de morrenas desplazadas cerca de la laguna de Mucubají. Movimiento que tiende a decrecer desde el mencionado sector, en el páramo de Mucuchíes, hacia ambos extremos de la misma (Audemard and Audemard, 2002).

A lo largo de esta falla se observa una serie de rasgos geomorfológicos (Rod, 1956; Schubert, 1980a) propios

de una falla rumbo deslizante: valles rectos y alineados, ensilladuras, trincheras, escarpas de falla, lagunas y ciénagas de fallas, lomos, drenajes desplazados, etc.. Se ha postulado, además, la existencia de varias cuencas de tracción a lo largo de su recorrido (Schubert, 1980b), tres de las cuales entre Santo Domingo y La Grita, segmento de interés en el presente trabajo: La cuenca de Mucuchíes (Schubert, 1980b; Soulás, 1985; Audemard *et al.*, 1999); la cuenca de La González, entre La González y Estánques (Schubert, 1985), donde recientemente Alvarado *et al.* (2007a) definieron una pequeña cuenca de tracción que denominaron cuenca de Lagunillas, y una cuenca de tracción postulada por Singer y Soulás (Schubert *et al.*, 1983) en la localidad de Bailadores.

Entre Santo Domingo y La Grita (FIGURA 1) se han producido los mayores terremotos de la historia de los Andes centrales: el terremoto de 1610 con epicentro cerca de La Grita ($M \sim 7,2$), que destruyó ésta y otras poblaciones de los Andes, sirviendo de disparo a un

movimiento de masas en La Playa de Bailadores (Ferrer y Laffaille, 1998). Este sismo rompió la falla desde La Grita hasta Lagunillas, según estudios paleosísmicos por trincheras de Audemard (1997), trincheras cerca de La Grita, y de Alvarado *et al.* (2007b), trincheras en Lagunillas. Refieren los mismos autores, que el gran terremoto de los Andes (año 1894; $M \sim 7,3$), con epicentro cerca de Santa Cruz de Mora, rompió el mismo segmento de falla. El fuerte terremoto de 1674 ($M \sim 7$), que afectó Mérida, Trujillo, Barinas y El Tocuyo, etc., rompió las dos trazas (norte y sur) de la Falla de Boconó en Mucuchíes, así como las dos trazas de la misma falla en Lagunillas (Audemard *et al.*, 2008, trincheras Morro de los Hoyos y Mesa de El Caballo; Alvarado *et al.*, 2007b, trincheras La Pantaleta y Quinanoque). Otros sismos importantes son el de marzo de 1812 ($M \sim 5,4$) con epicentro cerca de Mérida (Laffaille y Ferrer, 2003) y el último sismo fuerte ocurrido en la región en el año 1932 ($M \sim 6,6$) con epicentro cerca de La Grita (Escobar y Rengifo, 2003).

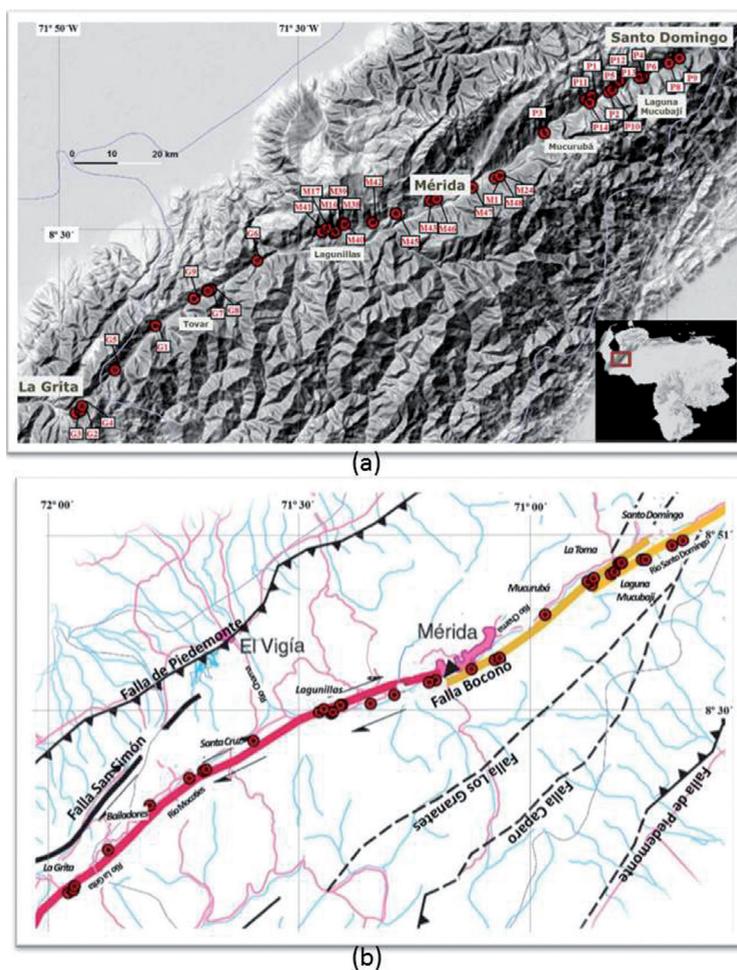


FIGURA 1. (a) Imagen digital de los Andes venezolanos entre las poblaciones de La Grita y Santo Domingo mostrando la ubicación de los perfiles de radón. Tomada de Garrity *et al.* (2004), con modificaciones. **(b)** Mapa de la zona con las fallas principales y algunas poblaciones importantes. Tomada de Audemard *et al.* (2000), con modificaciones.

MÉTODO EXPERIMENTAL

Para el estudio de fallas activas la medición del gas radón se realiza de tal forma que los puntos de muestreo formen un perfil, preferiblemente, perpendicular a la posible traza de falla, en cuyo intercepto, debería presentarse una anomalía positiva (máximo relativo) en la concentración del gas radón. Se recolecta el gas por medio de una sonda introducida en el suelo que se conecta a un medidor de flujo, al sistema de filtrado, la celda y a una bomba de succión. La sonda se introdujo en el suelo hasta 60 cm con la finalidad de mitigar posibles efectos del viento, humedad presión y temperatura ambiente. Adicionalmente, se impuso la condición de medir durante días soleados y además, que no hubieran ocurrido lluvias copiosas los días anteriores. Las muestras de gas radón se analizaron con un equipo Pylon AB-5, el cual detecta las partículas alfa mediante un fotomultiplicador, contando el centelleo que éstas producen en una celda tipo Lucas.

El equipo se programó con tres intervalos de conteo de un minuto cada uno después de llenada la celda, así el equipo emitirá el conteo del número de pulsos o cuentas por minuto (cpm), que es una medida de las cantidades relativas de radón en las celdas. Para calcular la concentración de ^{222}Rn se aplicó la ecuación de Morse a los tres intervalos (Labrecque, 2002). El radón total, el cual será el usado en este trabajo, se obtuvo del promedio de los tres intervalos, y el torón (^{220}Rn) es la diferencia entre el radón total y el ^{222}Rn . Nótese, que esta forma de cálculo no es única, LaBrecque (2002), por ejemplo, presenta seis métodos para dicho cálculo, y según el procedimiento de medición y el equipo, se aplican también otros métodos para determinar la actividad del radón, ver por ejemplo, LaBrecque and Cordovés (2004), Choubey *et al.* (2007), Gianmmanco *et al.* (2007), Lahti *et al.* (1998). En este trabajo se requiere comparar valores relativos de gas radón, por lo tanto, las gráficas se expresan en cpm. Cuando es necesario conocer los valores absolutos de la concentración del radón las cuentas por minuto pueden convertirse a unidades convencionales pCi/l o Bq/l por medio de un factor de calibración y una ecuación suministrada por el fabricante del equipo.

RESULTADOS

La medición de la concentración de gas radón en suelos para el segmento de la Falla de Boconó entre Santo Domingo y La Grita, se cumplió con la realización de 36 perfiles (FIGURA 1 y TABLA 1) en sitios con características disímiles de suelos, clima y vegetación,

con diferencias de alturas que abarcan de 750 m.s.n.m. en El Tabacal a los 3500 m.s.n.m. en Morro de los Hoyos. Aparte de criterios geomorfológicos, sísmicos y logísticos para la selección de los sitios, se tomaron en cuenta, además, los estudios paleosismológicos y la presencia de poblaciones. Aun cuando se conociera con precisión la ubicación de la traza de falla, los perfiles se hicieron de longitudes que en general superan los 100 m con la idea de ganar una mayor experiencia en la aplicación del método, incluso, algunos sobrepasaron los 500 m. Regularmente la separación entre los puntos del perfil se tomó de 15 m ó 20 m, pero cerca de la traza se disminuyó a cinco metros o menos según el caso. En referencia a la repetitividad del experimento, una sección de siete puntos del perfil P3, que abarca la llamada ensilladura de Mucurubá, medida originalmente en enero de 2007, se repitió en dos ocasiones (septiembre de 2009 y mayo de 2010), y en ambos casos la tendencia del perfil original se mantiene, no obstante, que los sitios de muestreo no son los mismos que los de ese perfil original. Por otra parte, dos puntos de esos perfiles (un punto de referencia y el máximo) se midieron con anterioridad en dos ocasiones, con un mes de diferencia (marzo y abril de 2009), y la discrepancia entre ambas medidas fue inferior al 5%, lo que resulta menor que el porcentaje de error considerado para este tipo de medición de gas radón con celdas Lucas, el cual se ha estimado del orden del 10 % por otros autores, ver por ejemplo, LaBrecque (2002).

La mayoría de los perfiles de la TABLA 1 se realizó en los meses de febrero-abril de 2007 y abril-junio de 2009, previo se habían realizado: M38, M39 y M40 en mayo 2006 (trincheras de Lagunillas); M24, P1 y P2 en marzo de 2005 y M1 y M16 en junio de 2004. En las FIGURAS 2 y 3 se presenta gran parte de ellos, y el resto, se muestra con más detalles en las FIGURAS 4 al 10.

Entre La Grita y La Playa de Bailadores, se tomaron cinco perfiles de radón (G1 a G5, FIGURA 2), atendiendo a los aspectos ya mencionados, en particular, los sísmológicos y considerando, además, que una de las primeras mediciones de gas radón en los Andes, se realizó justamente en La Playa (Aranguren *et al.*, 1999; Rengifo *et al.*, 2004), la cual, arrojó valores elevados en la concentración de dicho gas (~1200 cpm); el nuevo perfil (G1) realizado en ese lugar no mostró valores tan altos de concentración para la traza principal sino una amplia zona de 150 m de ancho con valor medio de 700 cpm y, un máximo de 1350 cpm lejos de traza principal.

TABLA 1. Perfiles de radón total en la Falla de Boconó, entre Santo Domingo y La Grita. La D se refiere a la detección de la traza (S=Sí; X=No; d= con duda). La longitud del perfil, en metros, se indica en la columna Lon (m). Las coordenadas (WGS84) se refieren al punto inicial (0 m) de cada perfil, y la columna Az se refiere al azimut del perfil tomando como referencia el punto de 0 m y en sentido hacia los puntos del perfil con valores positivos (+ x).

N°	D	Az.	Lon (m)	Nombre	Características	Coordenadas		Sector
						Latitud	Longitud	
G3	x	165°	225	El Judío.	<ul style="list-style-type: none"> • Escarpa • Sedimentos con espesores de suelo orgánico \geq a 2 m • Zona de 400 cpm hasta 30 m del escarpe. Otra traza de 600 cpm a 140 m del escarpe 	8° 7' 44"	71° 57' 51"	Cuenca Río La Grita
G2	d	330°	500	Trinchera La Grita	<ul style="list-style-type: none"> • Cerca de trinchera paleosismológica • Sedimentos arcillosos y coloidales, con un nivel freático muy superficial, y en los márgenes, depósitos coluviales con fragmentos de filitas de la Asociación Mucuchachi • Traza principal 300 cpm con nivel de base medio ~250cpm. Otras trazas 1000 y 2x500cpm 	8° 8' 5"	71° 56' 23"	
G4	s	285°	255	Las Porqueras	<ul style="list-style-type: none"> • Ensiladura • Material metamórfico altamente meteorizado de la Asociación Mucuchachi • Traza Principal 600 cpm; 450 cpm. Otra traza 300 cpm. Característico de roca fracturada. Contraste de Rn entre falda de montaña (~500 cpm) y parte plana (~200 cpm) 	8° 8' 35"	71° 56' 14"	
G5	s	120°	295	El Camarero	<ul style="list-style-type: none"> • Depresión • Material coluvial de gran potencia, compuesto principalmente de bloques angulosos de filitas y abundante matriz de arcillas y limos, ambos provenientes de la Asociación Mucuchachi • Dos Trazas asociadas a depresión 700 cpm. Otras trazas menores pendiente abajo. 	8° 13' 2"	71° 52' 10"	
G1	x	160°	440	La Playa de Bailadores	<ul style="list-style-type: none"> • Ensiladura • Gneises de la Asociación Sierra Nevada altamente fracturado y metamorizado • Zona de 150 m con 700 cpm, otra traza 1.350 cpm colina abajo 	8° 18' 24"	71° 47' 20"	Cuenca Río Mocuties
G9	s	150°	185	El Peñón	<ul style="list-style-type: none"> • No evidente rasgos tectónicos • En la falda de montaña filitas alteradas de la Asociación Tostós y en parte plana sedimentos • Traza principal (980 cpm). Otra traza en la falda de la montaña con 1.650 cpm. 	8°21'45"	71°42'33"	
G7	s	155°	570	El Tabacal Oeste	<ul style="list-style-type: none"> • No evidente rasgos tectónicos • La falda de la montaña filitas alteradas de la Asociación Tostós y en parte plana sedimentos • Traza principal 1.150 cpm. Otra traza en falda montaña (1.600- 1.180 cpm). Contraste de Rn entre falda de montaña (~1.000 cpm) y parte plana (~600 cpm) 	8°22'40"	71°40'50"	
G8	s	330	195	El Tabacal Este	<ul style="list-style-type: none"> • No evidente rasgos tectónicos • La falda de la montaña filitas alteradas de la Asociación Tostós y en parte plana sedimentos • Traza principal 1.450 cpm. Nivel de base medio en sedimentos ~800 cpm 	8°22'50"	71°40'30"	
G6	s	30°	103	Cerro San Felipe	<ul style="list-style-type: none"> • Ensiladura • La falla pone en contacto la Asociación Tostós con el Granito de Estanques • Traza principal 1800 cpm. Contraste de Rn entre falda de montaña (~1.400 cpm) y parte plana (~500 cpm) 	8°26'25"	71°34'42"	Cerro San Felipe
M41	s	195°	330	Qda. El Barro	<ul style="list-style-type: none"> • Sector oeste de la cuenca de tracción de Lagunillas, traza Norte • Sedimentos de terraza antigua • Entre dos trazas. Incremento en concentración Rn cerca de ambas trazas. 	8°29' 59"	71° 26' 35"	
M17	s	142°	400	El Volador	<ul style="list-style-type: none"> • Sector oeste de la cuenca de tracción de Lagunillas, traza Norte • Sedimentos antiguos principalmente de la Formación La Quinta • Zona de 70 m con 500 cpm 	8°30' 20"	71° 26' 0"	Traza norte de la cuenca de tracción de Lagunillas
M38	d	190°	284	La Pantaleta Oeste	<ul style="list-style-type: none"> • Traza norte de la cuenca de tracción de Lagunillas- • Sedimentos antiguos principalmente de la Formación La Quinta • Traza principal 400 cpm y 700 cpm. Otras trazas (1.000 y 1.700 cpm). Contraste de Rn entre falda de montaña (~700 cpm) y parte plana (~300 cpm) 	8°30' 51"	71° 23' 60"	
M40	d	230°	350	La Pantaleta Este	<ul style="list-style-type: none"> • Traza norte de la cuenca de tracción de Lagunillas • Sedimentos antiguos principalmente de la Formación La Quinta • Traza principal 450 cpm. Otra falla 1.150 cpm (duplete) 	8°30' 53"	71° 23' 45"	
M39	d	0°	271	Quinanoque	<ul style="list-style-type: none"> • Parte central de la cuenca de tracción de Lagunillas • Sedimentos de terraza antigua y paleolaguna • Traza principal 550 cpm. Contraste de Rn sedimentos finos (~400 cpm) - consolidados (~700 cpm) 	8°30' 0"	71° 24' 53"	Traza sur de la cuenca de tracción de Lagunillas
M16	x	350°	408	El Molino	<ul style="list-style-type: none"> • Parte central de la cuenca de tracción de Lagunillas • Sedimentos de terraza antigua • Máximo 850 cpm lejos de traza principal 	8° 29' 51"	71° 25' 6"	
M42	x	340°	128	Estanquillo Alto	<ul style="list-style-type: none"> • Escarpa? • Sedimentos terraza • Valor medio 400 cpm 	8°31' 5"	71°20'15"	Ejido
M45	s	150°	110	Mesa de Los Indios	<ul style="list-style-type: none"> • Deslizamiento • Sedimentos coloidales y saprolitos de la Formación Tostós • Traza principal (1.350 cpm), sobre masa deslizada. Nivel de base medio ~ 850 cpm 	8°32'11"	71°17'21"	
M43	s	338°	70	Campo Claro Oeste	<ul style="list-style-type: none"> • Escarpe • Sedimentos abanicos y conos interdigitados con diversos aportes • A 45 m de la base de Escarpe 550 cpm. Nivel de base medio ~300 cpm 	8°33'44"	71°13'6"	
M46	s	180°	160	Campo Claro Este	<ul style="list-style-type: none"> • Escarpe • Sedimentos abanicos y conos interdigitados con diversos aportes • Traza principal (500 cpm); a 35 m otra traza? de 700 cpm. Nivel de base medio ~300 cpm 	8°34'00"	71°12'16"	
M47	s	150°	193	Posada Doña Rosa	<ul style="list-style-type: none"> • Loma desplazada • Pizarras muy fracturadas y meteorizadas de la Asociación Mucuchachi • Traza principal 800 cpm. Otras trazas sobre el lomo. Contraste de Rn entre lomo y parte plana 	8°35'24"	71°7'53"	
M1	s	0°	830	Loma del Toro	<ul style="list-style-type: none"> • Morfología de tipo ensilladura en la falda de la Sierra Nevada • Metamórficas muy fracturadas y meteorizadas de la Asociación Sierra Nevada • Traza principal 1.180 cpm. Otra falla de 900 cpm 	8°36'31"	71° 5' 3"	Mucunután -Mucurubá
M24	s	308°	680	Agua Pinta	<ul style="list-style-type: none"> • Morfología de tipo ensilladura en la falda de la Sierra Nevada • Metamórficas muy fracturadas y meteorizadas de la Asociación Sierra Nevada • Traza principal 450 cpm. Otras trazas menores diagonales de 300 y 700 cpm 	8°36' 47"	71° 04' 29"	
P3	s	315°	560	Mucurubá	<ul style="list-style-type: none"> • Morfología de tipo ensilladura en la falda de la Sierra Nevada • Metamórficas muy fracturadas y meteorizadas de la Asociación Sierra Nevada • Traza de 800 cpm y traza principal duplete de 850 cpm. Nivel de base 50 cpm. 	8° 42' 0"	70° 59' 1"	
P11	s	330°	49	La Toma	<ul style="list-style-type: none"> • Escarpa • Cono de deyección con lavas torrenciales, con máxima acumulaciones de bloques al pie de la escarpa • En base de la escarpa 430 cpm. Nivel de base 275 cpm. 	8°45'59"	70°53'55"	Traza norte de la cuenca de tracción de Mucuchies
P1	s	343°	180	El Cerrito	<ul style="list-style-type: none"> • Trinchera, escarpa • Metamórficas muy fracturadas y meteorizadas de la Asociación Sierra Nevada • Traza principal (850 cpm). A 80 m en falda de la montaña otra traza? (850 cpm) 	8°46'24"	70°53'12"	
P5	d	180°	355	Morro de Los Hoyos	<ul style="list-style-type: none"> • Lomo de obturación • Sedimentos coloidales sobre metamórficas muy fracturadas y meteorizadas de la Asociación Sierra Nevada • Traza principal 575 cpm. Nivel de base medio 400 cpm. A 45 m otra traza de 1.200 cpm. 	8° 48' 7"	70° 50' 15"	
P12	s	175°	90	Mucubají Este	<ul style="list-style-type: none"> • Atraviesa un lomo de obturación • Sedimentos coloidales al pie de la montaña sobre metamórficas muy fracturadas y meteorizadas de la Asociación Sierra Nevada • Lomo presión 350cpm. A 60 m Otra falla 350 cpm. Nivel de base medio 170 cpm 	8°48'13"	70°49'53"	
P13	x	175°	120	Mucubají Oeste	<ul style="list-style-type: none"> • Atraviesa un sitio inter-lomos de obturación • Sedimentos coloidales al pie de la montaña sobre metamórficas muy fracturadas y meteorizadas de la Asociación Sierra Nevada • Lomo cubierto? a 70 m anomalía de 550 cpm otra falla 	8°48'13"	70°49'59"	
P14	s	160°	44	El Royal	<ul style="list-style-type: none"> • Contraescarpa, evidencia de transcurrencia • Cono de deyección con importante desarrollo de suelo orgánico. Asociación Sierra Nevada • Traza principal en base del escarpe (250 cpm). A 15 m de base otra traza de 500 cpm 	8°45'34"	70°53'28"	Traza sur de la cuenca de tracción de Mucuchies
P2	s	340°	100	El Pedregal	<ul style="list-style-type: none"> • Lomo de compresión. Parte central de la cuenca de tracción • Importante desarrollo de suelo orgánico sobre depósitos periglaciares y glaciares de gneises y esquistos de la Asociación Sierra Nevada • Lomo de presión traza principal 700 cpm. Nivel de base medio 120cpm 	8° 46' 53"	70°51' 9"	
P10	d	165°	14	La Mesa del Caballo	<ul style="list-style-type: none"> • Lomo de compresión. Parte central de la cuenca de tracción • Importante desarrollo de suelo orgánico sobre depósitos periglaciares y glaciares de gneises y esquistos de la Asociación Sierra Nevada • 200 cpm a 2 m de la traza principal. Nivel de base medio 120 cpm. 1 m entre puntos 	8°47'8"	70°50'45"	
P4	s	200°	125	Qda. Los Zerpa	<ul style="list-style-type: none"> • Morrena desplazada por movimiento transcurrente • Sedimentos morrénicos de gneises y esquistos de la Asociación Sierra Nevada • Morrena desplazada traza principal 130 cpm. Nivel 70 cpm 	8° 48' 40"	70° 47' 20"	
P6	d	340°	255	Los Frailes	<ul style="list-style-type: none"> • Cerca de laguna de falla • Sedimentos morrénicos de gneises y esquistos de la Asociación Sierra Nevada • Traza principal 80 cpm. Nivel 60 cpm. Otras trazas dos de 100 cpm • Lomo de compresión 	8° 48' 42"	70° 46' 51"	
P8	x	320°	183	El Baho	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentos coluviales de gneises y esquistos de la Asociación Sierra Nevada • Valor medio ~70 cpm 	8° 50' 33"	70° 43' 29"	
P9	s	320°	320	E.T.C Juan Rodríguez Suárez	<ul style="list-style-type: none"> • Depresión y Ciénaga de falla • Importante desarrollo de suelo orgánico sobre depósitos sedimentos terraza de gneises y esquistos de la Asociación Sierra Nevada • Traza principal 320 cpm. Nivel de base medio 150 cpm. 	8° 51' 11"	70° 42' 5"	

Uno de los perfiles más representativos de esta sección es el G2, tomado cerca de La Grita, con longitud de 500 m y atravesando la Falla de Boconó en un lomo de obturación donde Funvisis excavó una trinchera para estudios paleosismicos (Audemard, 1997). El perfil de Rn (FIGURA 4) se realizó entre la falda de una montaña de alta pendiente (SE) y el tope del mencionado lomo de obturación (NO), separados por una zona plana de sedimentos arcillosos. En la falda de montaña se observan dos pequeños desniveles que podrían asociarse con los altos valores en la concentración de radón (700 y 1000 cpm) que se obtienen en ella, que por la elevada inclinación, podrían corresponder a una sola traza. En la parte plana sobresale otro máximo relativo (600 cpm), así como también otro, en la cima del lomo (500 cpm), coincidiendo con una pequeña depresión del terreno. En el sitio de la trinchera (flecha F de la FIGURA 4) el valor de la concentración de Rn no se diferencia mucho del nivel base promedio. En resumen se obtienen tres valores pico de Rn que podrían relacionarse a tres trazas: una en la montaña, otra en los sedimentos y la otra sobre el lomo; no se detecta suficientemente la traza principal de la Falla de Boconó, objetivo del muestreo.

Cortando una escarpa de la falla, aguas abajo del sitio de G2, en la zona de El Judío, se realizó el perfil G3 (FIGURA 2). En el mismo no es posible distinguir la traza de falla cerca de la base de escarpa, pero a 150 m de ésta, el perfil muestra un máximo relativo de 600 cpm, que debe corresponder a otra traza.

En Mesa Alta (Las Porqueras), a unos 800 m al NE del G2, en una loma cortada por la falla, se muestreó el perfil G4 (FIGURA 2), que permite identificar cuatro posibles trazas: una en la falda de una montaña contigua (500 cpm, las medidas en la falda se indican con una línea horizontal en el perfil correspondiente de la FIGURA 2); otra, en la zona de inflexión entre la montaña y la loma, traza principal? (500 cpm); otra, a 30 m de ésta, con igual concentración de Rn y, 60 m más adelante, con 300 cpm, se observa un pequeño pico cuya posición coincide con una traza visible en el corte de la carretera.

Cerca de Bailadores, en el sector El Camarero, la Falla de Boconó comprende dos trazas (norte y sur) cuasi-paralelas muy marcadas y separadas por ~400 m. La traza sur muestra rasgos geomorfológicos bien desarrollados y en ella se tomaron los datos del perfil G5 que comprende una elevada pendiente continuada por una amplia depresión que culmina en un lomo y para bajar luego por otra pendiente similar a la primera. Se presume que la rama sur de la falla se expresa en esta zona con dos trazas paralelas ubicadas a ambos lados

de la depresión, donde se detectaron máximos relativos en la concentración de Rn de 700 cpm: en la segunda pendiente se detectan otros dos picos menores de radón.

Entre Tovar y Estanques, se efectuaron cuatro perfiles, tres de ellos (G7, G8 y G9; FIGURAS 2 y 5) en sitios cercanos a urbanismos desarrollados casi sobre la traza de la falla. Los dos primeros tienen aproximadamente las mismas condiciones geomorfológicas: una parte de montaña de alta pendiente y otra cuasi-plana con abundante material coluvial, lo cual se identifica por el cambio en el valor de concentración de radón que se manifiesta elevada en la falda de la montaña con valores pico de hasta 1700 cpm, mientras que en la plana muestra un nivel medio de 600 cpm; el G9 prácticamente se tomó sobre la parte plana. En todos los casos la falla se identifica claramente en los perfiles y en ellos se ha señalado con una línea horizontal el cambio de pendiente (FIGURAS 2 y 5). A manera de ejemplo se muestra el perfil G7 en la FIGURA 5, el más largo tomado en esta zona, con la intención de cubrir una sección amplia de la falda de la montaña; la flecha F en la FIGURA 5 indica la posición de la traza de la Falla de Boconó, los otros picos en la concentración de Rn podrían asociarse a trazas en la falda de la montaña, y sus altos valores en la concentración, podrían deberse a un menor espesor en la capa de sedimentos.

El perfil G6 (FIGURA 2) realizado en una ensilladura del cerro San Felipe, cerca del sitio donde el río Mocotíes abandonó su antiguo cauce para tomar rumbo hacia el norte, arroja resultados similares a los tres anteriores, aunque en este caso la pendiente de la montaña es más suave, detectándose en forma clara la traza en un extremo de la ensilladura (1.800 cpm), con otra posible traza a los 25 m (1600 cpm); la media en la ladera es de 1.200 cpm.

En la zona de Lagunillas, sobre trazas que delimitan la cuenca de tracción del mismo nombre, definida recientemente por Alvarado *et al.* (2007b), se trabajaron siete perfiles de radón, tres sobre la traza norte (M17, M38 y M40; FIGURAS 2 y 6), tres sobre la sur (M16, M39 y M42; FIGURAS 2 y 3) y uno, el M41 (FIGURA 3), con el que se pretendía tocar las dos trazas, pero que no se pudo concluir. Los perfiles se realizaron sobre los depósitos de color rojo a amarillento que provienen de la Formación La Quinta, predominantemente arcillosos con abundantes sales (carbonato de sodio, gaylusita), lo que les da una estructura muy compacta, con una capa de suelos desérticos poco desarrollados, que dificulta la introducción de las sondas para medir el gas radón.

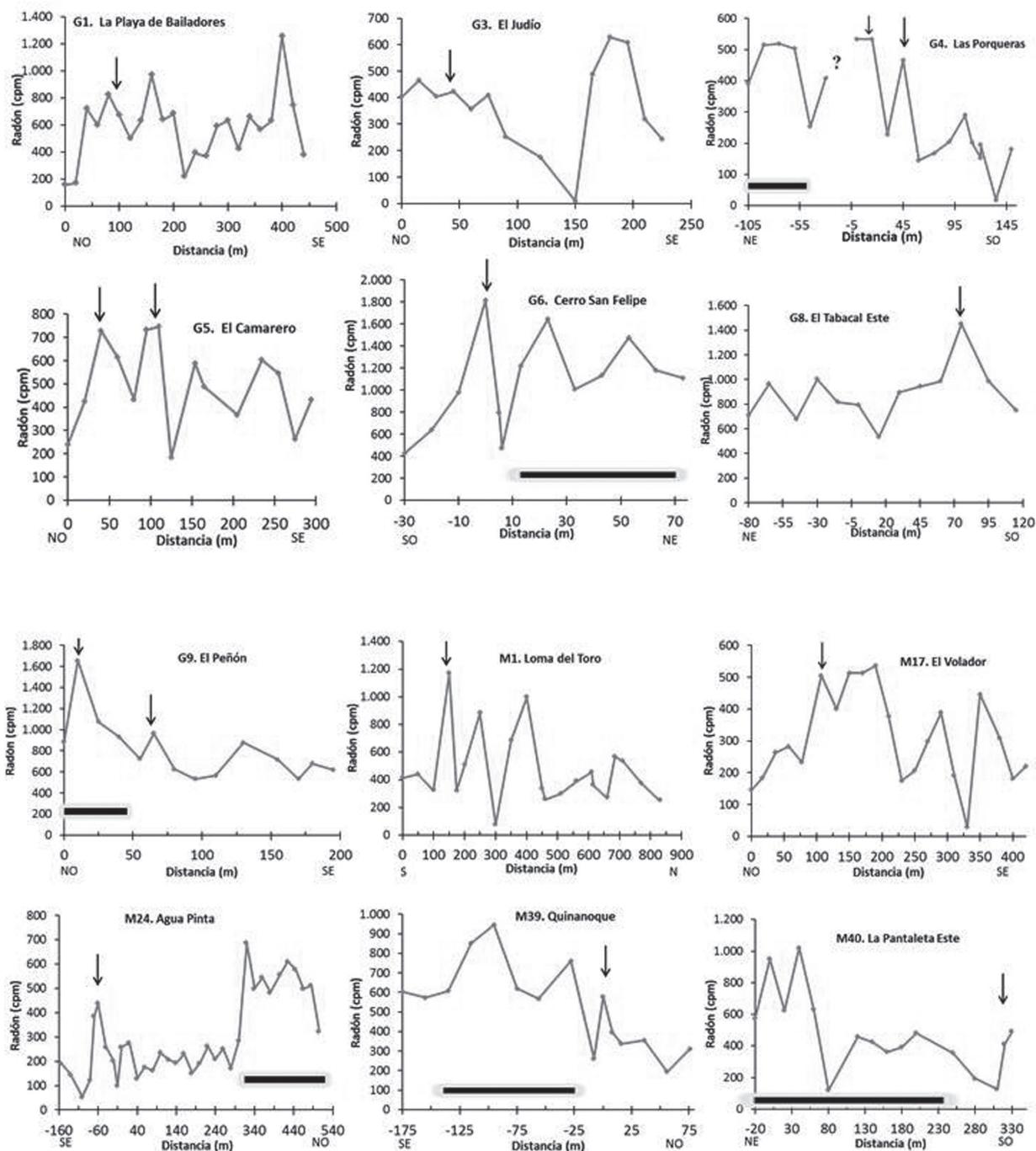


FIGURA 2. Gráficas de concentración de radón total para los perfiles G1, G3 a G6, G8, G9, M1, M17, M24, M39 y M40. Las flechas señalan la posición aproximada de la traza (o trazas) de la Falla de Boconó según la geomorfología. La línea horizontal en algunos perfiles indica un cambio litológico o morfológico.

El perfil M17 se hizo sobre una loma en el sector El Volador y el sitio donde la traza corta la loma queda dentro de una zona de aproximadamente 70 m de largo con alto valor relativo en la concentración (500 cpm). Los otros dos perfiles (M38 y M40) se realizaron en la falda de la montaña frente a la laguna de Urao, atravesando

un lomo de obturación en el cual Alvarado *et al.* (2007b) hicieron un estudio paleosísmico mediante trinchera (La Pantaleta). Sobre el lomo la distancia entre los perfiles es de 220 m y están separados por una quebrada de cauce profundo; el perfil M40 es diagonal en relación al M38 cuyo azimut es aproximadamente norte-sur. La traza se

detecta débilmente en estos perfiles, en particular en el M38, mostrado en la FIGURA 6, que pasa justo a un lado de la trinchera, sin embargo, a 15 m del incipiente pico observado en la traza de la trinchera, se encuentra otro, más representativo, que posiblemente corresponda a otra fractura asociada a la misma traza; el perfil muestra otros valores pico en la concentración (1.000 y 1.800

cpm) correlacionables con trazas observadas en un corte del terreno, cuasiparalelo al perfil, en la carretera que conduce a La Trampa. En el sitio de la traza, el agua que descende por la ladera produce la acumulación de sedimentos finos, donde la concentración de radón es baja; la mayor concentración se encuentra en la ladera sobre sedimentos consolidados de Formación La Quinta.

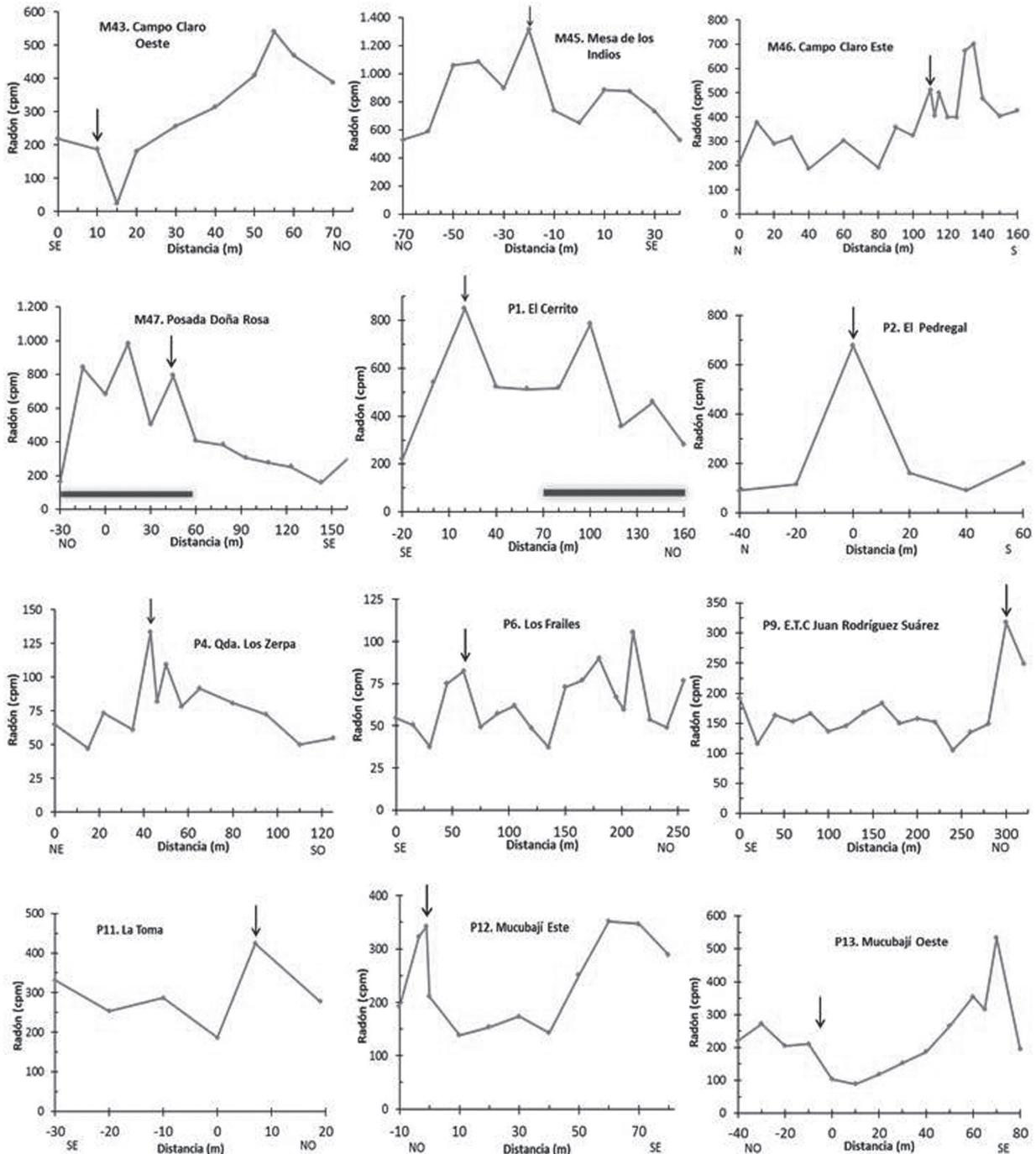


FIGURA 3. Gráficas de concentración de radón total para los perfiles M43, M45 a M47, P1, P2, P4, P6, P9 y P11 a P13. Las flechas señalan la posición aproximada de la traza de la Falla de Boconó. La línea horizontal en algunos perfiles indica un cambio litológico o morfológico.

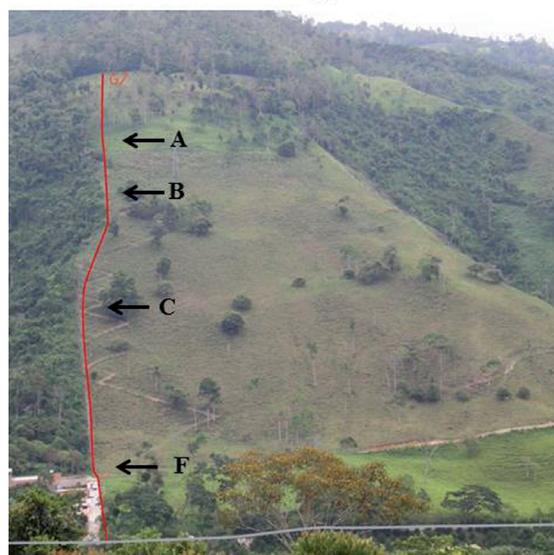
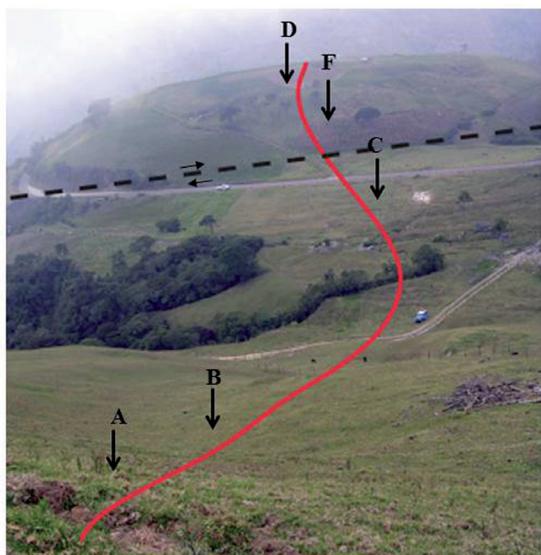
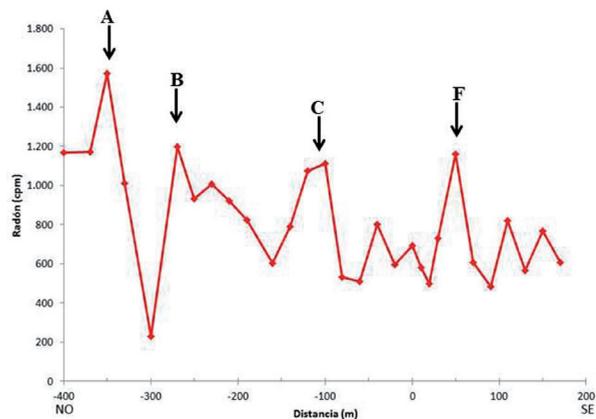
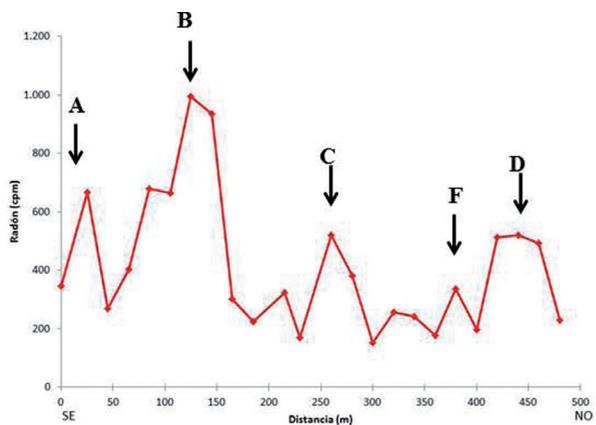


FIGURA 4. Perfil G2 (Trinchera La Grita). Las flechas señalan, aproximadamente, la ubicación sobre el terreno de algunos máximos relativos de Rn total. La ubicación de la traza de la Falla de Boconó es indicada por la flecha identificada con la letra F.

FIGURA 5. Perfil G7 (Tabacal Oeste). Las flechas señalan, aproximadamente, la ubicación en el terreno de algunos de los valores pico de Rn total. La ubicación de la traza de la Falla de Boconó es indicada por la flecha identificada con la letra F.

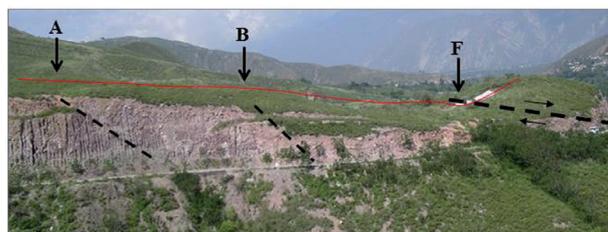
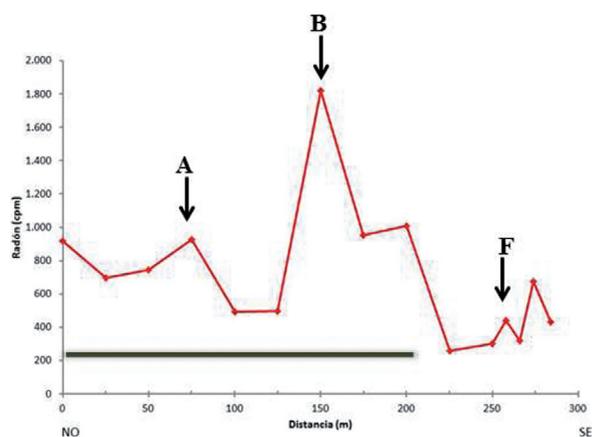


FIGURA 6. Perfil M38 (Trinchera La Pantaleta). Las flechas señalan, aproximadamente, la ubicación en el terreno de algunos de los valores pico de Rn total. La flecha con la letra F señala la posición de la traza de la Falla de Boconó y de la trinchera de Alvarado *et al.* (2007). Las otras flechas señalan las posiciones de las trazas (líneas segmentadas) observadas en el corte de la carretera. Nótese que la concentración de radón total apenas es perceptible en la traza de Boconó.

La traza sur sólo se detectó, aunque muy pobremente, en el perfil M39 (FIGURA 2), tomado justo al lado oeste de la trinchera Quinanoque (Alvarado *et al.*, 2007b), realizada en un lomo de obturación; en el perfil se nota la diferencia entre los suelos del lomo (sedimentos consolidados de la Formación La Quinta) con valor medio de 700 cpm y los sedimentos finos de una antigua laguna con 300 cpm. Los resultados de las otras mediciones: perfil M16 (~500 m al oeste de M39) y M42 en El Estanquillo Alto (no mostrados en las figuras) no permiten identificar esta traza de la falla.

En el sector Mesa de los Indios, cerca de Ejido, sobre un gran deslizamiento, se tomó el perfil M45 (FIGURA 3), que muestra un máximo en la concentración de Rn en su parte media (1.350 cpm), indicando la traza de la falla; hacia los lados la concentración decae, coincidiendo con los límites de la masa deslizada.

En las inmediaciones de Mérida se realizaron seis perfiles sobre la Falla de Boconó, dos hacia el oeste y cuatro en la zona sureste, donde esta falla presenta, al menos, dos trazas cuasi-paralelas. Los perfiles al oeste de Mérida, M43 y M46 (FIGURA 3), se realizaron en la zona de Campo Claro, distanciados 1,5 km. El primero corta una escarpa de la falla y el máximo valor de la concentración de radón se observa a 45 m de la base de la escarpa. El perfil M46 también corta una escarpa, y muestra dos picos (520 cpm) en forma de duplete a 10 m de la base de la escarpa, y a unos 20 m de éstos, otro máximo de 700 cpm, indicando dos posibles trazas.

Al este de Mérida, la expresión de la falla está determinada por varias trazas paralelas las cuales ejercen un control estructural en la zona, dando lugar a una serie de rasgos geomorfológicos como ensilladuras, colinas redondeadas, drenajes desplazados, drenajes sin cabeza y escarpas. Sobre dos lomas alargadas y subparalelas (Loma del Toro y Loma Agua Pinta), al pie de la Sierra Nevada, se tomaron los perfiles M1 y M24 (FIGURA 2); en ambos casos se encuentran valores picos en la concentración de radón de 1.180 cpm y 450 cpm, respectivamente, en ensilladuras formadas por la traza conocida como falla La Mucuy, además, se obtienen otros dos valores pico de Rn en cada caso, asociados a fallas menores (Rengifo y Aranguren, 2005). En el perfil M24 se observa claramente la separación entre la ensilladura algo angosta y la loma amplia y redondeada que exhibe mayor concentración de radón, lo que quizá se debe a un escape de gas por los laterales de la ensilladura.

Cortando otra de las trazas se tomaron los perfiles M47 y M48. El M47 (FIGURA 3) abarca una zona plana y

parte de una loma alargada paralela a la traza, zonas bien diferenciadas por el gas radón. Se obtienen dos picos de concentración de radón sobre la loma y otro cerca de su base donde se supone está la traza. El perfil M48 (no mostrado) se realizó a través de una escarpa, pero no se obtienen resultados concluyentes por el alto nivel freático en la zona que en algunos sitios está a menos de medio metro desde la superficie.

El resto de los perfiles se realizaron en el páramo de Mucuchíes, el P3 en Mucurubá (FIGURA 7), a lo largo de una loma que muestra dos ensilladuras una suave en su zona media y otra muy marcada en su extremo (NO) frente a Mucurubá. Las trazas que generan las ensilladuras son bien detectadas (~800 cpm); la ubicada al NO tiene forma de duplete y abarca una amplia zona de 40 m. Se aprecian además, otros picos de menor amplitud en la concentración de Rn que pueden tener su origen en fracturas menores. Al comparar las medidas de concentración de Rn en la ensilladura con mediciones previas en 1998 (Aranguren *et al.*, 1999) se encuentra coherencia tanto en los valores máximos como en el ancho de la zona (50 m) de máximo.

Sobre la traza norte de la cuenca de tracción de Mucuchíes se trazaron cinco perfiles. En la conocida escarpa de La Toma, en una acumulación fluvial producto de lavas torrenciales (Tricart et Millies-Lacroix, 1962) se realizó el perfil P11 (FIGURA 3), el cual se hizo muy corto debido a lo pedregoso del terreno que dificulta la introducción de la sonda. Justo en la base de la escarpa se encuentra un pico en la concentración de radón (430 cpm) revelando la posición de la traza de falla. A un kilómetro y medio al NE de P11, en el sitio El Cerrito, en una depresión de la falla, se tomó el perfil P1 (FIGURA 3), que muestra dos picos de radón (~850 cpm), uno de ellos (la traza buscada) justo en el cambio de pendiente entre la depresión y una loma contigua, y el otro, aproximadamente a 80 m del primero, sobre la falda de la loma.

El perfil P5 (FIGURA 8) se trazó ligeramente diagonal a la trinchera realizada en el sitio conocido como Morro de los Hoyos durante el South American Workshop on Paleoseismology (SAWOP) en 1997 (Audemard *et al.*, 1999). No obstante que en dicha trinchera se precisan tres zonas de falla, el perfil de la FIGURA 8 sólo muestra un valor pico de concentración de Rn y de poca amplitud relativa (575 cpm, flecha F) en el sitio de trinchera; el valor máximo (~1220 cpm) está alejado de la misma. La flecha A de la FIGURA 8 señala una de las zonas de falla, la zona más distante de ésta, a la que se

atribuye el último movimiento de esta traza (Audemard *et al.*, 1999) coincide aproximadamente con el valor pico mencionado. El máximo valor de concentración

ocurre ~45 m pendiente arriba en la falda de la montaña, posiblemente corresponda a una fractura en la roca cubierta con menos sedimentos.

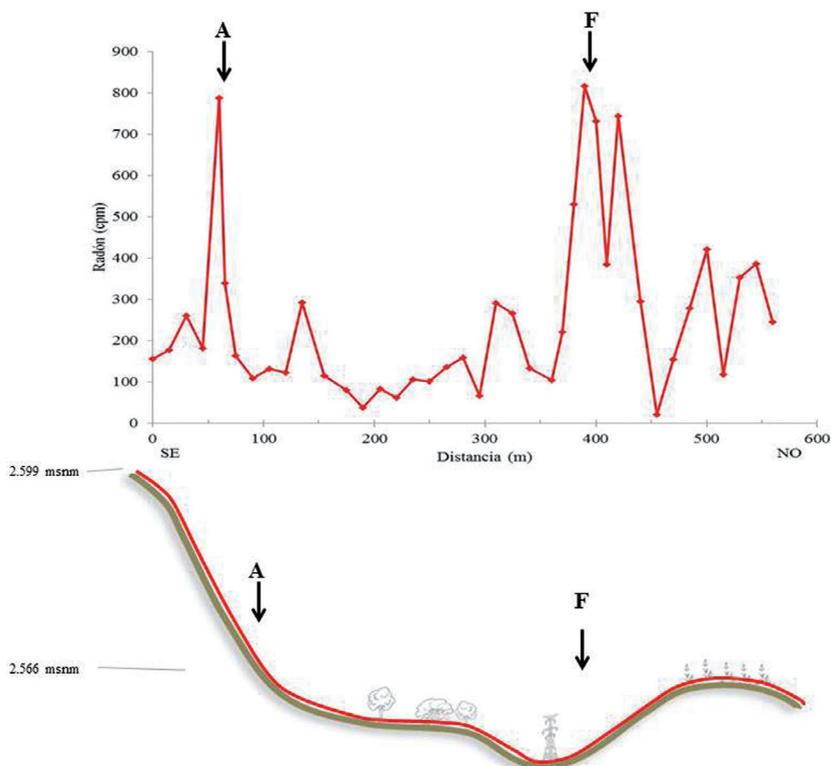


FIGURA 7. Perfil P3 (Mucurubà). Las flechas señalan las trazas de la Falla de Boconó determinadas geomorfológicamente y son coincidentes con los máximos relativos de radón total.

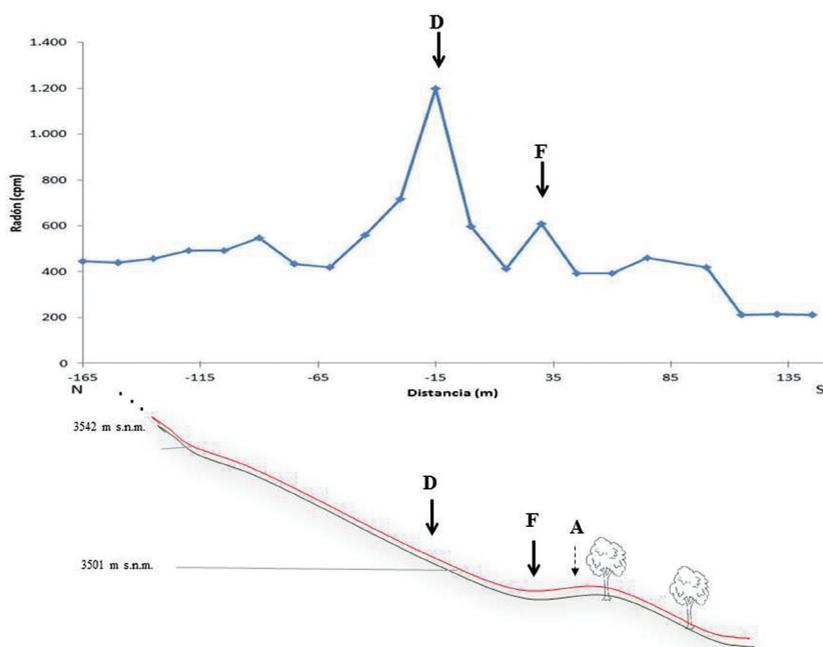


FIGURA 8. Perfil P5 (Morro de los Hoyos). La flecha A señala la “zona de falla A” de la trinchera de Audemard *et al.* (1999); el pequeño pico de Rn total aproximadamente se corresponde con la “zona C” de los mismos autores (flecha F). La mayor anomalía de Rn total (flecha D) corresponde a otra posible traza.

Aproximadamente a 500 m al este de P5, en la misma traza de falla y con la misma orientación de éste, se realizaron P12 y P13 (FIGURA 3), subparalelos y distanciados 180 m. Los perfiles P5 y P12 tienen una morfología y litología similar, pero en P13 no existen ni el lomo ni la depresión que definen la traza. En P12 se obtiene un máximo relativo en la concentración (350 cpm) justo al comenzar el lomo y, una zona de ~30 m de ancho con un valor similar de concentración entre los 50 m y 80 m pendiente arriba en la falda de montaña (otra traza?); en el perfil P13 no se diferencia la traza, pero, se obtiene un máximo muy bien definido en la concentración de Rn (550 cpm) a los 70 m pendiente arriba (otra traza?).

Sobre la traza sur, en la cuenca de tracción de Mucuchíes, se tomaron siete perfiles. En El Royal en una contraescarpa de la falla se trabajó el perfil P14 (FIGURA 9), el cual, refleja un pequeño, pero muy claro pico en la concentración de radón (250 cpm), justo en la base de la escarpa; a medida que se aleja de la escarpa, aumenta la concentración hasta alcanzar un máximo relativo de ~ 500 cpm a los 18 m desde la misma, lo que podría indicar la presencia de otra traza.

Los perfiles P2 y P10 (FIGURAS 3 y 10) se realizaron en la denominada Mesa del Caballo, la cual es una loma algo alargada conformada por sedimentos glaciares, donde la traza sur de Boconó se expresa a través de fallas en *échelon* (*R-shears*) conectadas por lomos de presión. En dirección perpendicular a una de estas fallas, Funvisis (Audemard *et al.*, 2008) cavó una trinchera en el año 2004 y, paralelo a esa trinchera se trabajó el perfil

P10. Este perfil muestra un pico en la concentración de Rn (200 cpm), pero, desplazado 2 m de la posición de la traza, tal como puede apreciarse en la FIGURA 10 donde se muestran tanto el perfil de radón como el perfil estratigráfico de la trinchera (Audemard *et al.*, 2008). Siguiendo el lomo en dirección SW, aproximadamente 900 m hacia la zona de El Pedregal, se realizó el perfil P2 (FIGURA 3). Este corto perfil de 100 m de longitud arrojó los resultados esperados: en la base del lomo se obtiene el máximo en la concentración de gas radón (700 cpm), indicando la presencia de la falla.

El perfil P4 (FIGURA 3) se tomó sobre el material morrénico cercano a la quebrada Los Zerpa en la vertiente derecha del río Santo Domingo, en el sitio donde la falla corta y desplaza la morrena Los Zerpa y desplaza el drenaje de la quebrada del mismo nombre. A unos 10 m de la base de la morrena desplazada el perfil muestra un máximo relativo de radón (140 cpm), sobre un nivel base medio de 70 cpm. En esta zona la traza norte ya no se observa. A poca distancia de este lugar, frente al hotel Los Frailes se realizó el perfil P6 (FIGURA 3), cerca de una laguna de falla, pero sobre el filo de la falda de la montaña para evitar, en lo posible, la humedad del terreno. Los datos obtenidos de concentración de radón reflejan débilmente la presencia de la falla con un valor pico de 80 cpm sobre un nivel base de 60 cpm, sin embargo, 120 m más abajo se obtienen dos picos ligeramente mayores. En general, los valores de concentración de radón son bajos (menor a 120 cpm) y no se observa ningún máximo bien definido. Es posible que la capa de sedimentos glaciares, presumiblemente alta, esté influyendo sobre los valores de concentración del mencionado gas.

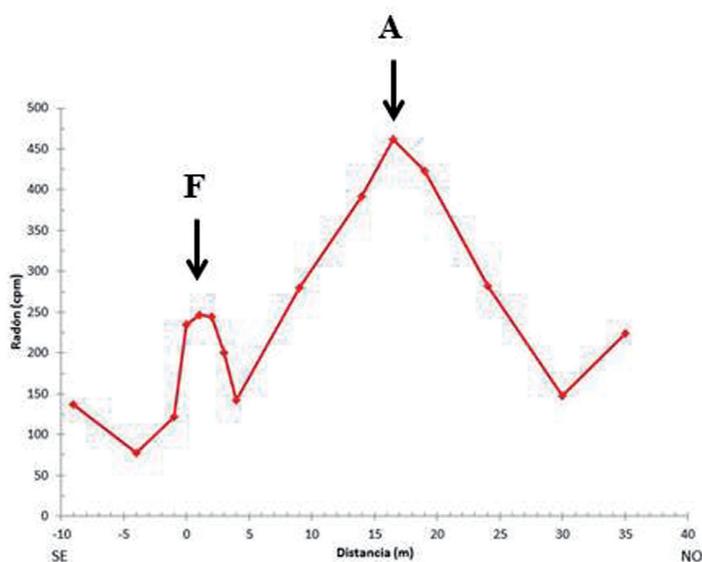


FIGURA 9. Perfil P14 (El Royal). La flecha F señala la traza al pie de la escarpa; la flecha A señala la posición de otra posible traza con mayor concentración de radón.

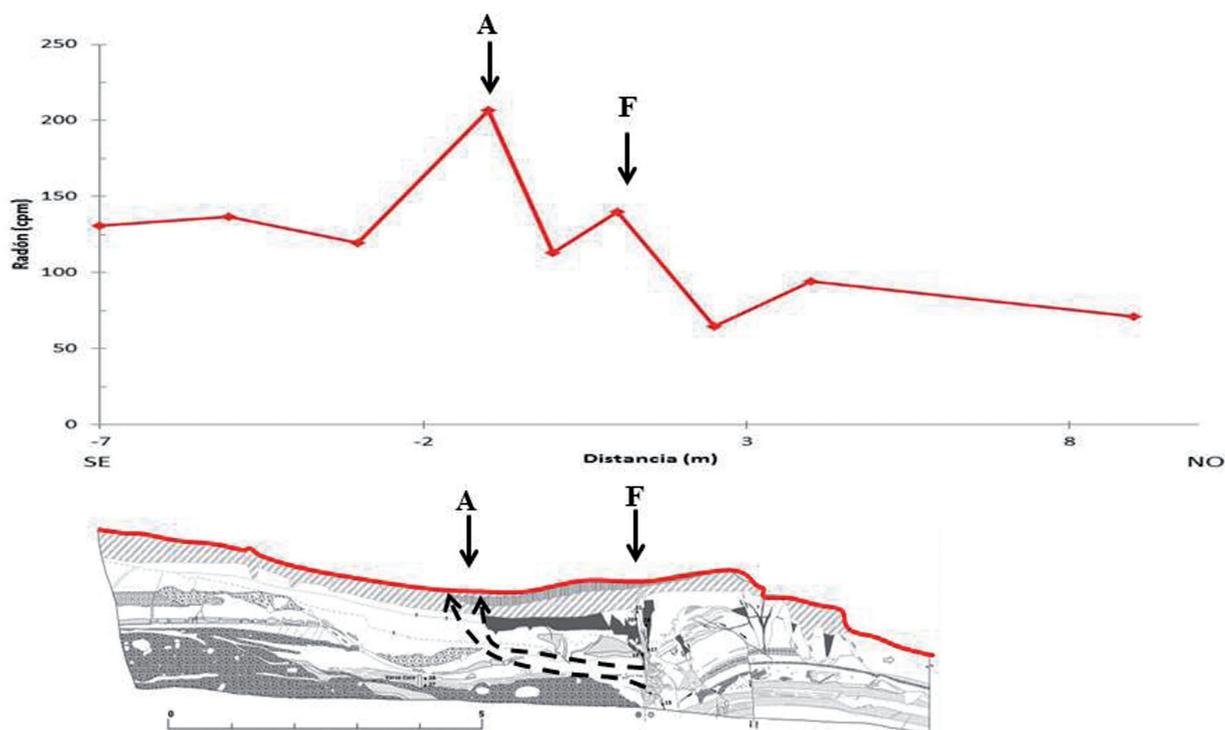


FIGURA 10. Perfil P10 (Mesa del Caballo). La flecha F señala la traza de la falla que corresponde a un pequeño pico de radón. La capa de arcilla parece desviar el flujo de Rn (flechas segmentadas), concentrándolo en uno de sus extremos (pico de mayor amplitud). El perfil estratigráfico (pared este de la trinchera) se tomó de Audemard *et al.* (2008), con modificaciones.

Cerca de Santo Domingo, en la zona de El Baho, se hicieron los perfiles P8 (no mostrado) y P9 (FIGURA 3). El primero se tomó en la parte distal del abanico aluvial en El Baho, detrás de la truchicultura, atravesando un lomo de presión y una pequeña depresión. Los resultados muestran bajos niveles en la concentración de radón (< 100 cpm), con un mínimo en la base del lomo, donde se depositan los sedimentos más finos; no se pudo determinar a través de radón la posición de la traza. Aproximadamente 2,8 km hacia el NE de P8, entre la Escuela Técnica Juan Rodríguez Suárez y el talud del río Santo Domingo se trabajó el perfil P9, el cual atraviesa un pequeño lomo asociado con una depresión y ciénaga de falla, rasgos casi borrados por intervención antrópica. A un lado del lomo, muy cerca de la ciénaga de falla, se observó el máximo en la concentración de radón de 320 cpm, coincidiendo en el terreno con la posición esperada para la traza de la Falla de Boconó.

DISCUSIÓN

Parte del interés del presente trabajo es caracterizar la falla y su entorno, en los distintos sitios, mediante el valor de concentración de Rn; por esta razón muchos de los perfiles no se restringen sólo a ubicar la traza de falla, sino que abarcan distancias considerables a uno o

ambos lados de dicha traza, como los perfiles G2, G7 y M1. Por otra parte, debido a que el área de trabajo es una zona de montaña, algunos de los perfiles se ubicaron total o parcialmente sobre faldas de montañas, de los cuales el G2 (FIGURA 4) es un buen ejemplo. Este tipo de perfil resulta de interés ya que aparte de la falla buscada, en la zona de ladera se obtuvo, por lo general, un valor pico en la concentración de Rn que supera o iguala al valor en la traza. Este también es el caso de los perfiles tomados en la traza norte de la cuenca de tracción de Mucuchíes, tres de los cuales están separados por poca distancia y cruzan el mismo lomo de falla: P5 (FIGURA 8), P12 y P13 (FIGURA 3); el otro, P1 (FIGURA 3) está algo alejado de éstos, pero su perfil topográfico es similar. En estos cuatro perfiles los picos de Rn en las correspondientes laderas se ubican a distancias comprendidas entre 40 m y 80 m de la traza norte. Si se consideran esas cuatro anomalías en conjunto, podrían sugerir la presencia de una traza paralela a la ya mencionada, pero como no se observaron evidencias geomorfológicas que soporten tal hipótesis, es preferible pensar en fracturas en la roca o en fallas menores, que debido al menor espesor de sedimentos en el sitio, muestran una mayor concentración de gas radón. En realidad para definir mediante radón si estos picos en la concentración representan otra traza, habría que

efectuar cerca de cada uno de estos sitios un conjunto de perfiles paralelos, lo cual escapa del objetivo del presente trabajo.

Otro perfil con cierta similitud es el M38 (trinchera La Pantalera, FIGURA 6), pero en este caso, los altos valores de Rn que se obtienen en la falda de la montaña, pueden asociarse con fallas que se observan en el corte de la carretera. Similares características presentan también los perfiles G4, G6, M40 y G7 (FIGURAS 2 y 5).

Los perfiles G3 (FIGURA 2), M43, M46, P11 (FIGURA 3) y P14 (FIGURA 9) se tomaron cortando escarpas de la falla y sobre superficie relativamente plana o de poca pendiente. Los dos primeros no permiten identificar la traza al pie de la escarpa, aunque el perfil M43 muestra un alto valor relativo en la concentración de Rn a los 45 m de la misma. Los perfiles P11 (La Toma), P14 (El Royal) y M46 (Campo Claro B) sí muestran un pico en la concentración de Rn en la base de la escarpa, aunque de valor muy modesto. En todos estos casos parece existir cierta dificultad para identificar las trazas de fallas usando gas radón, lo cual podría estar relacionado con acumulación de humedad y/o sedimentos finos en la base de la escarpa.

Diez de los perfiles atraviesan lomos de obturación, en seis de estos: G2, M38, M39, M40, P5 y P10 la concentración de Rn en el sitio de falla es débil, ver por ejemplo, las FIGURAS 4, 6, 8 y 10. Es de notar que la traza de falla estaba perfectamente ubicada por trincheras realizadas en esos sitios (Audemard, 1997; Audemard *et al.*, 1999, 2008; Alvarado *et al.*, 2007b). En los perfiles P8 (El Baho, no mostrado) y P13 (FIGURA 3) no se obtienen anomalías de radón que señalen la presencia de la falla justo en la base del lomo. Los mejores resultados se obtienen en los perfiles P12 y P2 (FIGURA 3), aunque debe aclararse que el último se tomó en un sitio donde se interrumpe el lomo (acción antrópica?). De lo anterior, se puede inferir, entonces, que en los sitios donde la traza presenta lomos de obturación la concentración de radón puede verse afectada por algunos factores, entre los que se podrían incluir, la acumulación de sedimento fino que sellaría las fisuras de la falla y/o la presencia de humedad también con efectos sobre el Rn. Al respecto cabe señalar que Al-Taj *et al.* (2004) reportan valores bajos en la concentración de Rn en sitios con abundancia de sedimentos finos como en las ciénagas de falla o planicies aluviales. No siempre se obtiene la mayor concentración de radón en la traza principal, tal como ocurrió en algunos perfiles como el G2 o M38, otros autores como Giammanco *et al.* (2009), reportan que en estudios realizados en el sistema

de fallas Pernicana (Monte Etna, Italia) encontraron los valores más bajos de radón justo en la traza de la falla, y valores relativamente más elevados (otros picos), a pocas decenas de metros a ambos lados de la misma. En ese caso específico, la explicación es por efectos de dilución debido a altas ratas de emanación de CO₂ (gas de transporte) y a la posible existencia de otras fracturas cercanas a la traza principal, donde sí se registra una alta concentración relativa de gas radón. Un caso interesante con algo de relación a lo mencionado es el perfil P10 (FIGURA 10), donde la mayor concentración de Rn está desplazada 2 m de la posición de la falla: una posible explicación es que la capa de arcilla, mostrada en el perfil estratigráfico (Audemard, *et al.*, 2008), bloquea el libre paso del gas Rn que sale de la falla y éste busca una vía alterna como la señalada, concentrándose más radón al extremo de la capa de arcilla; el gas que migra hacia el sur encuentra más vías de escape por el deslizamiento cercano, y por lo tanto, hay menos concentración de Rn hacia esa zona.

En algunos de los casos anteriormente comentados donde los resultados no son satisfactorios, posiblemente se pueden mejorar, si en los sitios donde se sospecha que está la traza se hace un muestreo más fino, ya que dependiendo de las condiciones del sitio, el escape de radón puede estar muy localizado. Por ejemplo, en el perfil de la contraescarpa de El Royal (P14, FIGURA 9), en la base de la escarpa, se tomaron medidas con un metro de separación, lo que ayudó a definir bien al pico de radón que indica la traza de la falla.

De los resultados y de los comentarios anteriores se deduce que se puede sectorizar la falla en función de la concentración de gas radón, pero también que esos valores dependen si la traza corta roca o sedimentos, o si esos sedimentos son sueltos o consolidados, finos o gruesos, y que además puede influir si la traza se ha roto o no recientemente o si ha sido sellada por sedimentos. Como dato adicional, se puede agregar, que en los sitios de los perfiles P1, P3, M1 se había medido previamente en los años 1997 – 1998 (Aranguren *et al.*, 1999; Rengifo *et al.*, 2004) y los valores picos en la concentración de radón resultan similares a los actuales, con discrepancia máxima del 15%, aclarando que las condiciones de medición eran similares.

Conocer la posición exacta de la traza de una falla es uno de los resultados de utilidad que se esperaría de la aplicación del método. Sin embargo, al parecer, esto no siempre es posible. Un análisis de los datos de la TABLA 1 muestra que de 36 perfiles de radón sobre la

traza de la Falla de Boconó, en siete no se detectó la traza y, en otros siete se detectó pobremente, con baja concentración relativa o con otros picos de concentración que pueden causar confusión. Sin embargo, si se acepta que la geología y la geomorfología del sitio son variables a considerar cuando se selecciona el sitio de trabajo, y que otros factores, como el agua, pueden influir este porcentaje se puede reducir drásticamente. De hecho, antes de realizar el perfil M48 ya se presumía, que debido a la presencia de agua en el suelo, éste no arrojaría buenos resultados, como en efecto ocurrió. Por otra parte, si en perfiles largos como el de Quinanoque (M39, FIGURA 2) se restringe el estudio sólo a las inmediaciones de la falla, es decir, a la ciénaga de falla y la parte inferior del lomo, entonces el pequeño pico en la concentración se vería más prominente al eliminar los altos valores registrados sobre el lomo, en todo caso, siempre hay que considerar la influencia de los factores antes mencionados. Lo anterior también se aplica a otros perfiles como el M38, M40 y el P6.

A manera de comentario final, resulta particularmente interesante que el sector cercano a Santa Cruz, de máxima concentración de radón, es cercano al epicentro del sismo de 1894, último terremoto destructor ocurrido en el área de trabajo y que rompió la Falla de Boconó, al menos, desde La Grita hasta Lagunillas (Audemard, 1997; Alvarado *et al.*, 2007); los valores más bajos de radón están precisamente en el sector de la falla que se presume que no se ha roto recientemente (sector Páramo de Mucuchíes). A esto debe agregarse que el pico detectado en el perfil P5 (trinchera de Morro de los Hoyos, FIGURA 8) coincide con la traza (zona de fallas B y C) de mayor actividad tectónica reciente (holocena) determinada por Audemard *et al.* (1999) en la trinchera de Morro de los Hoyos, mientras que la otra zona de falla (A), menos activa, no se detectó con radón.

CONCLUSIONES

Se ha caracterizado, mediante medición de la concentración del gas radón en suelos, el segmento de la Falla de Boconó entre La Grita y Santo Domingo y se encuentra que los valores de concentración en cada sector, aparte de los conocidos factores ambientales y climáticos, pueden verse afectados por factores geológicos y geomorfológicos:

- En ensilladuras, así como en faldas de montañas la detección de trazas por radón puede ser buena, porque en general la roca está más cerca de la superficie y hay menos probabilidad de acumulación de agua.

- En sedimentos bien consolidados la detección también resulta ser buena por la misma razón que antes.
- Al pie de escarpas o de lomos de obturación donde el agua que escurre por la pendiente tiende a acumular sedimentos finos que pueden sellar la falla, la detección de la misma con Rn posiblemente ser deficiente a nula.
- En ciénagas de fallas o en sedimentos lacustres la concentración de radón puede verse disminuida por razones similares a la anterior.
- En sedimentos glaciares (tillitas) también los niveles de radón son bajos, en este caso posiblemente por efectos de porosidad del material.

Por otra parte, en el presente estudio los efectos de la geología sobre los resultados están más relacionados con el tipo de material de los suelos que con las diferentes formaciones, de hecho, los mayores valores de radón se obtienen en sedimentos provenientes de la Asociación Tostós cuando se esperaría que fuese en la Asociación Sierra Nevada.

En cuanto a la caracterización por sectores, se tiene en las cercanías de la falla:

- Los mayores valores de concentración de gas radón se obtuvieron para el sector de la falla comprendido entre El Peñón (cerca de Sta. Cruz de Mora) y el cerro San Felipe (1.100 – 1.800 cpm). Así como en Mesa de los Indios (1.350 cpm).
- Los valores más bajos en la concentración de radón se encontraron en el páramo de Mucuchíes entre El Royal y El Baho, particularmente, en zonas con sedimentos de origen glaciar (80 – 500 cpm).
- En el sector La Grita – La Playa la concentración de radón oscila entre 500 y 800 cpm, en general, similares a la zona de Mérida.
- En Lagunillas se obtienen valores de la concentración de radón entre 400 y 600 cpm.

Cuando se consideran medidas alejadas del entorno de la traza principal y/o en faldas de montaña la concentración puede tener valores elevados, por ejemplo 1.000 cpm en el perfil G02 de La Grita ó 1.200 cpm en el perfil P05 (Morro de los Hoyos) ó la traza paralela a la principal en la trinchera La Pantaleta con 1.800 cpm (M38).

En líneas generales, este método funciona como una herramienta complementaria en la identificación de fallas activas, aunque con ciertas limitaciones: en algunos sitios de la falla donde prevalece la deposición de material fino y cierta humedad, como aquellos sitios apropiados para la realización de trincheras para estudios paleosísmicos, el método muestra ciertas deficiencias, obteniéndose bajos valores relativos en la concentración de Rn, que en ciertos casos, no se diferencian suficientemente del nivel base. Por otra parte, en sitios donde la roca subyacente está muy fracturada, puede ocurrir lo contrario, obtenerse muchas anomalías de notable valor relativo que enmascaran la traza buscada. Sin embargo, se puede tener un mejor resultado si en las proximidades de la traza supuesta el muestreo se hace fino.

Por último, considerando que la aplicación del método, puede resultar infructuosa debido a los diversos factores que condicionan su aplicación, es recomendable usarla en combinación con otros métodos geofísicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a FONACIT (proyecto No. 2001002595), Universidad de Los Andes y Fundapris, por el aporte para el financiamiento del presente trabajo. Así mismo expresan su agradecimiento al Dr. LaBrecque J. (IVIC), al Lab. de Física Nuclear de la USB y a FUNVISIS por el préstamo de los equipos Pylon. De igual manera, se deja constancia de agradecimiento al personal técnico del Lab. de Geofísica de la ULA por el apoyo en las actividades de campo.

REFERENCIAS

Al-Taj, M., Al-Bataina, B., y Atallah, M. 2004. Evaluation of geodynamic activity of the Dead Sea transform fault by radon gas concentrations. *Environmental Geology*, 46:574–582.

Alvarado, M., Audemard, F., Ollarves, R., Rodríguez, L. M., Laffaille, J., Ferrer, C., and Klarica, S. 2007a. Preliminary interpretations about the neotectonic activity of the Boconó fault in the Lagunillas pull-apart basin, Mérida state, Venezuela, from paleoseismic trenches. International Workshop on: “Blind dip-slip faulting and strain partitioning in an active orogen: the Mérida Andes case, Venezuela” Santo Domingo, Mérida State, Venezuela, March 5-9, 2007.

Alvarado, M., Audemard, F., Laffaille, J., Ollarves, R., y Rodríguez, L. 2007b. Análisis paleosismológico de la Falla de Boconó en el sector Lagunillas, Estado Mérida.

Venezuela. Memorias (CD) del IX Congreso Geológico Venezolano. UCV, Caracas. 21 – 25 octubre.

Aranguren, R., Choy, J., Evans, B., y Ferrer, C. 1999. Informe sobre las actividades realizadas durante las tres campañas de medición de flujo de gas radón en la Zona de Fallas de Boconó, en el edo. Mérida. Informe para Fonacit.

Audemard, F.A. 1997. Holocene and historical earthquakes on the Boconó fault system, southern Venezuelan Andes: trench confirmation. *Journal of Geodynamics*, 24 (1-4), 155-167.

Audemard, F.A., Pantosti, D., Machette, M., Costa, C., Okumura, K., Cowan, H., Diederix, H., Ferrer, C., and Sawop Participants. 1999. Trench investigation along the Mérida section of the Boconó fault (central Venezuelan Andes), Venezuela. In: Pavlides, S., Pantosti, D. and Peizhen, Z. (eds.), *Earthquakes, Paleoseismology and Active Tectonics. Selected papers to 29th General Assembly of the Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI)*, Thessaloniki, Greece, August 1997. *Tectonophysics*, 308, 1-21.

Audemard, F.E., and Audemard, F.A. 2002. Structure of the Mérida Andes, Venezuela: relations with the South America-Caribbean geodynamic interaction. *Tectonophysics*, 345 (1-4): 299- 327.

Audemard, F.A., Ollarves, R., Betchtold, M., Díaz, G., Beck, C., Carrillo, E., Pantosti, D., and Diederix, H. 2008. Trench investigation on the main strand of the Boconó fault in its central section, at Mesa del Caballo, Mérida Andes, Venezuela. *Tectonophysics*, 459: 38-53.

Bayraktutan, M.S., Merefield, J. R., Grainger, P., Evans, B., Yilmaz, M., and Kalkan, E. 1996. Regional gas geochemistry in an active tectonic zone, Erzurum Basin, eastern Turkey. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 29: 209 – 218.

Choubey, V.M., Mukherjee, P.K., Bajwa, B.S., y Walia, V. 2007. Geological and tectonic influence on water–soil–radon relationship in Mandi–Manali area, Himachal Himalaya. Springer-Verlag. *Environmental Geology*, 52: 1163–1171.

Escobar, A., y Rengifo, M. 2003. Reevaluación de dos sismos históricos en las inmediaciones de La Grita y Zea. *Revista Geográfica Venezolana*, 44 (2): 219-245.

Etiopie, G., and Lombardi., S. 1994. Soil gas ^{222}Rn in sedimentary basins in central Italy: its implications

- in radiation protection zoning. *Radiation Protection Dosimetry*, 56 (1-4): 231-233.
- Ferrer, C., y Laffaille, J. 1998. El alud sísmico de la Playa: Causas y efectos. El terremoto de Bailadores (1610). *Revista Geográfica Venezolana*, 39: 23–86.
- Fu, C.C., Yang, T.F., Du, J., Walia, V., Chen, Y.G., Liu, T.K., and Chen, C.H. 2008, Variations of helium and radon concentrations in soil gases from an active fault zone in southern Taiwan. *Radiation Measurements*, 43: S348–S352.
- Garrity, C., Hackley, P., and Urbani, F. 2004. Digital shaded relief map of Venezuela. USGS Open File Report 04 – 1322.
- Giammanco, S., Sims, K.W., and Ner, M. 2007. Measurements of ^{220}Rn and ^{222}Rn and CO_2 emissions in soil and fumarole gases on Mt. Etna volcano (Italy): Implications for gas transport and shallow ground fracture. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8 (10): Q10001, doi:10.1029/2007GC001644.
- Giammanco, S., Immè, G., Mangano, G., Morelli, D., and Neri, M. 2009. Comparison between different methodologies for detecting radon in soil along an active fault: The case of the Pernicana fault system, Mt. Etna (Italy). *Applied Radiation and Isotopes*, 67 (1): 178-185.
- Hyun-Kuk, J., Chigu, K., and Hyo-Taek, C. 1999. A preliminary study on soil–gas radon geochemistry according to different bedrock geology in Korea. *Environmental Geochemistry and Health* 21: 117–131.
- Inceoz, M., Baykara, O., Aksoy, E., and Dođru, M. 2006. Measurements of soil gas radon in active fault systems: A case study along the North and East anatolian fault systems in Turkey. *Radiation Measurements*, 41: 349–353.
- Juárez, F., y Nuñez-Cornú, J. 1999. Monitoreo de ^{222}Rn en la costa sur de México, tramo Acapulco – Puerto Escondido. *Geos*, 1 (1): 9 – 14.
- King, C.Y. 1980. Episodic radon changes in subsurface soil gas along active faults and possible relation to earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 85: 3065 -3078.
- LaBrecque, J. 2002. Simple and rapid methods for on-site determination of radon and thoron in soil-gases for seismic studies. *Journal of Radioanalytical and nuclear Chemistry*, 254 (3): 439-444.
- LaBrecque, J., and Cordovés, P. 2003. “Application of the relative uranium-series disequilibrium in soil to locate and/or confirm precisely active fault traces: A new technique”. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 258 (1): 43-48.
- LaBrecque, J., and Cordoves, P. 2004. Short- and long-term monitoring of radon, thoron and carbon dioxide in soil-gas at Altos de pipe, Venezuela. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 260 (2): 255-264.
- Laffaille, J. y Ferrer, C. 2003. El terremoto del jueves santo en Mérida: año 1812. *Revista Geográfica Venezolana*, 44 (1): 107-123.
- Lahti, M. L., Killoran, L. K., Holub, R. F., and Reimer G. M. 1998. New rapid method to determine radon and thoron from a single counting sequence using a field portable alpha particle scintillometer. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 236 (1-2): 253- 256.
- Mahajan, S., Walia, V., Bajwa, B. S., Kumar, A., Singh, S., Seth, N., Dhar, S., Gill, G. S., and Yang, T. F. 2010. Soil-gas radon/helium surveys in some neotectonic areas of NW Himalayan foothills, India. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10: 1221–1227.
- Megumi, K., and Mamuro, T. 1973. Radon and thoron exhalation from the ground. *Journal of Geophysical Research*, 78 (11), 1804–1808.
- Rengifo, M., Aranguren, R., Ferrer, C. J., Choy, Y.B. y Evans, B. 2004.: Uso del gas radón en la determinación de trazas de fallas activas en los Andes Merideños. V Congreso Venezolano de Geografía. CD. Mérida, nov. 2004.
- Rengifo, M., y Aranguren, R. 2005. Aplicación del gas radón en estudios estructurales. Caso del sector Mucunután. Resumen, I Jornadas Nacionales de divulgación de las técnicas nucleares.
- Rod, E. 1956. Strike-slip faults of northern Venezuela. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, (40): 3.
- Schubert, C. 1980a. Morfología neotectónica de una falla rumbo-deslizante e informe preliminar sobre la

- Falla de Boconó, Andes meridionales. *Acta Científica Venezolana* 31: 98-111.
- Schubert, C. 1980b. Late Cenozoic pull-apart basins, Boconó' fault zone, Venezuelan Andes. *Journal of Structural Geology*, 2 (4): 463-468.
- Schubert, C. 1985. Cuencas cenozoicas tardías de Venezuela. *Memorias VI Congreso Geológico Venezolano*, Caracas, 26 sept al 6 de oct. 1985. p. 2663 – 2679.
- Schubert, C., Singer, A., y Soulas, J. P. 1983. Excursión: La Falla de Boconó entre Santo Domingo y San Cristóbal, FUNVISIS, Simposio Neotectónica, Sismicidad y Riesgo Geológico en Venezuela y El Caribe, XXXIII Convención AsoVAC, pp. 62.
- Schütz, M., and Keller, W. 1994. Problems of radon screening in the upper layer of the soil. *Radiation protection dosimetry*, 56 (1-4): 235-237.
- Soulás, J.P. 1985. Neotectónica del flanco occidental de los Andes de Venezuela entre 70°30' y 71°00'W (Fallas de Boconó, Valera, Piñango y del Piedemonte). *VI Congreso Geológico Venezolano*, Caracas, 4, 2690-2711.
- Tricart, J., et Millies-Lacroix, A. 1962. Les terrasses quaternaires des Andes Vénézuéliennes; *Bull. Soc. Géol. Fr. 7e Sér.*, 4: 201-219.
- Toutain, J., and Baubron, J. 1999. Gas geochemistry and seismotectonic. A review. *Tectonophysics*, 304: 1-27.
- Urbani, F., Flores, N., Sajo-Bohus, L., and Carreño, R. 1998. Mediciones de las concentraciones de gas radón del suelo en zonas de fallas cercanas a Caracas, Venezuela. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Geólogos*, 23 (2): 29-35.
- Virk, H., Walia, V., Sharma, K., Kumar, N., and Kumar, R. 2000. Correlation of radon anomalies with microseismic events in Kangra and Chamba valleys of N – W Himalaya. *Geofísica Internacional*, 39(3): 221-227.
- Yang, T.F., Walia, V., Chyi, L.L., Fu, C.C., Chen, C.H., Liu, T.K., Song, S.R., Lee, C.Y., and Lee, M. 2005. Variations of soil radon and thoron concentrations in a fault zone and prospective earthquakes in SW Taiwan. *Radiation Measurements*, 40: 496 – 502.
- Zhou, X., Du, J., Chen, Z., Cheng, J., Tang, Y., Yang, L., Xie, C., Cui, Y., Liu, L., Yi, L., Yang, P., and Li, Y. 2010. Geochemistry of soil gas in the seismic fault zone produced by the Wenchuan Ms 8.0 earthquake, southwestern China. *Geochemical Transactions*, 11: 5.

Trabajo recibido: mayo 5 de 2012
Trabajo aceptado: septiembre 5 de 2014