

# Casos históricos colombianos del registro de anomalías del radón-222 antes de eventos sísmicos de naturaleza tectónica

DORIS YANETH SERNA VALENCIA, ESTELA CATALINA MORÁN RODRÍGUEZ, GUSTAVO GARZÓN VALENCIA

Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Mineroambiental y Nuclear –Ingeominas–  
Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales

MÓNICA LUCÍA HERNÁNDEZ SILVA

Departamento de Química, Universidad de Nariño

## RESUMEN

Desde el año de 1995 se han estado realizando mediciones continuas de las emisiones del isótopo radiactivo Radón-222 en los suelos de los volcanes Galeras y nevado del Ruiz, y sobre fallas activas en los departamentos de Nariño, Cauca y Caldas. En el monitoreo del gas Radón-222 se ha utilizado el sistema de medición de cámaras ionizantes E-PERM, atrapando los gases en el horizonte B de los suelos.

Se ha encontrado que en zonas de fallamiento activo las emisiones de este gas están entre los 1000 y 2500 pCi/L. En algunos cruces de fallas activas se han medido niveles hasta de 25000 pCi/L.

En el presente trabajo se presenta una compilación de ejemplos de las emisiones anómalas registradas en varias estaciones antes de sismos de carácter tectónico. Se muestran anomalías del Radón registradas antes de: 1) eventos de magnitudes entre 2 y 4; 2) el terremoto del Quindío de enero de 1999, y 3) la ocurrencia de enjambres sísmicos registrados por las redes sismológicas de los observatorios vulcanológicos y sismológicos de Pasto y Manizales.

PALABRAS CLAVE: ISÓTOPO, RADIOACTIVIDAD, RADÓN-222, SISMO, TECTÓNICA

## ABSTRACT

Since 1995 it had been making continuous measurements of the radioactive isotope Radon-222 emissions in soils at Galeras and nevado del Ruiz volcanoes; and on active geological faults in Nariño, Cauca and Caldas districts. The E-PERM ionizing chamber system has been used in the Radon-222 monitoring, trapping this gas in the B horizon of soils.

In zones of active faulting it has been established Radon soil emissions between 1000 and 2500 pCi/L. In some crossings of active faults it has been measured levels of 25000 pCi/L.

In the present work appears a compilation of examples of the registered anomalous emissions in several stations before earthquakes of tectonic character. Examples of registered Radon anomalies before: 1) events of magnitudes between 2 and 4; 2) the Quindío earthquake of January 1999; and 3) the occurrence of seismic swarms registered by the seismological networks of the Volcanological and Seismological Observatories at Pasto and Manizales, are described.

KEYWORDS: ISOTOPE, RADIOACTIVITY, RADON-222, EARTHQUAKE, TECTONICS

## INTRODUCCIÓN

Desde hace algunas décadas se han incorporado los estudios isotópicos en el estudio de los trazos de falla y en la investigación del estado de actividad tectónica de las mismas. El isótopo que más se ha estado investigando con este fin es el Radón-222. Paralelamente se realizan mediciones de otros gases como el helio, hidrógeno,

dióxido de carbono (Garzón, 1996), y otros isótopos como el torón (Rn-220), Radio-226 y Carbono-13 (Heiligmann *et al.*, 1997).

Las concentraciones de los gases emitidos desde el interior de la Tierra están controlados por la litología y la estructura de la zona de estudio (Williams-Jones *et al.*, 2000). Pero sus emisiones pueden variar en el tiempo por influencias geodinámicas o meteorológicas. Las variables meteorológicas reportadas a nivel mundial como las que mayor influencia presentan sobre las emisiones de los gases son: 1) las lluvias; 2) los cambios de temperatura del aire, y 3) los gradientes de la presión atmosférica

Manuscrito recibido para evaluación el 30 de octubre de 2002.

Artículo aceptado para publicación por el Comité Editorial el 30 de agosto de 2003.

(Schumann *et al.*, 1992). De acuerdo con trabajos realizados con anterioridad (González & Garzón, 2001) se ha observado que en nuestro medio tropical las variaciones de la temperatura del aire no superan los 8°C en un año; de la misma manera, las variaciones de la presión atmosférica en el mismo período no son mayores a los 5 mbar. Por el contrario, se ha observado que en períodos de incremento de las precipitaciones por lluvias, las emisiones de los gases pueden resultar afectadas negativamente, especialmente en aquellos ambientes donde preferencialmente los gases se transportan por mecanismo de difusión.

El Radón-222 está en constante emisión desde el interior de la Tierra hacia la atmósfera. Hace varias décadas se ha estado planteando: 1) la existencia de emisiones anómalas de este gas sobre las fallas activas; 2) las variaciones temporales relacionadas con los cambios de las condiciones atmosféricas, y 3) su posible manifestación premonitoria antes de un evento sísmico (Ulómov & Mávashev, 1971; Williams-Jones *et al.*, 2000; Toutain & Baubron, 1999; Morán *et al.*, 2001).

Desde el año de 1995 se han implementado algunas redes de estaciones isotópicas cerca del municipio de San Juan de Pasto, departamento de Nariño (figura 1); cerca del municipio de Puracé, en el departamento del Cauca, y cerca del municipio de Manizales, departamento de Caldas (figura 2).

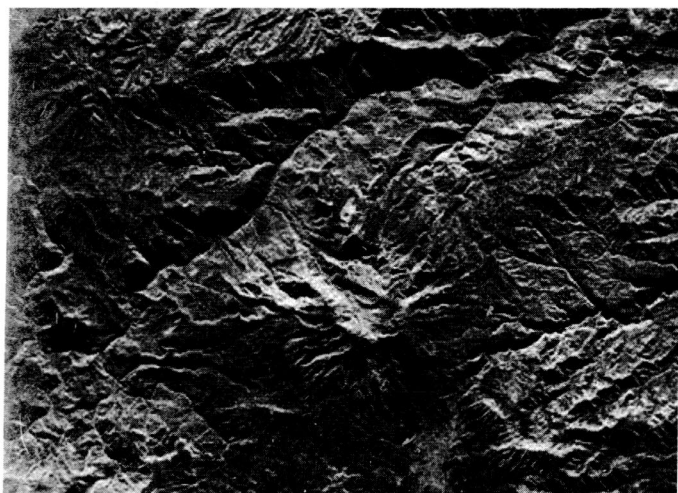


Figura 1. Localización de algunas estaciones isotópicas de Radón-222, cerca del municipio de San Juan de Pasto, departamento de Nariño. (Imagen satelital tomada de: NASA, SIR-C).

### METODOLOGÍA

El Radón-222 es uno de los tres isótopos naturales del gas noble radón. La naturaleza iónica de las partículas alfa que el Radón-222 produce en su desintegración natural permite utilizar métodos basados en cuantificar las huellas dejadas por el bombardeo de estas partículas sobre superficies sensibles.

En los observatorios vulcanológicos y sismológicos del Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Mineroambiental y

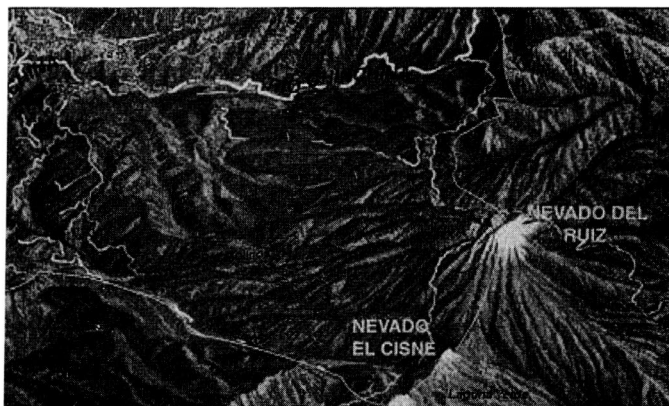


Figura 2. Localización de algunas estaciones isotópicas de Radón-222, cerca del municipio de Manizales, departamento de Caldas.

Nuclear –Ingeominas– para medir el Radón-222 en zonas de fallamiento activo es utilizado el sistema E-PERM (Electret Passive Environmental Radon Monitor) propuesto por Kotrappa *et al.* (1988). Solamente en el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto, en desarrollo de una estación multiparámetro se viene utilizando el sistema PYLON para la medición de los niveles del Radón-222 en fumarola (Faber *et al.*, 2002).



Figura 3. sistema de instalación de una estación isotópica de Radón-222. Tomado de: Salazar (2002).

Cuando se realizan estudios sismotectónicos son muy importantes los criterios a seguir para la selección de los sitios de instalación de las estaciones isotópicas, tales como: 1) geología y estructura del área, 2) topografía y 3) fácil acceso al sitio. Antes de instalar las estaciones isotópicas es aconsejable realizar un estudio de los perfiles del suelo, de tal manera que en la estación, el tubo de

PVC que servirá de trampa para los gases, quede enterrado hasta el suelo natural (Salazar, 2002), tal como se muestra en la figura 3. Con el fin de acercarse más al conocimiento de los mecanismos de transporte de los gases en los suelos próximos a la estación de monitoreo, es importante realizar mediciones del dióxido de carbono o helio o mercurio, paralelamente a las mediciones del gas radón.

El sistema E-PERM se compone de tres elementos principales: 1) un disco de teflón Du-pont cargado electrostáticamente, llamado electroto, el cual colecta iones en su superficie; 2) una cámara fabricada con un material de polipropileno conductor de la electricidad, dentro de la cual un electroto puede ser descargado, y 3) un medidor del potencial de superficie del electroto (Garzón, 1998).

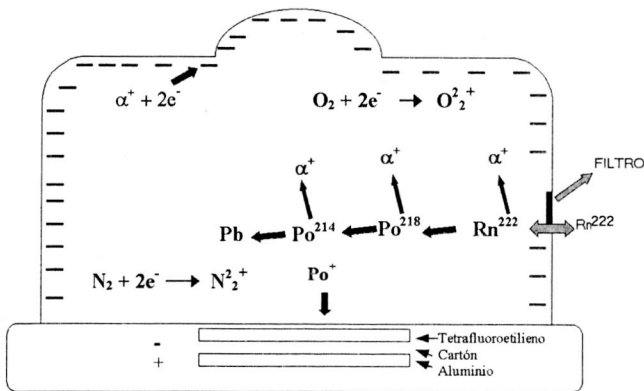


Figura 4. Procesos que tienen lugar dentro del sistema cámara-electreto. Tomado de Diago et al., 2001.

La configuración o combinación cámara-electreto se utiliza para permitir la desintegración del Radón-222 en su interior. En la figura 4 se muestra una combinación de cámara con electroto, donde se indican todos los posibles procesos que dentro de ella pueden ocurrir, tales como: 1) desintegración radiactiva del Radón-222 y de sus descendientes; 2) adición de los descendientes sobre aerosoles; 3) formación de descendientes con carga eléctrica; 4) electrificación de superficies; 5) deposición de descendientes sobre superficies (*plate-out*); 6) filtración del radón a través de membranas selectivas.

La concentración activa del Radón-222 se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$[Rn] = [(V_i - V_f)/(FC \times TA)] - DG$$

donde,

[Rn] es la concentración del Radón-222, expresada en pCi/L;

$V_i$  es el potencial de superficie inicial del electroto, expresado en V;

$V_f$  es el potencial de superficie final del electroto, expresado en V;

FC es un factor de conversión para ajustar el método a la norma NIST;

TA es la duración del análisis, expresado en días y

DG son las dosis de radiación gamma ambiental, expresada en pCi/L.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el año de 1995 se inició la instalación de estaciones isotópicas en los volcanes Galeras y nevado del Ruiz, y sobre algunos trazos de fallas activas. Algunas estaciones estuvieron en funcionamiento por algunos meses, mientras que otras continúan funcionando en forma regular. En la actualidad, funciona una red de 22 estaciones cerca del municipio de Pasto, cuatro estaciones cerca del municipio de Puracé, y seis estaciones entre el municipio de Manizales y el volcán nevado del Ruiz.

Las anomalías más destacadas de incremento de las emisiones del gas radón antes de eventos sísmicos son:

1. Garzón (1996) reportó el incremento de las emisiones del gas Radón-222 durante un periodo de medición de diez meses en la estación Barranco de la red isotópica instalada por el OVSPasto. De acuerdo con la figura 5, el incremento de las emisiones del Radón-222 fue de 350 pCi/L, lo cual aparentemente precedió la ocurrencia de microsismos de magnitudes hasta de 2,1 en la escala de Richter y a una distancia menor a los 6,0 km de la localización de la estación isotópica.

2. Se realizaron estudios comparativos entre las emisiones del Radón-222 y el número de sismos volcano-tectónicos de magnitudes superiores a 1,5, registrados por la red sismológica del OVSPasto. En la misma estación Barranco y para una ventana de tiempo de cinco años, se obtuvo la figura 6, de acuerdo con la cual se observan incrementos de las emisiones del radón durante y antes de la ocurrencia de los principales eventos volcano-tectónicos.

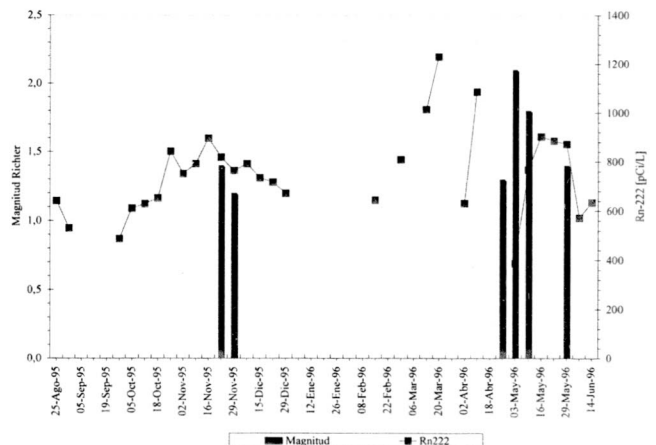


Figura 5. Emisiones del isótopo Radón-222 vs. Magnitud de microsismos. Estación Barranco (agosto 1995-junio 1996).

3. Para una ventana de tiempo de un año, Garzón & Serna (2001) reportaron una comparación entre las emisiones del Radón-222 en la estación Sismo 1 de la red isotópica del OVSPasto y dos eventos sísmicos de naturaleza tectónica de magnitudes 2,3 y 3,2, tal como se muestra en la figura 7.

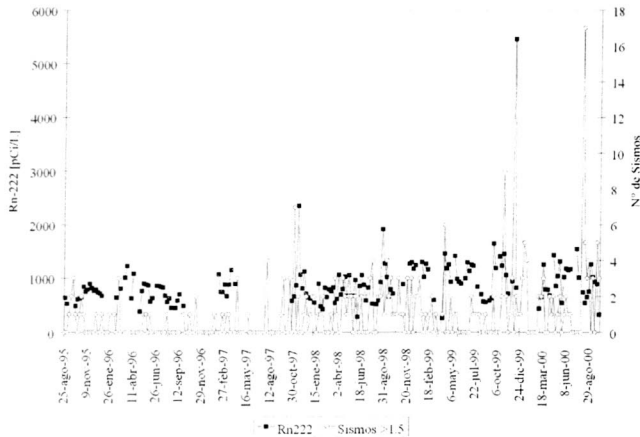


Figura 6. Emisiones de radón en la Estación Barranco (1995 - 2000) y número de sismos VT.

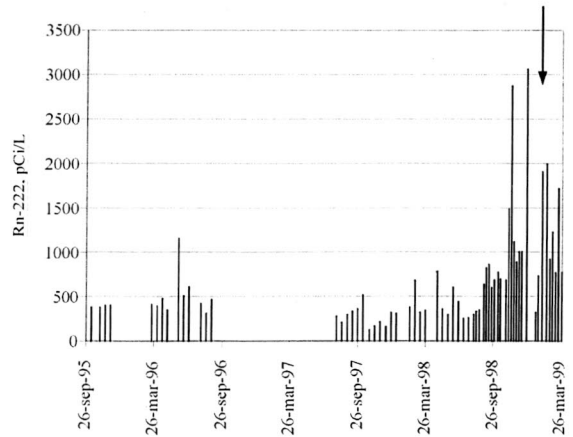


Figura 8. Incremento de las emisiones del radón en la Estación OVSM (septiembre 1995-marzo 1999).

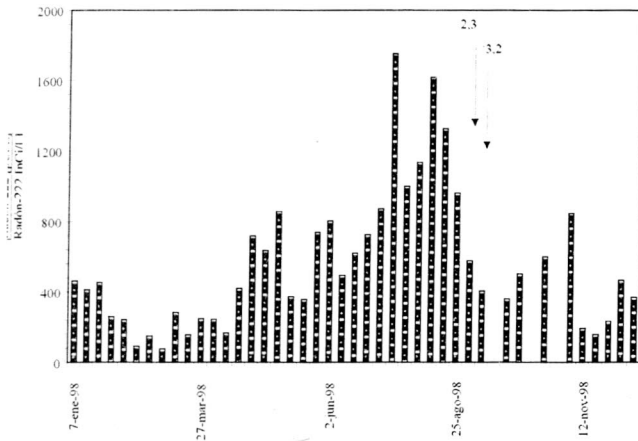


Figura 7. Emisiones del radón en la Estación Sismo 1 (enero-diciembre, 1998).

4. Previo a la ocurrencia del terremoto del Quindío (Mw = 6,2) del 25 de enero de 1999, se registraron anomalías de incremento de las emisiones del radón en la estación OVSM de la red isotópica instalada por el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales-Ingeominas. En la figura 8 se muestran las emisiones del Radón-222, y con una flecha se indica el día que ocurrió el terremoto del Quindío.

Hoy el comportamiento de las emisiones del Radón-222 en la estación OVSM, como se muestra en la figura 9, ha regresado a sus niveles cercanos a los 500 pCi/L que se estuvieron registrando entre 1995 y mediados e 1998.

5. La estación isotópica ubicada en los predios del Hotel Termas del Ruiz ha presentado anomalías en las emisiones del radón del suelo, antes de la ocurrencia de enjambres sísmicos VT, tal como se muestra en la figura 10.

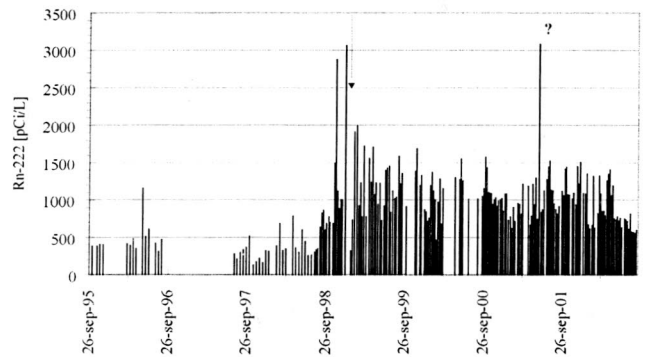


Figura 9. Emisiones del radón en la Estación OVSM (1995-2002).

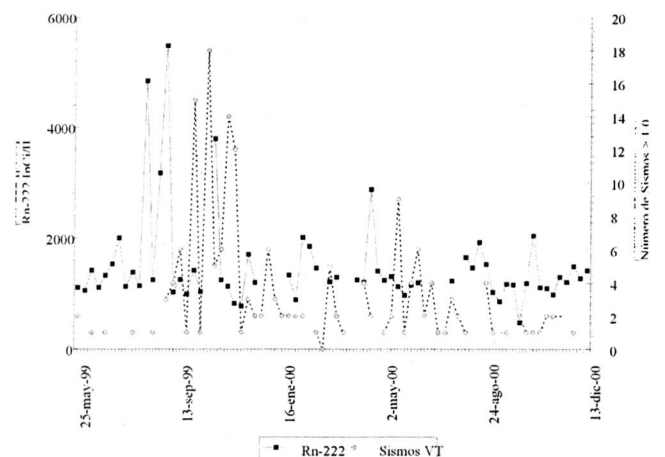


Figura 10. Emisiones de radón vs. Enjambres sísmicos. Estación Hotel (1999-2000).

Desde hace varios años se ha planteado la pregunta respecto a la efectividad del método de medición de las anomalías del isótopo radón, para su utilización como precursor de la actividad sísmica. Simultáneamente, ha surgido la inquietud de si todos los sismos podrían ser pronosticados y si todas las estaciones isotópicas instaladas resultarían efectivas en el monitoreo de la actividad sísmica.

Al respecto, y con base en los monitoreos y en las investigaciones desarrolladas en los últimos siete años, se ha llegado a concluir que hasta el momento se tienen evidencias de la posibilidad de monitorear los eventos sísmicos de carácter tectónico solamente en aquellas estaciones isotópicas que se localicen dentro de trazos de fallas activas.

Los gases en general y el gas Radón-222 en particular provenientes del interior del subsuelo, pueden arribar a la superficie por acción de los gradientes de presión que se crean entre la presión en el subsuelo y la presión atmosférica. Algunas variables como las precipitaciones por lluvias han surgido como los mayores factores meteorológicos en ambientes tropicales, que influyen sobre los niveles de desgasificación desde el suelo y el subsuelo (Morán *et al.*, 2001). Estos factores, junto con las características estructurales y mineralógicas del suelo y del subsuelo desempeñan un papel muy importante en la determinación de los niveles base de las emisiones gaseosas en una estación isotópica.

Por otro lado, los incrementos de las emisiones gaseosas que superan 1 de desviación estándar podrían ser el producto de perturbaciones surgidas durante los procesos de formación de un sismo, donde los esfuerzos creados alrededor de un futuro foco sísmico produce un paulatino resquebrajamiento de las rocas. Investigaciones desarrolladas en laboratorio (Goodman, 1963) han demostrado que la destrucción de una roca es precedida por la formación de numerosas y muy pequeñas fisuras, las cuales van acompañadas de la emisión de pulsos de variadas frecuencias. Los pulsos de frecuencias ultrasónicas podrían ser los perturbadores del equilibrio mineral-gas y, por tanto, catalizadores del incremento de las emisiones del isótopo Radón-222, antes del registro de eventos sísmicos de naturaleza tectónica.

Los ejemplos arriba presentados de anomalías del radón previas a la ocurrencia de un evento sísmico se resumen en unas pocas estaciones isotópicas. Generalmente, no en todas las estaciones instaladas se han observado anomalías premonitorias de un evento sísmico. En varias estaciones isotópicas, en las cuales no se observaban posibles respuestas premonitorias, se realizaron estudios de los perfiles de los suelos y se estableció que dichas estaciones habían sido mal instaladas. Esto significa que los tubos de PVC utilizados como trampas de gases no estaban enterrados hasta el suelo natural, sino que habían quedado en la capa orgánica. Los materiales de naturaleza orgánica presentan altos contenidos de moléculas del elemento carbono, el cual es utilizado mundialmente como un material absorbente (retenedor) de gases. Esto significa que así exista un factor perturbador del equilibrio parcial en la superficie de los

minerales del suelo y del subsuelo, los gases en general permanecerán retenidos en la superficie de los materiales de la capa orgánica del suelo, desempeñando una función sellante. Para confirmar esta hipótesis, se han realizado estudios de la génesis de los gases, en particular del dióxido de carbono en las estaciones isotópicas. Los resultados obtenidos de los análisis de los contenidos del isótopo Carbono-13 en las moléculas del dióxido de carbono, para cada una de las estaciones se muestra en la tabla 1.

Con base en los datos presentados en la tabla se construyó la figura 11. En esta figura se muestra que la proporción de Carbono-13/Carbono-12 en las moléculas del CO<sub>2</sub> producidas por las plantas terrestres son menores que en las moléculas del CO<sub>2</sub>

Tabla 1. Valor promedio de los contenidos de dióxido de carbono y Carbono-13 en las estaciones isotópicas de los observatorios vulcanológicos y sismológicos de Ingeominas.

Estación Isotópica	CO2 [% v/v]	D13C(CO <sub>2</sub> ) [‰]	Sede de Ingeominas	Año de muestreo
Tabío	3,6	-14,6	Popayán	2001
Barranco	3,6	-9,0	Pasto	1995 - 2001
Sismo 1	4,9	-14,4	Pasto	1995 - 2001
Sismo 2	3,1	-12,3	Pasto	1995 - 2001
Sismo 5	5,2	-11,0	Pasto	1995 - 2001
San Juan 1	1,0	-6,8	Pasto	2001
Meneses 4	1,2	-13,4	Pasto	2001
OVSM	1,6	-13,6	Manizales	1999
Florida	4,0	-13,5	Manizales	2001
Argüello Alto	0,4	-25,3	Pasto	2001
Anil 2	2,0	-20,6	Pasto	2001
San Francisco	0,4	-25,1	Pasto	2001
San Antonio 1	0,3	-27,6	Pasto	2001
San Antonio 2	0,3	-28,3	Pasto	2001
San Antonio 3	1,4	-23,3	Pasto	2001
Zanjón 1	0,9	-21,1	Pasto	2001
Zanjón 2	0,4	-21,9	Pasto	2001
Zanjón 3	0,9	-18,4	Pasto	2001
Huecada 1	0,2	-28,1	Pasto	2001
Huecada 3	0,8	-24,0	Pasto	2001
San Juan 3	0,9	-22,6	Pasto	2001
La Mina	0,5	-25,5	Popayán	2001
San Rafael	0,5	-27,5	Popayán	2001
Bedón	0,2	-31,5	Popayán	2001
Nueve	0,5	-24,2	Manizales	2001
La Playa	2,1	-24,6	Manizales	2001



provenientes de los fósiles y los carbonatos no marinos; y estos últimos a su vez producen CO<sub>2</sub> con menores contenidos de Carbono-13, si los comparamos con el CO<sub>2</sub> proveniente del manto.

En la misma figura se destacan las estaciones que han presentado anomalías de las emisiones del radón antes de eventos sismotectónicos, como Barranco, Sismo 5, Sismo 1, OVSM. Estas estaciones, marcadas en la figura 11 con un cuadrado presentan relaciones de Carbono-13/Carbono-12 en las moléculas de CO<sub>2</sub> propias de ambientes profundos, lo que indica que se encuentran ubicadas sobre trazos de fallas activas donde la alta permeabilidad facilita el transporte de los gases hacia la superficie a través del mecanismo de advección.

La mayoría de las estaciones de radón, las cuales se indican con círculos en la figura 11, muestran firmas isotópicas que indican la procedencia somera de los gases allí atrapados, y por tanto su posible errónea instalación en suelo adsorbentes de los gases.

### CONCLUSIONES

De acuerdo con los monitoreos e investigaciones realizadas, se establece que:

1. Las estaciones de Radón con firmas isotópicas de C-13 en dióxido de carbono mayores a los -16‰ contra el estándar PDB, son las que han presentado anomalías antes de la ocurrencia de eventos sismotectónicos.
2. La mayoría de las estaciones de las redes isotópicas de los observatorios de Ingeominas están mal instaladas, y por esta razón se recomienda iniciar con un proceso de evaluación de los perfiles de los suelos donde se encuentran instaladas.
3. Cuando se desee instalar una estación de radón con el fin de realizar estudios de la actividad sismotectónica, se recomienda realizar un detallado estudio de:
  - 3.1 Los perfiles de los suelos
  - 3.2 Los mecanismos de transporte de los gases
  - 3.3 La génesis de los gases por medio de estudios de Carbono-13.

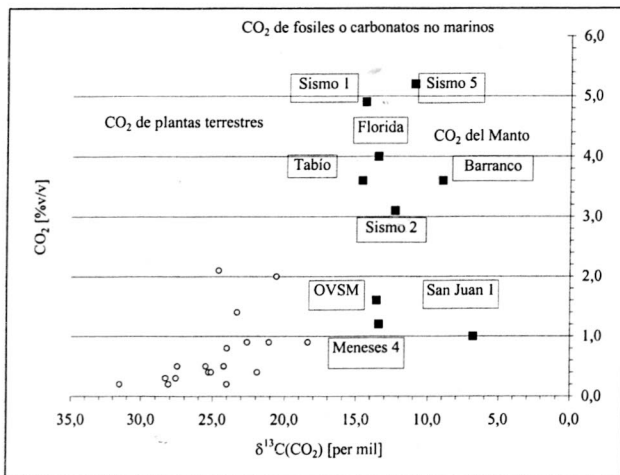


Figura 11. Dióxido de carbono vs. Delta 13 de carbono.

### BIBLIOGRAFÍA

- DIAGO, J., SALAZAR, S., GARZÓN, G. (2001). "Metodología de monitoreo del Radón-222 en sismotectónica". *Revista Horizontes Naturales*. Universidad de Caldas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Manizales, 3:37-42.
- FABER, E., MORÁN, C., POGGENBURG, J., GARZÓN, G., TESCHNER, M. (2002). *Gas Monitoring at the Galeras Volcano, Colombia*. Submitted at Journal of Volcanology and Geothermal Research. 16 pp. (en prensa)
- GARZÓN, G. (1996). "Mediciones del Rn<sup>222</sup> y CO<sub>2</sub> en el suelo del volcán Galeras (Colombia) y ocurrencia de sismos locales". II Seminario Latinoamericano: Volcanes, Sismos y Prevención, Lima y Arequipa (Perú), 115-118.
- \_\_\_\_\_. (1998). "El radón. Manual teórico-práctico", Ingeominas (informe interno), 55 pp.
- \_\_\_\_\_. & Serna, D. (2001). "Anomalías de las emisiones de Radón-222 antes de un sismo tectónico". *Revista Horizontes Naturales*. Universidad de Caldas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Manizales, 3:43-51.
- GONZÁLEZ, L. & GARZÓN, G. (2001). "Estudios isotópicos en la falla Villamaría-termales, departamento de Caldas". *Revista Horizontes Naturales*. Universidad de Caldas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Manizales, 4:17-30.
- GOODMAN, R. (1963). "Subanclibe noise during compression of rocks". *Bull. Geol. Soc. America*, 4:487-490.
- HEILIGMANN, M., STIX, J., WILLIAMS-JONES, G., SHERWOOD LOLLAR, B., GARZÓN, G. (1997). "Distal degassing of Radon and Carbon Dioxide on Galeras volcano, Colombia". *J. Volcanol. and Geotherm. Res.* 77:267-283.
- KOTRAPPA, P., DEMPSEY, J., HICKEY, J., STIEFF, L. (1988). "An electret passive environmental <sup>222</sup>Rn monitor based on ionization measurements". *Health Phys.* 54:47-56.
- MORÁN, C., CHICA, A., GARZÓN, G. (2001). "Estudio de gases en seis fallas geológicas en el departamento de Nariño". *Revista Horizontes Naturales*. Universidad de Caldas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Manizales, 4:53-62.
- SALAZAR, S. (2002). "Mapa geoquímico del gas radón para el suroriente del municipio de Manizales, Colombia". Tesis de Pregrado. Universidad de Caldas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Programa de Geología y Minas, Manizales, p. 17.
- SCHUMANN, R., OWEN, D., BOLINDER, S. (1992). "Effects of weather and soil characteristics on temporal variations in soil gas Radon concentrations". In: Gates, A. and Gundersen, L., *Geologic controls on Radon: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper*, 271:65-72.
- TOUTAIN, J-P. & BAUBRON, J-C. (1999). "Gas geochemistry and seismotectonics: a review". *Tectonophysics*, 304:1-27.
- ULÓMOV, V. & MÁVASHEV, B. (1971). "Forerunners of the Tashkent earthquake". *Izv. Akad. Nauk Uzb. SSR*, 188-200.
- WILLIAMS-JONES, G., STIX, J., HEILIGMANN, M., CHARLAND, A., SHERWOOD LOLLAR, B., ARNER, N., GARZÓN, G., BARQUERO, J., FERNÁNDEZ, E. (2000). "A model of diffuse degassing at three subduction-related volcanoes". *Bull. Volcanol.* 62:130-142.