

TÉCNICAS NUCLEARES

NUCLEAR TECHNIQUES

Laszlo Sajo-Bohus

RESUMEN

Se reportan los datos experimentales obtenidos en Venezuela en relación a la radiactividad natural y antropogénica con aspectos relevantes en las ciencias de la tierra incluyendo las consecuencias ambientales. Se dedica una sección a la descripción de los detectores empleados en relación a la geología, sismología, cuerpos de agua, erosión, entre otros. Se presenta brevemente la instrumentación nuclear utilizada en las varias técnicas analíticas aplicadas. Se mencionan también los detectores tanto pasivos como activos; de estos últimos se indica su importancia en espectrometría con detectores de alta resolución en energía. Se reportan también técnicas analíticas desarrolladas y equipos de detección de radiaciones ionizantes construidos en el país. Valores experimentales obtenidos en las últimas décadas y resultados relevantes en ciencias de la tierra complementan el capítulo, en relación también a la geología en Venezuela. Se concluye presentando algunos tópicos de investigación en curso y proyectos a futuro.

ABSTRACT

Experimental data obtained in Venezuela regarding the natural and anthropogenic radioactivity and relevant earth science aspects including environmental consequences, are reported. One section is devoted to the description of the detectors used in connection geology, seismology, bodies of water, erosion among others. Nuclear instrumentation used in various analytical techniques is presented briefly in various applications. Passive and active detectors are also mentioned indicating its importance as spectrometer detectors of high energy resolution. Techniques and equipment developed for ionizing radiation detection built in the country are also reported. Experimental values obtained in recent decades and relevant information in earth science complements this study also in relation to geology in Venezuela. It concludes with some topics of current research and future projects.

Palabras clave: Radiactividad, métodos de medición, ciencia de la tierra, Venezuela

Keywords: Radiactivity, measurements methods, soil science, Venezuela

INTRODUCCIÓN

La radiactividad es uno de los fenómenos que ha sido considerado como algo misterioso y que ha despertado angustia o dificultad en aceptarlo hasta para las personas más instruidas. Nos percatamos que puede producir también daños extensos en el ambiente solamente cuando los medios de comunicación reportan un accidente, como por ejemplo el de Fukushima. Menos divul-

gación reciben las aplicaciones de la fenomenología nuclear relacionada con los avances tecnológicos en beneficio de la humanidad. Durante el siglo pasado hemos alternado la euforia del inicio de la “era atómica” con la desilusión, rechazo y miedo extremo por las posibles consecuencias de accidentes “atómicos” así como la utilización indiscriminada de los “átomos”, incluyendo las explosiones nucleares o el terrorismo. Sin embargo, nos olvidamos que siempre hemos estado expuestos a las radiaciones ionizantes; desde hace más de 200 mil generaciones éstas han acompañado a la humanidad e influido en su

evolución. Es un hecho indiscutible que la humanidad en el último siglo obtuvo beneficios de los grandes descubrimientos de los fenómenos atrapados en el microcosmos nuclear. Es menester mencionar que desde el descubrimiento de los rayos X por Röntgen en 1895 y luego de la radiactividad por Becquerel en 1896, a la humanidad se le abrió un nuevo e inmensamente amplio horizonte rico de posibilidades tecnológicas. Ahora, depende de nosotros cómo aplicarlo para obtener los beneficios esperados, incluso en estudios relacionados con ciencias de la tierra. La presencia de material radiactivo en fuentes naturales (principalmente ^{226}Ra , descubierto por Madame Curie) se debe a la ascensión de aguas calientes de las profundidades de la tierra. Éstas arrastran minerales y gases, incluyendo *material radiactivo natural*, y gas radiactivo radón.

Estudios realizados en relación a la radiactividad natural presente en fuentes de aguas termominerales de Venezuela, fueron iniciados por Otero y colaboradores del Laboratorio Nacional del Ministerio de Fomento (Otero *et al.*, 1939, 1942).

Al comienzo de la década de los años 1950, la Dirección de Geología del Ministerio de Minas e Hidrocarburos, con personal del Servicio Geológico de los Estados Unidos de América realizaron una prospección de uranio utilizando detectores Geiger en todo el país (Cárdenas, 1950; Wyant y Sharp, 1952). A fines de los años 1960's levantamientos radiométricos aerotransportados de CODESUR, permiten el descubrimiento del yacimiento de torio y tierras raras del cerro Impacto (Colvée y Szczerban, 2006). Luego, en los años 1970's se intensifica la exploración de uranio al crear la Comisión Nacional de Asuntos Nucleares, con exploraciones terrestres y aerotransportados, delimitando las zonas anómalas en los fosfatos del estado Táchira en San José de Navay y en torno al macizo granítico de El Baúl, Cojedes (Sifontes, 1985, Pasquali y Sifontes, 2008).

Años después se realizaron las primeras aplicaciones de las técnicas nucleares en estudios de las aguas, empleando material NORM (Naturally-Occurring Radioactive Materials) en datación ^{14}C

de materiales aguas subterráneas (Tamers, 1966; Raynaud & Tamers, 1971).

Estas iniciativas indican que en Ciencias de la Tierra como área de investigación, existen múltiples particularidades que engloban también a las técnicas y metodologías que dominan en la Ciencia Nuclear, y que por lo tanto, aportan informaciones publicadas en la revista *Geotermia* de importancia a nivel nacional e internacional.

El residuo radiactivo de los ensayos nucleares (2.053 explosiones), realizados en lugares lejanos a miles de kilómetros de Venezuela, se acumulan inicialmente en la estratósfera, por el efecto de Coriolis, y con el tiempo el material radiotóxico alcanza también el suelo venezolano. Este hecho indujo la realización de una serie de programas de mediciones de radiactividad ambiental a nivel nacional. Con el objetivo final de evaluar las posibles consecuencias en la biósfera superficial de Venezuela (Solanas *et al.*, 1966), realizaron mediciones en concomitancia con las explosiones nucleares con un tímido programa de vigilancia y monitoreo continuo de aire a nivel del suelo. Hay factores físico-químicos que han intervenido para que hoy en día exista una cantidad medible (310 Bq km^{-2} , estimada por Libby (2011) de algunos radioisótopos relacionados con los accidentes y explosiones nucleares.

Además de los ensayos nucleares, las actividades naturales contribuyen apreciablemente a la concentración de NORM y TE-NORM superficial. Algunas de las mediciones del material radiactivo natural, principalmente Uranio, Torio, y Radón, presentes en materiales de deposición de las aguas termales de El Carozo en el Estado Táchira, se deben a las iniciativas de Sandoval *et al.*, (1982, 1987). Otros estudios han permitido establecer el desequilibrio radioisotópico en las aguas termales (Essien *et al.*, 1983), con base a los resultados reportados por Urbani (1983) sobre la ubicación y composición química de las aguas termales de Venezuela.

A título de ejemplo reportamos algunos valores sobre concentraciones de uranio y torio en muestras ambientales y las relaciones radioisotópicas en aguas termales de Venezuela (Tablas 1 y 2).

Tabla 1. Valores de las concentraciones de NORM en aguas termales. Tomado de Essien *et al.*, (1983).

Muestra	^{232}Th (Bqkg ⁻¹)	^{230}Th (Bqkg ⁻¹)	^{228}Th (Bqkg ⁻¹)	^{227}Th (Bqkg ⁻¹)
El Carozo	2.331 ± 0.185	2.960 ± 0.148	68.080 ± 2.220	4.292 ± 0.370
Muestra	^{238}U (Bqkg ⁻¹)	^{235}U (Bqkg ⁻¹)	^{234}U (Bqkg ⁻¹)	
El Carozo-1	3.700 ± 1.480	0.148 ± 0.370	4.514 ± 0.185	
El Carozo-2	8.325 ± 0.555	3.700 ± 0.740	11.026 ± 0.730	
El Carozo-3	8.362 ± 0.888	4.070 ± 1.480	12.654 ± 1.295	

Tabla 2. Relación radioisotópica y concentración de SiO₂ en aguas termales. Adaptado de Sandoval *et al.* 1983

Fuente termal	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (BqBq ⁻¹)	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ (BqBq ⁻¹)	$^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ (BqBq ⁻¹)	SiO ₂ (mg L ⁻¹), de URBANI (1992)
San Juan de los Morros	1.60	0.13	6.83	27.0
Urena	9.94	0.21	8.29	39.0
El Carozo	3.29	5.18	10.67	9.0
Las Trincheras	1.61	1.35	21.60	8.2
El Salvaje	1.38	0.07	11.71	5.7
La Colonia	1.13	<LD*	3.20	11.0
El Caballo	3.34	<LD*	6.62	21.0
S. Antonio del Golfo	1.81	<LD*	19.74	6.0

* <LD menos del límite de detección.

Como parte de un programa más extenso de evaluación de la presencia de NORM se han incluido las mediciones de muestras de alimentos de la dieta del venezolano y otros productos seleccionados (Sajo-Bohus *et al.*, 1992). Se estima que hoy todavía el territorio venezolano contenga los dos principales radioelementos ^{90}Sr y ^{137}Cs que pertenecen respectivamente al grupo del calcio y sodio-potasio participantes de los procesos químicos y bioquímicos del ecosistema. En 1986 el desastre nuclear de Chernobyl (Rusia) fue de tal envergadura que se pudieron medir los efectos en Venezuela. Se realizaron estudios en la USB de las aguas de lluvia recolectadas a diario y tratadas químicamente para concentrar fragmentos de fisión antropogénicos (colaboración USB - IVIC). Se suponía que dada la distancia, la *onda radiactiva* podría llegar a Venezuela en

algunos meses, sin embargo, después de seis semanas se pudo medir la presencia de cesio-137 en las muestras analizadas; este resultado indicó una mayor rapidez de lo esperado de la difusión de las partículas radiactivas en suspensión. Con la colaboración de las 36 estaciones meteorológicas de la Fuerza Aérea (FAV), se realizaron mediciones en sedimentos, aire y suelos para elaborar el primer mapa radiológico de Venezuela (Sajo-Bohus *et al.*, 1994). Los valores obtenidos de las concentraciones de radón y los niveles de la radiación gamma son reportados en la Fig.1.

Como parte de los proyectos de mayor importancia ambiental promovidos por Fonacit (Conicit), se llevó a cabo un programa a nivel nacional de mediciones de radiactividad ambiental (proyecto MPS RP-VII 1992) realizando mediciones de

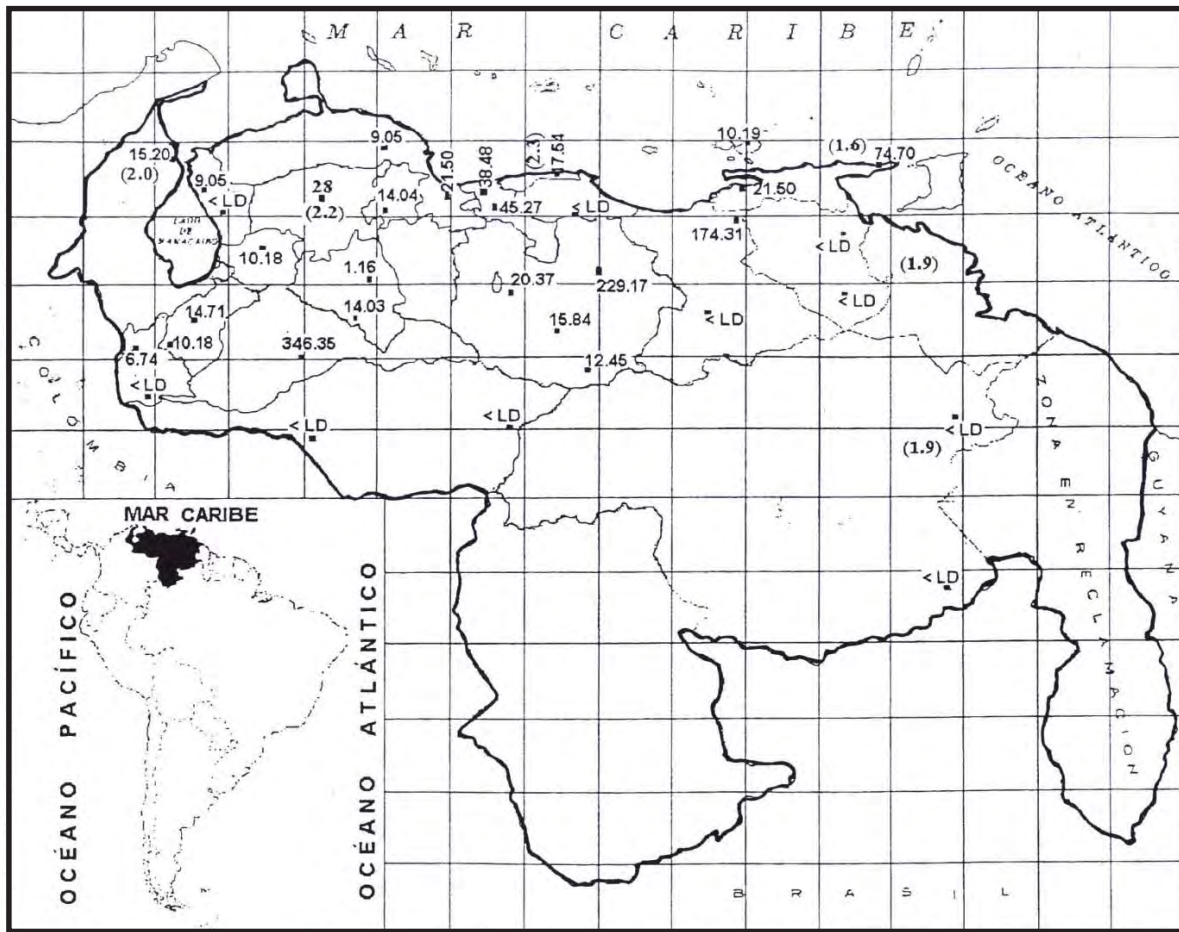


Figura 1. Primer mapa radiológico de Venezuela; los valores entre paréntesis, indican los niveles de radiación debida a la radiación gamma [mGy día^{-1}] y los otros son los valores de las concentraciones de radón ambiental en [Bqm^{-3}] Tomado de Sajo-Bohus et al., (1994).

muestras de aguas surtidas a la población, gas del subsuelo de uso doméstico y otras muestras ambientales; al mismo tiempo se estudió también los posibles efectos de las explosiones nucleares en el país (Sajo-Bohus, 1997; Horvath, 2000).

Otros investigadores iniciaron programas de muestreo y mediciones en diferentes localidades enriqueciendo así los datos ambientales en Venezuela. Por ejemplo Labrecque *et al.*, (2001), a lo largo de la costa noroeste y este de la península de Paraguaná, determinaron la actividad de ^{137}Cs

en suelos superficiales (a una profundidad entre 2 y 5 cm) reportando una concentración de 10 Bq kg^{-1} . Los valores obtenidos se encontraron fuera del rango esperado para la región. Esto se justificó a partir de factores geográficos y/o climatológicos dominantes de la zona de estudio. Los resultados una vez más pusieron en evidencia la presencia de material radiactivo antropogénico en nuestro territorio. Para dar una visión de las regiones inspeccionadas reportamos algunos valores de interés en la Tabla 3.

Tabla 3. Localidades inspeccionadas y valores de las concentraciones de algunos radioisótopos naturales y artificiales.

Localidad	Tipo de muestra	Radioisótopos	Concentración [Bq kg ⁻¹]	Bibliografía
Lago de Valencia	Sedimento	¹³⁷ Cs		Jaffé <i>et al.</i> , 1993
Norte de Venezuela e Isla Margarita	Suelo	¹³⁷ Cs ⁴ ⁴⁰ K, ²³⁸ U ²³² Th	<0.9 – 1.4 2.2 – 211.7 1.5 – 9.8 4.4 – 20.7	Labrecque, 1994
Edo. Miranda	Alimentos	Radiactividad natural	¹³⁷ Cs y ⁴⁰ K	Sajo-Bohus <i>et al.</i> , 1994
Edo. Miranda	Gas domestico Cuevas	Radón	Desde algunos Bqm ⁻³ hasta 100k Bqm ⁻³	Sajo-Bohus <i>et al.</i> , 1995 Urbani <i>et al.</i> , 1998
Altos de Pipe	Suelo y aire	⁹⁰ Sr	0.42 – 5.75 Bq L ⁻¹	Solanas <i>et al.</i> , 1966
Región petrolífera	Crudo	Radiactividad natural	52-288	Valdes y Sajo-Bohus, 1998
Territorio Nacional	Ambiente	Radiactividad natural	Intervalo de valores	Sajo-Bohus <i>et al.</i> , 1999
Territorio Nacional	Aguas termales	Relación isotópica U-Th	1.13 - 9.94 BqBq ⁻¹	Sandoval <i>et al.</i> , 1987
Parque Nacional Henri Pittier	Suelo	¹³⁷ Cs	10 - 250	Labrecque <i>et al.</i> , 2002

TÉCNICAS ANALÍTICAS NUCLEARES: LAS PRIMERAS EXPERIENCIAS EN VENEZUELA

Desde la mitad del siglo pasado la tecnología ha evolucionado rápidamente y un sin número de técnicas han sido utilizadas para determinar los niveles de radiación inicialmente en medicina y la industria y más tarde en la investigación. Lamentablemente la historia ha sido poco favorable a la energía nuclear, no solamente en Venezuela, sufriendo altibajos en el tiempo y sin tener la atención que hubiera merecido.

La técnica de autoradiografía fue empleada por Vunjak (1965) en una muestra de granito

cercana a Ciudad Bolívar, determinando una edad de 367 Ma que atribuye una etapa de granitización tardía.

Una técnica que ha sido empleada ingeniosamente para observar la presencia de material radioactivo en Venezuela ha sido propuesta por Solanas *et al.*, (1966). En la Fig. 2, se muestra una autoradiografía que ilustra claramente el aumento temporal de material radiactivo en suspensión en el aire.

La explosiones nucleares de 50 Mton realizadas por Rusia en 1961 han tenido un impacto negativo ambiental en Venezuela, siendo las concentraciones de los radioisótopos beta-emisores

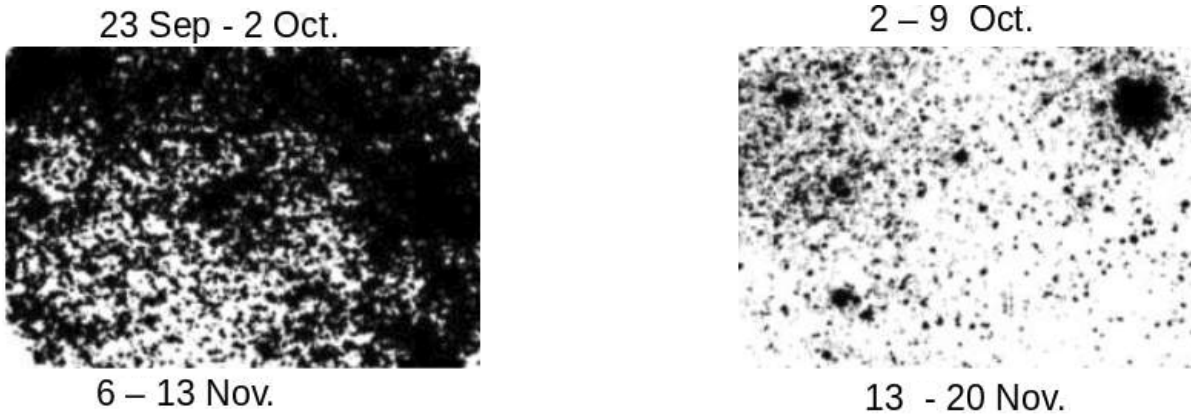


Figura 2. Autoradiografía de partículas radiactivas (puntos oscuros) suspendidas en el aire de muestras ambientales obtenidas durante las pruebas nucleares entre el 23 de septiembre y el 20 de noviembre, los meses de mayor actividad nuclear en el año 1961. Tomado de Solanas *et al.*, (1966).

(^{90}Sr) en el aire entre $0.42 - 5.75 \text{ Bq L}^{-1}$ (cuando no debería ser medible es decir $< \text{LD}$). Mientras que en muestras de suelo las variaciones son órdenes de magnitud mayor siendo entre 37 y $1.9 \times 10^3 \text{ Bq km}^{-2}$ (Solanas *et al.*, 1966). En las Figs. 3 y 4, se reportan los valores de las concentraciones de ^{90}Sr determinadas en función

del tiempo. Una observación sobre las pruebas nucleares francesas es que por haberse realizado en la faja ecuatorial, han tenido un mayor impacto en el ambiente natural de Venezuela en comparación con los realizados en los hemisferios adyacentes (trópicos de Cáncer y de Capricornio).

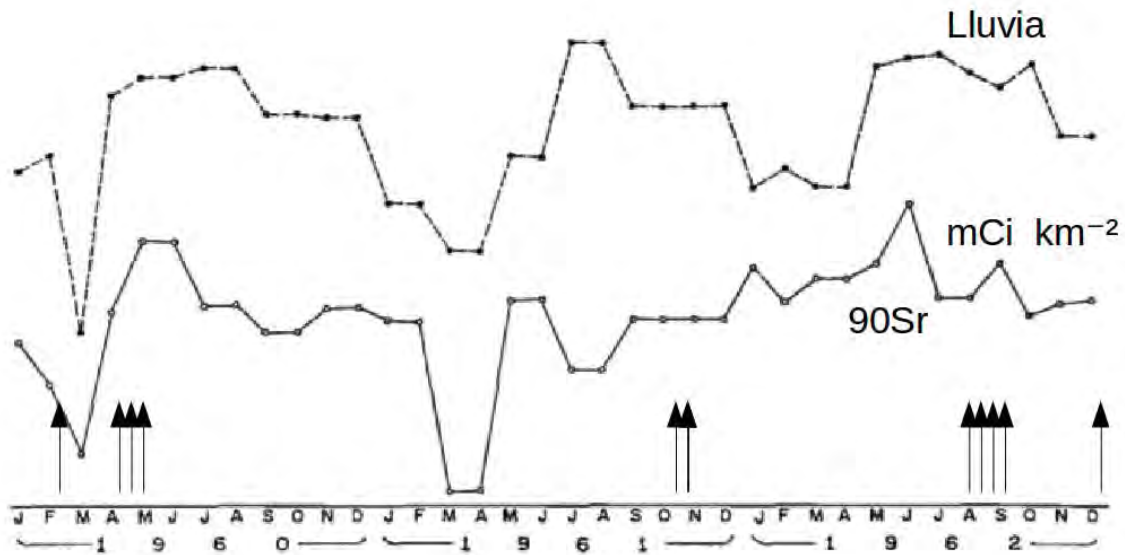


Figura 3. Precipitación de lluvias radiactivas y valores de las concentraciones de Sr-90 determinadas en función del tiempo. Las flechas indican las explosiones nucleares de potencia entre 10 y 50 kton. Tomado de Solanas *et al.*, (1966).

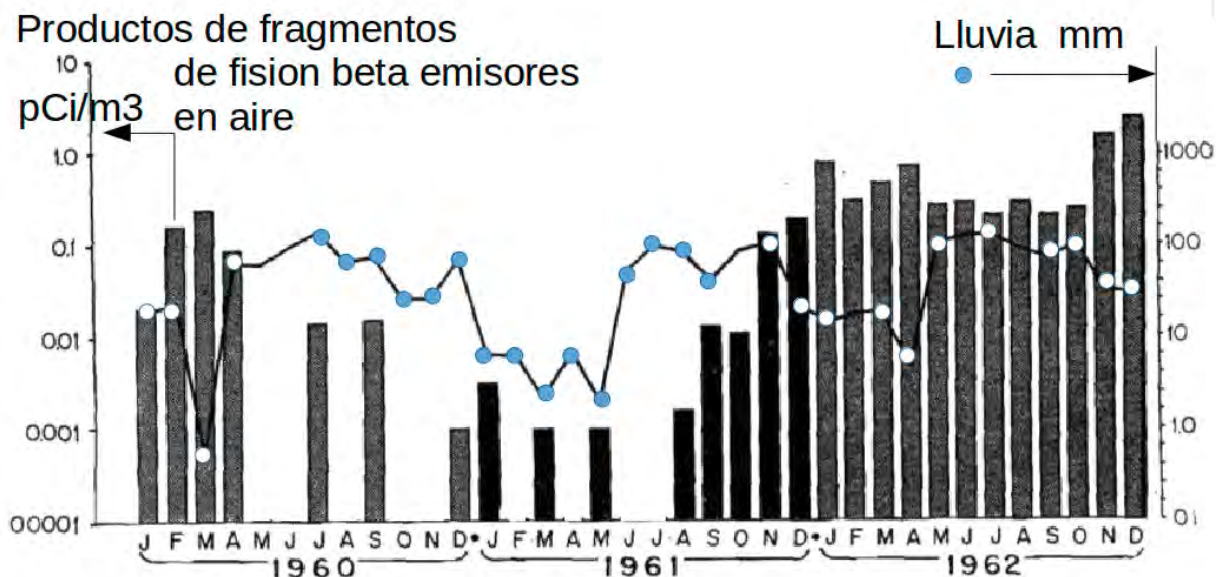


Figura 4. Precipitación de lluvias radiactivas y valores de las concentraciones de fragmentos de fisión beta emisores en aire cerca del suelo en la estación meteorológica "IVIC". Tomado de Solanas *et al.*, (1966).

TÉCNICAS NUCLEARES EN MEDICINA IMPLEMENTADAS EN VENEZUELA

En particular para estudios relacionados con ciencias de la tierra se han desarrollado detectores para espectrometría alfa de alta resolución (Cereceda *et al.*, 1992), pero en la mayoría de los casos se han empleado sistemas disponibles comercialmente complementados con sistemas electrónicos de análisis diseñados y construidos en algunas oportunidades en los laboratorios del IVIC y algunas universidades nacionales (UCV, USB). En todas las técnicas el principio aplicado para la detección de las radiaciones ionizantes está bien establecido y se relacionan principalmente con métodos indirectos. En la sección que sigue se describen las técnicas que se han desarrollado a lo largo del último siglo y que son las más difundidas, además mencionaremos aquellas que se utilizan más frecuentemente en el país. Pero antes presentaremos la infraestructura necesaria para realizar un estudio ambiental a gran escala, y para este propósito, presentaremos un esquema de laboratorio para medir niveles bajos de radiación (Sajo-Bohus *et al.*, 1994), en la cual

se indican los equipos necesarios y algunos que hoy todavía se encuentran en operación.

Contadores y espectrómetros de radiaciones nucleares

La familia de los contadores y espectrómetros se puede clasificar en dos: aquellos que detectan la presencia de radiación sin distinguir la señal obtenida en base al tipo y energía y los detectores con características determinadas que suplen un espectro en energía por tipo de radiación. Dentro del primer grupo se encuentran los tubos Geiger-Müller, los cuales son utilizados únicamente como monitores de campo en cuanto no discriminan por la energía incidente.

Una amplia familia de centelladores orgánicos e inorgánicos son utilizados para espectrometría en cuanto permiten establecer el tipo y energía de la radiación. Algunos detectores de tipo gaseoso para espectrometría de neutrones y de barrera superficial de silicio (Cereceda *et al.*, 1992) fueron construidos dentro de los proyectos de investigación. Adicionalmente a estos se juntan los detectores pasivos como los plásticos, por ejem-

polycarbonatos (CR-39, LR-115, entre otros) y los materiales termoluminiscentes (Barros *et al.*, 1996). La diferencia principal entre los dos grupos de detectores es que los pasivos en oposición a los activos después de la exposición requieren de un tratamiento químico o térmico para obtener un resultado interpretable, por ejemplo la dosis. Para los detalles técnicos y características operacionales de los sistemas de adquisición de datos nucleares ver referencia (Knoll, 1979).

Contadores alfa/beta

Para determinar la concentración de material radiactivo en muestras de suelos, rocas y fluidos ambientales generalmente es conveniente emplear un sistema de conteo automatizado que disponga de una estructura para medir decenas de muestras en secuencia. En el Laboratorio de la USB se utiliza un sistema que automáticamente analiza en secuencia 50 muestras con capacidad de discriminar entre radiación beta y alfa. La particularidad de la técnica es que el sistema de detección está formado por dos detectores acoplados en paralelo, una configuración geométrica que permite reducir por coincidencia de señales el fondo debido a la radiación cósmica y ambiental. Para reducir ulteriormente el fondo de radiación el detector es rodeado con un blindaje de plomo de 5 a 10 cm de espesor. Se ha utilizado este sistema para determinar las concentraciones de radiactividad en conjunto con la técnica de análisis elemental por medio del TXRF para determinar elementos considerados contaminantes en muestras de agua potable de diferentes regiones de Venezuela (Sajo-Bohus *et al.*, 1994; Castro *et al.*, 1997).

La concentración de alfa emisores en las aguas potables tiene un amplio rango de valores, siendo el valor máximo medido de 0.57 BqL^{-1} . Sin embargo, el 20% de las fuentes analizadas tiene una concentración por debajo del límite de detección (Bernasconi *et al.*, 1991) de 5 mBqL^{-1} . De las 74 muestras de agua analizadas la mayoría (73%) tiene calcio mientras que es insignificante la concentración de cobre y algunos otros elementos minoritarios. Se ha observado la presencia de cloro (utilizado en aguas potables) y es

sorprendente su alta concentración en la estación de Quizandal y Auyántepeui siendo reservas ambientales situadas lejos de los centros poblados. La presencia de azufre en aguas surtidas es justificada e imputable a la emisión gaseosa de las refinerías. Por otra parte, es importante resaltar que los elementos pesados de mayor toxicidad, por ejemplo As, Pb, Hg, Cd no están presentes con concentración medible.

Espectrometría alfa

La identificación de alfa emisores naturales se ha realizado también con detectores de cristales de silicio de barrera superficial. Detectores de esta familia se han construido (Sajo-Bohus y Greaves, 1991) y utilizados en diferentes estudios ambientales, por ejemplo en aguas termales de Venezuela (Sandoval *et al.*, 1985). A título de ejemplo mencionamos que las concentraciones de los alfa emisores en las aguas surtidas varían entre 0.185 BqL^{-1} y 0.370 BqL^{-1} (Sajo-Bohus *et al.*, 1996). Recientemente se ha instalado un conjunto de ocho espectrómetros alfa de la Canberra para ser empleados en el estudio de datación mediante ^{210}Pb realizado por espectrometría alfa, vía ^{210}Po (Arriojas *et al.*, 2009).

Metodología de las trazas nucleares

Hace medio siglo se observó que la ventana de plástico de las naves espaciales sometidas a tratamiento químico presentaba pequeñas trazas; éstas, como se descubrió después, son inducidas por partículas energéticas de origen cósmico. Hoy en día existen diferentes tipos de plásticos para detectar la radiación alfa, aquí mencionamos los polycarbonatos CR-39TM (Columbia Resin 39, Pershore Moulding, U.K. and Tasl Trak Bristol U.K.) y los LR-115 (Kodak Pathe. Fr) que son insensibles a las radiaciones gamma e ideales para estudios de radón ambiental. Al dejarlas expuestas al aire libre, con una superficie de algunos cm^2 , por un período de un mes, se puede determinar la concentración de los emisores alfas por medio de la densidad de trazas. Estas se visualizan sumergiendo el detector en una solución cáustica (6N, NaOH, a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ para el CR-39TM y 2,5 N a 60°C para el LR-115) por un

tiempo que puede variar entre 1 y 6 horas. La densidad de trazas, determinada con el auxilio de un microscopio óptico de transmisión (amplificación de 400) acoplado a un digitalizador de imágenes, se transforma en concentración de radón por m^3 . Los factores de conversión son 0.434 Bqm^{-3} (CR-39) y 30.8 Bqm^{-3} (LR-115) para un tiempo de exposición de un mes. Además del conteo por digitalización de imágenes mencionado, existe la posibilidad del conteo visual y por descarga eléctrica. En este último caso se utiliza una

película LR-115 de 12 μm (micrometros) de espesor en la cual se forma una perforación por cada traza inducida por la absorción de una partícula alfa. Colocando esta película sobre una tira aluminizada de Mylard™ y aplicando una diferencia de potencial de 1kV se induce una descarga en un número igual al de las trazas nucleares, supliendo la información de la concentración de radón. En la Fig. 5 se presentan trazas nucleares inducidas (ya reveladas) por los alfa emisores ^{222}Rn , ^{220}Rn y ^{219}Rn .

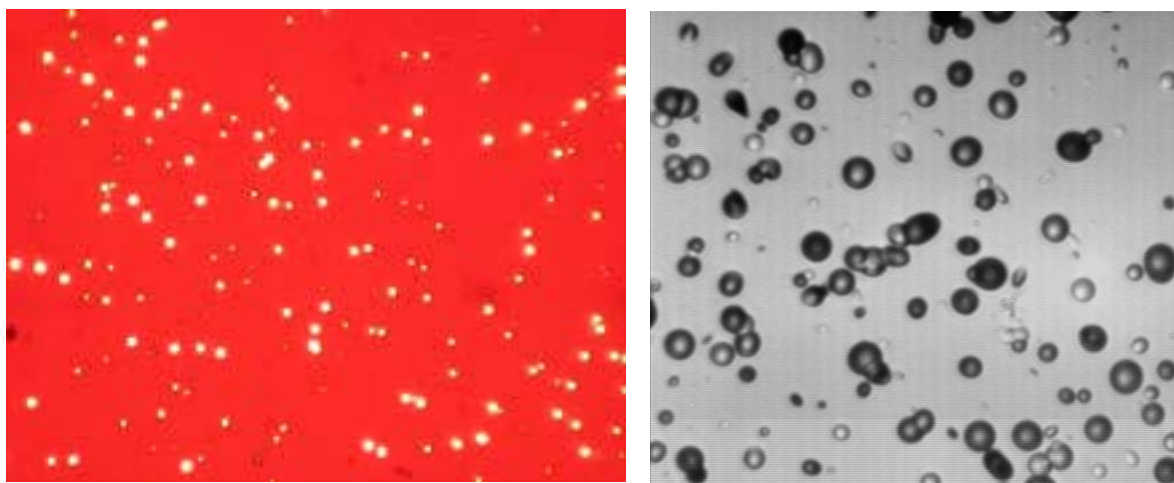


Figura 5. Trazas nucleares tratadas químicamente de partícula alfas en detectores pasivos. En la izquierda se indican las trazas observadas bajo microscopio óptico del detector tipo LR-115, a la derecha con el material PADC (CR-39™).

Debido a la sencillez del método, esta técnica es particularmente útil en el caso de realizar un programa de inspección de grandes superficies, por ejemplo, en aplicaciones tan diferentes como prospección de petróleo, identificación de yacimientos de uranio, torio, evaluación de cuevas y sedimentos, entre otros (Sajo-Bohus *et al.*, 1997; Urbani *et al.*, 1998; Palacios *et al.*, 2000; Rangel *et al.*, 2007).

Las trazas de los fragmentos de fisión del uranio-235 (Fig. 6) se emplean para determinar las edades de las rocas. Los minerales contienen una concentración de uranio natural, el isótopo U-235 presenta una sección eficaz para neutrones térmicos elevada en comparación a los otros

isótopos fácilmente identificable con INAA. Las muestras bajo estudio son irradiadas en un campo de alto flujo neutrónico (generalmente reactores de investigación); los fragmentos de fisión son detectados por las trazas inducidas en micas o policarbonatos tipo CR-39™. El método permite establecer una correlación entre la densidad de trazas y el tiempo cuando se formó, por ejemplo, la roca. Esta técnica requiere algunas consideraciones sobre la concentración inicial del uranio. Con la técnica de trazas de fisión en apatitos se han realizado estudios termocronológicos en la Cordillera de la Costa y los Andes de Mérida (Kohn *et al.*, 1984; Bermúdez *et al.*, 2015) determinando edades de exhumación de muestras de la cordillera de los Andes entre 1,4 y 24,0 Ma.

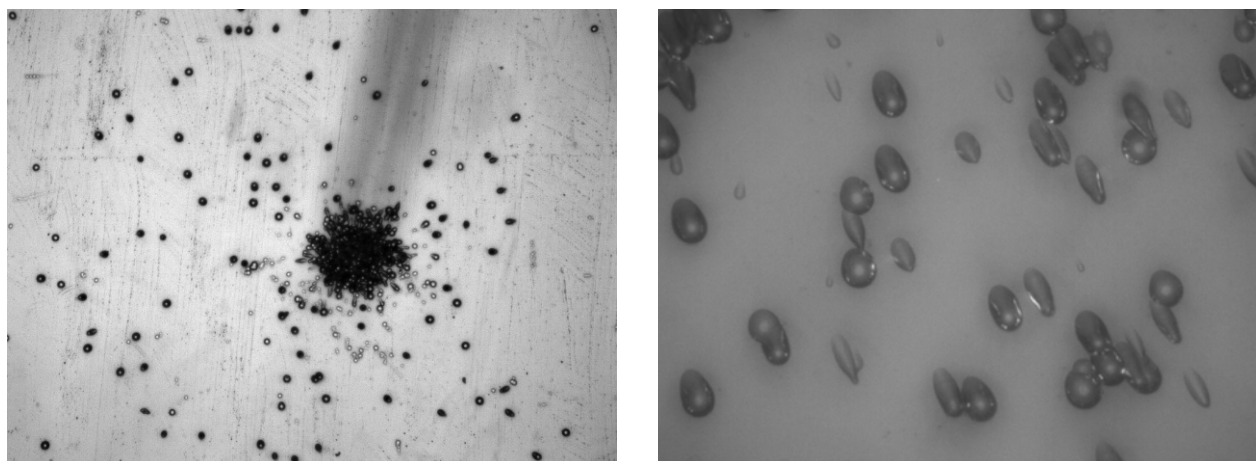


Figura 6. Imagen de trazas nucleares inducidas por fragmentos de fisión espontánea del uranio. A la izquierda se observa una alta densidad debido a la repulsión electrostática de Coulomb y a la derecha una imagen ampliada de las trazas con diámetro en promedio de 10 micrometros. Las trazas elípticas indican la dirección de procedencia de la partícula.

Técnica de detección de radiación gamma por cristales de centelleo.

La técnica de medición se relaciona a los productos inducidos (fotones del espectro visible) después de que la radiación ionizante, por ejemplo gamma, es absorbida por el material sensible del detector. El mecanismo de transferencia depende de la energía incidente, además del número atómico Z del material absorbente. En primera aproximación los mecanismos de interacción de la radiación gamma con la materia son: el Efecto Fotoeléctrico, Efecto Compton y Producción de Pares (único proceso conocido de materialización de la energía electromagnética). Un cristal por ejemplo de germanato de bismuto (BGO), ioduro de sodio NaI(Tl) o fluoruro de bario (BaF_2) entre otros, al absorber la radiación emiten fotones en el rango del espectro del visible por un proceso de desexcitación molecular. La radiación gamma así se convierte en fotones visibles, y luego en un pulso de corriente (usando un tubo fotomultiplicador) y por medio de un circuito electrónico es visualizado en un espectro para su análisis posterior (Pino *et al.*, 2014a,b, 2015).

Los sistemas de espectrometría de alta resolución emplean detectores de germanio hiper puro (HpGe) (Sajo-Bohus *et al.*, 2011). En el pasado

eran Ge(Li) y fueron empleados en proyectos de investigaciones básicas (IVIC, INTEVEP). Se emplean también los LEGe de alta resolución en energía para medidas de gammas de baja energía. En particular en la técnica de análisis elemental TXRF se emplea el Si(Li) pero los costos son ordenes de magnitud superiores respecto los centelladores mencionados en el párrafo anterior. La calibración se realiza utilizando una fuente multi-gamma (^{154}Eu , QCY-46 o fuentes individuales puntuales) para cada espectrómetro debido a la diferencia en el comportamiento dinámico y la sensibilidad del sistema. En estas técnicas se requiere de una electrónica nuclear para discriminar los pulsos generados por el material detector y producir una distribución en base la altura o una discriminación en base la subida del pulso eléctrico (espectrómetros con detectores semiconductores o de gas) o en base al decremento del voltaje de la señal (centelladores). Esta última técnica es particularmente útil en el caso de discriminar una fuente mixta de radiación (gamma-neutrones) y ha sido aplicada con suceso en las mediciones de la concentración de azufre en crudo y en muestras de barro (Pino *et al.*, 2014).

Una técnica de importancia desarrollada recientemente se relaciona con la caracterización de fluidos multifásicos la cual emplea la coinci-

dencia de señales inducidas por fotones gamma producidos por la aniquilación de positrones (decaimiento del ^{22}Na de semivida 2.605 a) (Vidal *et al.*, 2011). Otro estudio interesante se hizo con detectores orgánicos de centelleo del tipo EJ-339A de nueva generación (Pino *et al.*, 2014), acoplados a sistemas de digitalización para discriminar entre neutrones lentos, neutrones rápidos y fotones gamma.

Otra técnica de particular interés en la detección de radiación alfa se relaciona con el método del filtro acoplado a un centellador plástico; ésta consiste en medir la concentración de una fuente alfa emisora (p.e. radón y de sus productos de decaimiento) retenidos en un filtro Millipore (ashless AA 0.8 mm). El flujo de aire (10 L/min) generado por un sistema calibrado de bombeo (ADIT Corp. Fairfield, Conn. USA) pasa por un filtro (por un tiempo determinado, ~ 5 min). Ésta se coloca sobre un disco transparente en el cual hay una película delgada de ZnS(Ag) (mod WV24970 ASP/6 W.B. Johnson. Ronceverte, USA) a su vez apoyada sobre el fotomultiplicador (PM-tube Burle Tube Product, Lancaster, Penn., USA). El número de cuentas obtenido se transforma en concentración de actividad utilizando un factor de calibración. Uno de los centros para determinar el factor de conversión (que teóricamente es de 3 cps/Bq) es la National Air and Radiation Environmental Laboratory (NAREL) en Montgomery, Alabama, USA.

Debido a la importancia del radón desde el punto de vista estudios de suelo y estratos geológicos para prospección de crudo y minerales, se han desarrollado métodos para realizar mediciones en tiempos relativamente cortos. Entre los utilizados en nuestros laboratorios mencionamos el método discontinuo por absorción en carbón activado. Este material se encuentra en un contenedor hermético. Una vez expuesto al ambiente en estudio se cierra herméticamente y se envía al laboratorio donde por vía espectrométrica se cuantifican los gamma emisores. Esta técnica ha sido empleada en los estudios ambientales realizados en el IVIC.

El monitoreo continuo de radón se requiere cuando la variación temporal de su concentración

es significativa. Un instrumento versátil para este tipo de mediciones es el Pylon (mod AB-5, Pylon Elec. Toronto Canada) en el cual se utiliza el método de la celda de centelleo descrito anteriormente. En el caso del gas emanado del suelo el instrumento que utiliza un detector de partículas alfa es el MARCUS-10 (Gammadata Instr. AB, Suecia), ampliamente utilizado en el estudio de emanación de radón de estratos geológicos (Palacios *et al.*, 2013).

En las mediciones de los niveles de radiación gamma, y en menor grado para alfa emisores, se emplean también detectores termoluminiscentes (TLD), entre los que se encuentran cristales de LiF, CaF_2 , $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$, etc. que al absorber la radiación modifican sus niveles de energía de tal manera que un calentamiento posterior origina una emisión luminosa proporcional a la energía total absorbida. Estos detectores son reciclables y requieren después de cada medición un tratamiento con calor. Un sistema portátil que emplea bulbos libres de ^{40}K fue desarrollado por la KFKI Atomic Energy Research Institute, Budapest, Hungría; el modelo de mayor éxito, "Pille", ha demostrado ser un instrumento versátil para realizar mediciones de radiactividad gamma ambiental (para los datos ver Fig. 1).

Un método particularmente útil para determinar la presencia de alfa emisores en muestras ambientales es la espectrometría alfa. Como se mencionó anteriormente, la Gammadata Instr. AB, Suecia ha desarrollado un sistema portátil que incorpora un detector de cristal de silicio de barrera superficial y una bomba de aire para medir concentración de radón en estratos geológicos superficiales; el referido equipo, modelo Marcus-10, es un contador alfa sofisticado apto para las condiciones de campo. Esta unidad permite realizar una medición en 10 minutos y se ha empleado favorable para realizar estudios ambientales en donde hay un interés particular para determinar "fuentes de emanación de radón", con la posibilidad de identificar posibles anomalías radiactivas geológicas llamadas *hot-spots*. Una información particularmente útil en estudios de superficies perturbadas donde se han removido estratos con-

siderables de tierra para edificar nuevas urbanizaciones (Rodríguez, 2013).

Los niveles de radón en las viviendas de las ciudades más pobladas, como es la capital de los estados, se ubican entre el límite de detección (LD) y 39 Bqm^{-3} . En las estaciones meteorológicas, los valores mayores son de hasta 346 Bq/m^3 , este último valor es el máximo observado en la ciudad de Barinas. De las 33 localidades inspeccionadas, 22 tienen valores por debajo del nivel promedio nacional pero en ningún caso se alcanzan los valores que podrían requerir una intervención. Los niveles de ^7Be (cosmogénico) y ^{137}Cs (antropogénico) más altos fueron medidos en las hojas de yuca (mandioca) y en las cenizas del Alto Caura (edo. Bolívar), 49 y 20 Bqkg^{-3} ($\pm 10\%$) respectivamente. Estos radionúclidos con concentraciones en este mismo rango fueron detectados también en suelos arenosos y en cenizas. Como era de esperarse se midió la presencia de ^{40}K en casi todas las muestras y el máximo valor se encontró en la arena, 762 Bqkg^{-3} (Sajo-Bohus *et al.*, 1996, 1997).

Técnicas nucleares en geocronología

En 1963 se observó que los sedimentos podrían datarse mediante el análisis de las concentraciones de ^{210}Pb . El principio del método se basa en la dinámica ambiental del ^{222}Rn e hijas. El ^{210}Pb de vida media (22,3 a) es el último elemento de la cadena de decaimiento y se utiliza para determinar las edades de muestras de sedimentos hasta 150 años. La técnica requiere del empleo de la espectrometría alfa para cuantificar el radioisótopo ^{210}Po (en equilibrio con $^{210}\text{Pb}_{\text{eq}}$) en las muestras de sedimentos y aplicando un modelo geocronológico se determina el tiempo de su posible formación. El ^{210}Pb acumulado está compuesto por una fracción atmosférica (hijas del Radón), que en el análisis se debe de considerar como un factor perturbador de la técnica. El ^{210}Pb se mide indirectamente a través de ^{210}Po , un emisor α [$E_{\alpha} = 5,305 \text{ MeV}$]. El paso sucesivo es estimar el $^{210}\text{Pb}_{\text{eq}}$ suponiendo que la concentración de ^{226}Ra (^{222}Rn) en el sedimento es constante y que la velocidad de migración del isótopo ^{210}Pb es despreciable.

Tabla 4. Radioisótopos padres primordiales de interés en datación geocronológica

Núcleo primordial	Vida media en años x 10^9	Isótopo final	Algunas substancias	Referencias
^{235}U	0.7038	^{207}Pb	Zircón, uraninita	Barros <i>et al.</i> , 2015
^{40}K	1.2510	^{40}Ar	Muscovita, biotita	Kohn <i>et al.</i> , 1984
^{238}U	4.4680	^{206}Pb	Zircón	Noguera <i>et al.</i> , 2011
^{87}Rb	48.8000	^{87}Sr	Micas K, feldespatos-K, rocas	Kohn <i>et al.</i> , 1984

Esta técnica se utilizó en estudios de sedimentos de la Fosa de Cariaco Arriojas *et al.*, (2009) en la que se reporta una baja tasa de sedimentación (0.24 cm a^{-1}), es decir, los estratos superficiales son de formación relativamente recientes (entre 30 y 70 a). En la Tabla 4 se reportan los productos de decaimientos radiactivos relevantes en la técnica de datación de procesos geológicos a partir de núcleos padres primordiales, con algunas referencias relevantes.

En la Tabla 5, se reportan algunos valores de interés en las técnicas de datación por medio de cadenas de decaimiento y transformación elemental, donde el elemento final es el Plomo, último elemento de la cadena de desintegración radiactiva. En la naturaleza hay una mezcla de cinco isótopos de plomo (ver Tabla 6), uno es estable, otro se produce por un proceso nuclear lento en la nucleosíntesis de las estrellas y los otros son producto del decaimiento de las familias

Tabla 5. Valores característicos de los radioisótopos de interés en datación

Isótopo inicial (radioactivo)	Isótopo generado (estable)	Vida media [Ga]	Constante de decaimiento [10 ⁻¹¹ a ⁻¹]
⁴⁰ K	⁴⁰ Ar*	1,25	5,81
⁸⁷ Rb	⁸⁷ Sr	48,8	1,42
¹⁴⁷ Sm	¹⁴³ Nd	106	0,654
¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Hf	35,9	1,93
¹⁸⁷ Re	¹⁸⁷ Os	43	1,612
²³² Th	²⁰⁸ Pb	14	4,948
²³⁵ U	²⁰⁷ Pb	0,704	98,485
²³⁸ U	²⁰⁶ Pb	4,47	15,5125

Ref.: Dalrymple, *The Age of the Earth*. http://www.talkorigins.org/faqs/dalrymple/scientific_age_earth.html, Sept. 2015.

* ⁴⁰K decae también en ⁴⁰Ca ($4.962 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$) pero no se contabiliza separadamente debido a que está intrínsecamente incluido.

radiactivas. Se observa que en la mayoría de los minerales geológicos las proporciones de los isótopos de plomo son casi constantes, esta observación sugiere que el plomo-204 se utilice de referencia para las cantidades de plomo-206 y plomo-207 acumuladas en la muestra. El tiempo requerido para que el uranio decaiga en plomo (familias ²³⁵U y ²³⁸U) se relaciona con la cantidad de ²⁰⁶, ²⁰⁷, ²⁰⁸Pb acumulado en la muestra; de tal forma que, en principio es posible estimar la edad de las rocas (tiempo desde su formación) a partir de la relación entre el ²⁰⁷Pb o ²⁰⁶Pb radiogénico respecto al no radiogénico (²⁰⁷Pb / ²⁰⁴Pb o ²⁰⁶Pb / ²⁰⁴Pb). Estudios realizados con técnicas analíticas nucleares de los últimos decenios se reseñan en la Tabla 7.

Actualmente Venezuela está participando en diferentes proyectos relacionados con ciencias de la tierra y mencionamos los reportados en el sitio web de la UNESCO: actividades para el estudio sísmico de micro zonas de Latinoamérica y estudio de acuíferos karst. Se incluye el interés en el Programa de Productividad Costera del Caribe (CARICOMP), programa regional en el cual Venezuela tiene posibilidades en contribuir a la gestión integrada de la costa. En la Tabla 8 se indican los proyectos en curso en las cuales las técnicas nucleares podrían aportar información útil.

PROYECTO FINANCIADOS POR ENTIDADES NACIONALES E INTERNACIONALES ACTUALMENTE EN CURSO DE EJECUCION

Recientemente se han iniciado dos proyectos (H. Barros, 2015 comunicación personal) bajo los auspicios de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA):

i.- VEN/7/004 para estudiar los sedimentos recientes. Esto involucra la instalación de un espectrómetro de alta resolución con Detector HPGe de Pozo de la marca Canberra.

ii.- VEN/7/005, para estudiar edad de aguas y tiempos de residencia en acuíferos mediante el empleo de los isótopos tritio (³H) y carbono-14. El sistema contempla una planta de bencenización de carbono y espectrómetro de centelleo líquido Quantulus (PerkinElmer, Inc.), esencialmente un contador de fotones de luminiscencia de muy bajo fondo.

El otro proyecto es el CFI-703 del FONACIT relacionado con el fortalecimiento de las Capacidades de la Red Nacional de Geocronología para Incrementar la Oferta de Servicios a las Empresas e Instituciones Nacionales (García, 2015;

Tabla 6. Datos de los isótopos de plomo utilizados en la determinación de las edades geológicas.

Entidad Física	Isótopo estable "primordial"	Producto de decaimiento del ^{238}U	Producto de decaimiento del ^{235}U	Producto de decaimiento del ^{232}Th	Cosmogénico generado en la nucleosíntesis de las estrellas
Elemento	^{204}Pb	^{206}Pb	^{207}Pb	^{208}Pb	^{210}Pb
Masa atómica	203.97302	205.97444	206.97588	207.97663	
Abundancia/semivida	1.40%	24.10%	22.10%	52.40%	$T_{1/2} = 22.6 \text{ a}$

Tabla 7. Lista de proyectos en las cuales se emplean técnicas analíticas nucleares

Técnica aplicada	Radioisótopo	Tópico	Proyecto
Espectrometría alfa	^{210}Pb (^{210}Po)	Datación mediante ^{210}Pb realizado por espectrometría alfa, vía ^{210}Po .	Arriojas <i>et al.</i> , 2009
Espectrometría Gamma con LEGe	^{210}Pb y ^{137}Cs	Datación de sedimentos de la Fosa de Cariaco.	Alfonso <i>et al.</i> , 2014
Espectrometría Gamma	^{210}Pb y ^{137}Cs	Retroceso glaciar y datación reciente de sedimentos de Antártica Marítima.	Barros <i>et al.</i> , 2015
Detector centellador, equipo Pylon AB-5	$^{222,220,219}\text{Rn}$	Mediciones en campos de extracción de gas-natural.	Palacios <i>et al.</i> , 2013
Contadores alfa activos y pasivos	Radón e hijas	Exploración.	Palacios <i>et al.</i> , 2000
Contadores alfa, espectrometría gamma	^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U , ^{222}Rn	Faja del Orinoco, Costa y Rio Orinoco.	Palacios <i>et al.</i> , 2000, Sajo-Bohus <i>et al.</i> 2000
Trazas de fisión	Fragmentos de fisión	Determinaron de edades	Bermúdez <i>et al.</i> , 2015

López, 2015). En Venezuela tendremos la oportunidad de instalar técnicas analíticas nucleares de punta para:

- ^{210}Pb ; análisis de sedimentos recientes, empleando espectrometría gamma y alfa.
- U/Th; geocronología de rocas carbonáticas, corales antiguos, karst, etc.
- ^{14}C ; para muestras de sedimentos, estudios paleoclimáticos, fósiles, etc.
- U/Pb utilizando EChG+ICPMS, sólo para zircones detríticos no zonados.

Hasta la fecha se han obtenido importantes resultados de los estudios realizados en:

- La laguna periglacial de la península de Fildes, en la isla Rey Jorge o isla 25 de Mayo de la Antártica Marítima (Barros *et al.*, 2015).
- Análisis de sedimentos del embalse Matícora, Proyecto (TCP IAEA VEN/7/004) (Salas, 2015).
- Geocronología con U/Pb y Ar-Ar en el estado Yaracuy y Falcón (Baquero 2015, Urbani *et al.*, 2015).

Tabla 8. Resumen de actividades científicas y proyectos en ejecución.

http://portal.unesco.org/science/es/ev.php.URL_ID=5730&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html

Tópico o área	Título del Proyecto	Técnicas nucleares	Observaciones /referencias
Agua dulce	Grupo de trabajo de nieves e hielos del Programa Hidrológico Internacional-América Latina y el Caribe (PHI-LAC)	Espectroscopía nuclear	http://www.geofisica.unam.mx/popoc/colaboracion/GTNH/index.html
Gente, Biodiversidad y Ecología	Reserva de Biósfera Alto Orinoco-Casiquiare. Delta del Orinoco	TXRF	"Pueblos por la Biósfera", Universidad Simón Bolívar
Ciencias de la Tierra	Uso sostenible del grupo de elementos del platino (PICG, Proyecto 479) - Acuíferos kársticos y recursos hídricos (PICG, Proyecto 513)	Espectroscopía nuclear y de masas TXRF, ICP, AA, otros	UNESCO
Océanos	Comisión Oceanográfica Intergubernamental: Subcomisión para el Caribe y las Regiones Adyacentes	INAA, PGA, NCRA	UNESCO
Ciencias Fundamentales	Cátedra UNESCO en red de Computadores, establecida en 2004 en la Universidad de los Andes, Mérida	Rn	UNESCO
Política sostenible y Desarrollo sostenible	Cátedra Estudios de Desarrollo, Universidad Central de Venezuela	TXRF, ICP, AA	UNESCO
Costas e Islas Pequeñas	Programa de Productividad Marina Costera en las Zonas del Caribe: biodiversidad costera sostenible y servicios para los ecosistemas	Espectroscopía nuclear y de masas TXRF, ICP, AA, otros	UNESCO (CARICOMP)
Ciencias de la Tierra	Correlación global de granitos tipo-A y rocas relacionadas, su mineralización y su significado en la evolución de la litósfera	Medición de Rn, TXRF	UNESCO (PICG, Proyecto 510)
Ciencias de la Tierra	Estudio sísmico de micro zonas de ciudades latinoamericanas	Medición de Rn	UNESCO (PICG, Proyecto 487)
Ciencias de la Tierra	Interacción Tierra-Océano durante el período Cuaternario	Medición de Radon, U_{nat} , Th_{nat}	UNESCO (PICG, Proyecto 495)

PROYECCIÓN DE ACTIVIDADES PROGRAMADAS EN UN FUTURO PRÓXIMO

Las áreas de investigación de mayor interés en este momento y con excelentes perspectivas de continuarlas en el futuro se relacionan a la geocronología, estudio de la dinámica de estratos geológicos y cuerpos de agua. Los equipos por instalar para el ^{14}C y tritio (financiados por la OIEA- VEN//005) se podrán utilizar en la continuación de los estudios mencionados. Mientras que los espacios en la USB han sido acondicionados para el espectrómetro alfa/beta Quantulus; éste se encuentra recién instalado y se encuentra en fase de prueba.

Estos equipos junto a las existentes en otras instituciones seguramente favorecerán a la continuación de los proyectos mencionados y la realización de otros nuevos.

Se prevé la instalación de nuevos sistemas de adquisición de datos para análisis de muestras geológicas con la técnica de discriminación gamma-neutrones que utilizaría una nueva electrónica de manipulación de pulsos basado en la forma temporal de la señal.

Una vez instaladas estas nuevas tecnologías y otras (Araujo *et al.*, 1989) o LA-ICPMS (ablación por láser acoplado a un espectrómetro óptico o de masas), junto las que requieren de una fuente de

neutrones de baja intensidad, las técnicas analíticas de nueva generación, aportarán no solamente nuevos datos sino también valores experimentales con menor incertidumbre. Por último mencionamos el proyecto a ser ejecutado en el futuro inmediato que se relaciona a la puesta a punto

de la técnica de datación U/Th para rocas carbonáticas, junto la técnica U/Pb vía ECHG + CIPMS, para estudiar rocas con zircones detríticos. Tenemos abierto un futuro lleno de posibilidades, nuestra única limitación es la imaginación.

LITERATURA CITADA

- ALFONSO, J. A., K. PÉREZ, D. PALACIOS, H. HANDT, J. LABRECQUE, ET AL.
2014. Distribution and environmental impact of radionuclides in marine sediments along the Venezuelan coast. *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 300(1): 219-224
- ARAUJO, M., M. HANGER y R. MARTIN
1989. Nuclear magnetic relaxation of protons in Venezuelan crude oil. *Fuel* 68: 1079-1081.
- ARRIOJAS, A.
2009. *Geocronología de sedimentos recientes por espectrometría alfa a través del ^{210}Pb (^{210}Po)*. Universidad Simón Bolívar, Tesis de Licenciatura en Física.
- ARRIOJAS, A, H. BARROS, D. PALACIOS, D. HURTADO, M. VILLA, ET AL.
2009. Geochronology of recent sediments from the Cariaco Trench (Venezuela) by alpha spectrometry of ^{210}Pb . *AIP Conf. Proc.* 1265: 403-406.
- BAQUERO, M.
2015. *Evolución geodinámica del noroccidente de Venezuela, basado en nuevos datos de geocronología, geoquímica e isotópicos*. Univ. Central Venezuela. Dept. Geología, Caracas. Tesis doctoral, vol. 1, 292p.; vol. 2, 123p.
- BARROS, H., L. SAJO-BOHUS, E. D. GREAVES y N. GÓMEZ
1996. Dosimetría por TLD y LR-115 en el sistema de transporte subterráneo de Caracas. *Memorias I^{ras} Jornadas Venezolanas sobre Técnicas Analíticas no Convencionales para un Desarrollo Sustentable*. 14/15 de Marzo de 1996. Camurí Grande, Venezuela. USB-Sede del Litoral.
- BARROS, H., M. BEZADA, D. PALACIOS y S. HURTADO
2015. Retroceso glacial y datación reciente de sedimentos por ^{210}Pb y ^{137}Cs en la Antártica Marítima. *Proceedings I^{ras} Jornadas Radion.*, Vol. 1 (CD), 10 p.
- BERMÚDEZ, M. A., C. HOORN, M. BERNET, E. CARRILLO, P. A. VANDER BEEK, ET AL.
2015. The detrital record of late-Miocene to Pliocene surface uplift and exhumation of the Venezuelan Andes in the Maracaibo and Barinas foreland basins. *Basin Research*: 1-26, doi: 10.1111/bre.12154
- BERNASCONI, G., E. D. GREAVES y L. SAJO-BOHUS
1991. New approach in assessing the lower detection limit in low level radiation counting. *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res.*, A307: 491-496.
- CÁRDENAS, A.
1950. *Investigaciones preliminares para determinar la posible radioactividad de las fuentes termales de Agua Caliente, Municipio Ureña Distrito Bolívar, estado Táchira*. MMH. Inédito.
- CASTRO, D., D. PALACIOS, F. URBANI, P. LEÓN y L. SAJO-BOHUS
1997. Radón en agua potable del Litoral Central. *Saber* 9: 89 -95.
- CERECEDA, C.D., L. SAJO-BOHUS y E. D. GREAVES
1992. New method to measure the Schottky barrier potential. *Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res.*, B71: 484-488.
- COLVÉE, P. y E. SZCZERBAN
2006. El depósito mineral del Cerro Impacto, estado Bolívar. Revisión, evaluación e importancia económica. Infrasur y Orinoquia, para CVG. *Geos* 38: 117-118 + 242 p. en carpeta 71 de CD.
- ESSIEN, I. O., D. N. SANDOVAL y K. KURODA
1983. Thorium, Uranium deposits in El Carozo hot springs Tachira Venezuela. *Geotermia*, Caracas, 9:10-13.
- GARCÍA, E.
2015. *Composición elemental de perfiles de sedimentos del Embalse de Maticora (Edo Falcón) por TXRF e ICP-OES*. Universidad Simón Bolívar, Tesis de Licenciatura en Química .

- HORVATH, A., L.O. BOHUS, F. URBANI, G. MARX A. PIROTH, ET AL.
1994. Radon concentrations in hot spring waters in northern Venezuela. *J. Envir. Rad.* 47(2): 127-133
- JAFFÉ R., BENÍTEZ F., SAJO-BOHUS L.
1993. Assessment of eutrophication chronology via sediment core analysis: case of lake Valencia, Venezuela. *Fresenius Envir. Bull.* 2: 602-607.
- KNOLL G.
1979. *Radiation Detection and Measurement*. N.Y.: John Wiley Ed.
- KOHN, B. P., R. SHAGAM, P. O. BANKS Y L. A. BURKLEY
1984. Mesozoic-Pleistocene fission-track ages on rocks of the Venezuelan Andes and their tectonic implications. *Geological Society of America. Memoir*, 162: 365-384
- KURODA P. K., ESSIEN I. O., SANDOVAL D. N.
1983. Fallout of uranium isotopes from 1980 eruption of Mount St Helen. *J. Radioanal. Chem.* 1: 23-32
- LABRECQUE, J.
1994. Distribution of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{238}U and ^{232}Th in soils from Northern Venezuela. *Journal of radio-analytical and nuclear chemistry* 178(2): 327-336.
2010. Distribution of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{232}Th and ^{238}U in coastal marine sediments of Margarita Island, Venezuela. *Jour. Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 283(3): 669-674.
- LABRECQUE, J., Y P. ROSALES
1997. Environmental radioactivity at the Venezuelan Institute for Scientific Research (IVIC). *Jour. Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 220(1): 59-64.
- LABRECQUE J., ROSALES P. A., CORDOVES P. R.
2002. The effect of the tropical cloud (fog) forest on the spatial distribution of cesium-137 in soils in the Henri Pittier National Park (Edo. Aragua, Venezuela). *Jour. Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 253(1): 87-92
- LIBBY, L. Y F. WILLARD
1956. Current research findings on radioactive fallout. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 42(12): 945-962.
- LÓPEZ, N.
2015. *Diseño mecánico para un blindaje (Pb) de Espectrometría Gamma de alta resolución y eficiencia*. Universidad Simón Bolívar, Tesis de Maestría en Ingeniería.
- NOGUERA, M. I., J. E. WRIGHT, F. URBANI Y J. PINDELL
2011. U-Pb Geochronology of detrital zircons from the Venezuelan passive margin: Implications for an Early Cretaceous Proto-Orinoco river system and Proto-Caribbean ocean basin paleogeography. *Geological Acta*, 9(3-4): 265-272.
- OTERO, A., J. PRADO Y C. GIMÉNEZ C.
1939. Fuentes termo-minerales de Venezuela, fuentes en Agua Caliente, edo. Táchira. *Revista de Fomento*. 2(14): 117-128.
1942. Fuentes termo-minerales de Venezuela. Cordillera de la costa. San Juan de Los Morros. Agua, gas y lodo. Su composición química y radiactividad. *Revista de Fomento*, 4(44): 3-19.
- PALACIOS, D., L. SAJO-BOHUS, H. BARROS, G. BARNAFOLDI, S. Z. HERNATH, ET AL.
2000. ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U and ^{222}Rn concentration in the Orinoco river basin, Venezuela. *Proc. IRPA Reg. Conf. On Rad. Prot. in Central Europe*, 22-27 Aug 1999 Budapest Hungary, ISBN 9638051884. CD, p. 639-645.
- PALACIOS, D., E. FUSELLA, Y. AVILA, J. SALAS, D. TEIXEIRA, ET AL.
2013. Radon measurements over a natural-gas contaminated aquifer. *Radiation Measurements*, 50: 1-260.
- PASQUALI, JEAN Y R. SIFONTES
2008. Exploración de uranio en Venezuela. *Geos* 39 (2007): 74-75 + 10 p. y 18 láminas en carpeta 124 de DVD.
- PINO F., STEVANATO L., CESTER D., NEBBIA G., SAJO-BOHUS L., ET AL.
2014a. Detecting Fast and Thermal Neutrons with the Boron Loaded Liquid, EJ-339A. *Applied Radiation and Isotopes*, 92: 6-11.
- PINO, F., H. BARROS Y L. SAJO-BOHUS
2014b. Determination of Multiple Compton Scattering Fractions in Gamma Densitometry by Monte Carlo Simulation. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 61(2): 870-876.
- PINO, F., L. STEVANATO, D. CESTER, G. NEBBIA, L. SAJO-BOHUS Y G. VIESTI
2015. Study of the thermal neutron detector ZnS(Ag)/LiF response using digital pulse processing. *Journal of Instrumentation*, 10: 1-14.
- RANGEL, A., T. VILORIA, L. SAJO-BOHUS, H. BARROS Y E. D. GREAVES
2007. Radioisotope Concentration in Lake Sediments of Maracaibo, Venezuela. *American Institute of Physics Conf. Proc.*, 947: 475-476.

- RAYNAUD, D., Y.M. TAMERS
1971. Radiocarbon content of natural asphalt from Lake Guanoco. *Compt. Rend. Ser. D.*, 273(19): 1660-1663.
- RODRÍGUEZ BRICEÑO, P. E.
2013 *Estudio de niveles de concentración de Radón (²²²Rn) en suelos de zonas edificables en las adyacencias del sistema ferroviario Ezequiel Zamora sector Vista Linda*. IVIC, Trabajo de Grado M. Sc., Mención Física Médica.
- SAJO-BOHUS, L.
1997. Effects of Nuclear Explosions in Venezuela. *Atlantida*, USB, 37: 82-86
- SAJO-BOHUS, L. y E. D. GREAVES
1991. Design and application of an economic Surface barrier detector. *Acta Cient. Ven.* 42: 201-207
- SAJO-BOHUS, L., E.D. GREAVES, A. BENITES, L. RAMIREZ, W. J. CONTRERA, ET AL.
1997. Niveles de radón en la red de estaciones de meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana. *Atlantida*. Anales de la Universidad Simón Bolívar 36: 10-16
- SAJO-BOHUS L., E. D. GREAVES, H. FERRER, P. DEHOLLAIN, M. GUERRA, ET AL.
1994. Quantitative analysis of gamma emitter radionuclides in some products of the Venezuelan diet. *Rev. Fac. Agronomía*. 11: 395-409.
- SAJO-BOHUS, L., E. D. GREAVES, G. MERLO, F. URBANI y J. PALFAVLI J.
1997. Radon migration study in Venezuela cave with SSNT detectors. *Radiation Measurements*, 28: 725-729.
- SAJO-BOHUS, L., E. D. GREAVES, J. PALFALVI, G. MERLO y F. URBANI F.
1996. First measurements of radon concentrations in Venezuelan caves. *Bol. Soc. Venez. Espel.*, 29: 17-19.
- SAJO-BOHUS, L. y J. GÓMEZ J.
1997. Gross alpha radioactivity of drinking water in Venezuela. *J. Environ. Radioactivity*, 35(3): 305-312.
- SAJO-BOHUS L., GREAVES, E. D., LIENDO J., BARROS H., BARNAFOLDI G. ET AL.
2000. Venezuelan near-shore marine and Orinoco river environmental gamma radiation and radon measurements. *Proc. IRPA Reg. conference on Radon protection in Central Europe*, 22-27 Aug 1999 Budapest Hungary, ISBN 9638051884, CD, p. 658.
- SAJO-BOHUS, L., J. PALFALVI, J. MOLINA y E. D. GREAVES
1995. Radon concentration in Venezuelan gas for domestic supply. *Rad. Meas.*, 25:1-4.
- SAJO-BOHUS, L., J. PALFALVI, F. URBANI, D. CASTRO, E. D., GREAVES, ET AL.
1999. Environmental Gamma and Radon Dosimetry in Venezuela. *Radiation Measurements* 31: 283-286.
- SAJO-BOHUS, L., D. ROSSO, A. M. SAJO CASTELLI, D. R. NAPOLI, E. FIORETTO, ET AL.
2011. HPGe detectors long time behaviour in high-resolution α spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 648: 132-138.
- SALAS, J.
2015. *Montaje de un sistema gamma espectrométrico de bajo fondo y estudio geocronológico reciente del embalse de Maticora (Edo Falcón)*. Universidad Simón Bolívar, Tesis de Maestría en Física.
- SANDOVAL, D. N., J. ADKRIDGE y P. K. KURODA
1982. Uranio, Radón, Torio en materiales de deposición de las aguas termales de El Carozo Táchira. *Geotermia*, 8: 51-54.
- SANDOVAL, D. N., E. D. GREAVES y S. MELÉNDEZ
1987 Uranium and thorium isotopic in Venezuelan hot disequilibrium springs. *Geochemical Journal*, 21: 43-49. Reproducido en *Geotermia*, 28: 15-21
- SIFONTES, R. S.
1985. *Informe final del proyecto de prospección geoquímica de uranio según el contrato No. 444/82 suscrito entre CADAFE y la Universidad Central de Venezuela*. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Instituto de Geoquímica, 93 p. y 4 mapas
- SOLANAS, J., A. DARDER y P. BERTOU
1966. Environmental radioactivity in Venezuela from January 1960 to December 1962. *Health Physics*, 12(1): 43-48.
- TAMERS, M. A.
1966. Ground water recharge of aquifers as revealed by naturally occurring radiocarbon in Venezuela. *Nature*, 212(5061): 489-492.
- URBANI, F.P.
1983. *Evaluación de los recursos geotérmicos de Venezuela*. Caracas: Ed. CDIGN (UCV, Dept. de Geología). Colección libros no. 5, tomo 1, 375 p. Reproducido en *Geotermia en Venezuela*. Geos, UCV, Caracas, 31: 1-347. 1992.
- URBANI, F., N. FLORES, L. SAJO-BOHUS y R. CARREÑO
1998. Soil Gas Radon Concentration measurements in geological faults near Caracas, Venezuela. *Bol. Soc. Venezolana de Geol.* 23(2): 29-34.
- URBANI, F., M. BAQUERO, S. GRANDE, V. VALENCIA V, U. MARTEN, ET AL.
2015. Nuevas edades U-Pb de rocas ígneas y metamórficas del estado Yaracuy. *Bol. Acad. C. Fis., Mat. y Nat.*, 75(2): 33-52.
- VALDES, M. y L. SAJO-BOHUS
1998. Determinación de la concentración de radioactividad y análisis por fluorescencia de rayos-X de cenizas de petróleo *Acta Cient. Venezolana*, 48(4).

VIDAL, A., C. OSORIO, F. PINO, A. HORVATH, H. BARROS,
ET AL.

2011. Multiphase monitoring by annihilation radiation coincidence mode. *Am. Inst. Phys. Conf., Proce.*, 1423: 414-417.

VUNJAK, N.

1965. Aplicación del método de autorradiografía en la determinación de la edad de la granitización en las proximidades de Ciudad Bolívar. *Geos*, Caracas, 13: 51-57,

WYANT, D. y C. SHARP

1952. *Radioactive source materials in los Estados Unidos de Venezuela. A preliminar report.* Ministerio de Minas e Hidrocarburos, Dir. Geología. Informe inédito. Publicado en Wyant D., Sharp C., Ponte Rodríguez C. 1953. Radioactive source materials in los Estados Unidos de Venezuela. *USGS, Trace Elements Investigations 222*, 116 p. <http://pubs.usgs.gov/tei/0222/report.pdf>