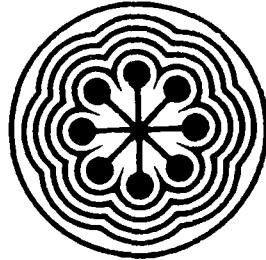




MX0600113

instituto nacional de investigaciones nucleares



COMPORTAMIENTO DE RADON Y SUS PRODUCTOS DE
DECAIMIENTO EN MEDIOS FISICOS

CENTRO DE INFORMACION Y DOCUMENTACION NUCLEAR

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES

DIRECCION DE INVESTIGACION Y DESARROLLO

COMPORTAMIENTO DE RADON Y SUS PRODUCTOS DE DECAIMIENTO EN
MEDIOS FISICOS.+

+ Conferencia, Seminario de Física Nuclear, Centro Nuclear
Salazar, Méx. Junio, 1990.

GERENCIA DE INVESTIGACION APLICADA

CONFERENCIA IA-90-341

JUNIO DE 1990

COMPORTAMIENTO DE RADON Y SUS PRODUCTOS DE DECAIMIENTO EN
MEDIOS FISICOS.+

Fís. Armando Chávez Bautista
Gerencia de Investigación Aplicada
Dirección de Investigación y Desarrollo
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares

+ Conferencia, Seminario de Física Nuclear, Centro Nuclear
Salazar, Méx. Junio, 1990.

CONFERENCIA IA-90-341

JUNIO DE 1990

COMPORTAMIENTO DE RADON Y SUS PRODUCTOS DE DECAIMIENTO
EN MEDIOS FISICOS.+

Fís. Armando Chávez Bautista.
Gerencia de Investigación Aplicada.
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
Apartado Postal 18-1027, Col. Escandón, 11801, México, D.F.

GENERALIDADES.

Para un átomo radiactivo, tal como el Radón, la probabilidad de su decaimiento radiactivo en una unidad de tiempo es una constante λ . Si existe un número N de átomos radiactivos, el número dN que decaen en un tiempo dt es.

$$\frac{dN}{dt} = - N\lambda \quad 1$$

La razón de decaimiento de $N\lambda$ átomos por unidad de tiempo, es llamada la actividad A de una fuente de N átomos. Integrando la ecuación 1 se obtiene la ecuación exponencial.

$$N = N_0 e^{-\lambda T} \quad 2$$

donde N_0 es el número de átomos existentes al tiempo $t=0$, si la ecuación 2 es multiplicada por λ , se obtiene la actividad de la fuente, como función del tiempo.

+ Conferencia, Seminario de Física Nuclear, Centro Nuclear Salazar, Méx. Junio, 1990.

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

3

Existen dos definiciones muy útiles en el estudio del decaimiento radiactivo. Uno es el periodo de vida media* T, que es el intervalo de tiempo durante el cual el número de átomos N, y por consiguiente la actividad, decrecen a la mitad de su valor.

$$T = \ln 2 \left(\frac{1}{\lambda} \right) = \frac{0.693}{\lambda}$$

4

Como un ejemplo; la constante de decaimiento radiactivo del Radón es $\lambda = 0.0075/\text{hora}$, de tal forma que

$$T = 0.693 \left(\frac{1}{\frac{0.0075}{\text{hr}}} \right) = 92 \text{ hr} = 3.82 \text{ días}$$

Otro concepto importante es la vida promedio τ . La forma exponencial de decaimiento, indica que se necesita un tiempo infinito, para que decaigan los átomos radiactivos de un mismo tipo de una muestra. Es evidente que no podemos conocer qué núcleo o número de núcleos decaerá en cierto instante.

Realizando los cálculos adecuados, se demuestra que la vida promedio es el recíproco de la constante de decaimiento.

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

También

$$\tau = \frac{1}{0.693} \quad T = 1.44T$$

En particular la vida promedio del Radón se calcula como

$$\tau = 1.44T = 1.44(3.82 \text{ días}) = 5.5 \text{ días}$$

El número de un átomo de una muestra radiactiva, que contiene un solo tipo de radionuclidos, se calcula como el producto de la actividad $A = N\lambda$ y la vida promedio τ

* Diversos autores utilizan el símbolo $t_{1/2}$.

$$A \tau = (N\lambda) \left(\frac{1}{\lambda} \right) = N$$

El número de átomos que contiene una muestra de Radón cuya actividad⁺ es 100p Ci se calcula como

$$N = A \tau = \left(222 \frac{\text{des}}{\text{min}} \right) (5.50 \text{ días} * 24 * 60 \frac{\text{min}}{\text{día}})$$

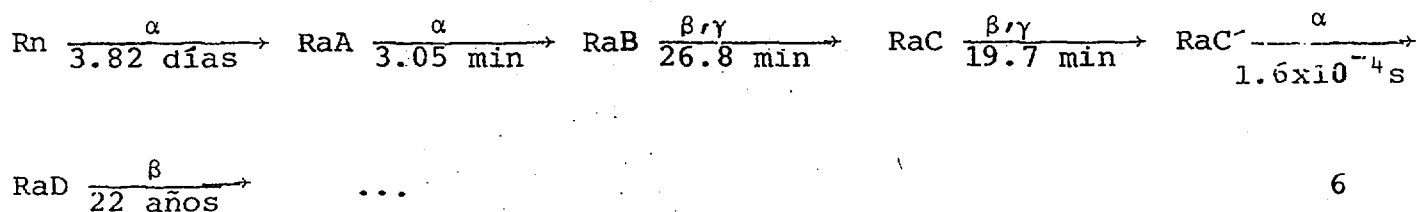
$$N = 1.76 \times 10^6 \text{ átomos de Radón}$$

El Uranio se encuentra ampliamente distribuido en forma natural en rocas, arenas y suelos, un valor típico de distribución es de 1 a 4 ppm.

El Uranio 238 (²³⁸U) tiene una vida media de 4500 millones de años, aproximadamente la edad de la tierra. Cada átomo de ²³⁸U sufre una serie de transformaciones radiactivas, sea por emisión de partículas α o partículas β , antes de alcanzar un átomo estable no radiactivo (²⁰⁶Pb).

Dentro de la cadena de decaimiento del ²³⁸U, existe el Radón, que es un gas monoatómico, químicamente inerte. Como las rocas y suelos son ligeramente porosos, parte del Radón producido por el decaimiento del Radio, se difunde a través de la superficie y evidentemente a la atmósfera. Un valor típico de flujo de Radón a través de la superficie terrestre, es 0.1 $\mu\text{Ci}/(\text{día} * \text{m}^2)$, considerándose normal una concentración de 1 pCi/l en la atmósfera.

En la siguiente cadena, se muestran algunos de los productos de decaimiento del Radón de vida corta: RaA(²¹⁸Po), RaB(²¹⁴Pb), RaC(²¹⁴Bi), RaC'(²¹⁴Po). Cada uno de ellos tiene una vida media menor de 30 minutos, terminando en un producto de vida media muy larga, RaD (²¹⁰Pb).



$$+ 100 \text{ pCi} = 3.7 \frac{\text{des}}{\text{seg}} = 222 \frac{\text{des}}{\text{min.}}$$

De acuerdo con el esquema de decaimiento, RaC' tiene una vida muy corta, se considera por razones prácticas que RaC' tiene la actividad de su padre RaC.

La tabla 1 sigue la secuencia de decaimiento de vida corta a partir del Radio (Ra), en esta se muestran los nombres isotópicos y sus símbolos, así como algunas características. En particular la columna 8 indica el número de átomos necesarios para producir una actividad equivalente a 100pCi. Tomanse como ejemplo el ^{222}Rn y el ^{218}Po , para el primero se necesitan 1.77×10^6 átomos, mientras que para el segundo, solamente se necesitan 977 átomos, se deja al lector sacar sus conclusiones.

Las ecuaciones que describen el crecimiento de la actividad de cada producto de decaimiento en una fuente que inicialmente es Radón, se pueden obtener a partir de conocimientos básicos. Se asignan para el Radón y sus productos de decaimiento los siguientes subíndices Rn, A, B, C.

Partiendo de la ecuación general se tiene:

$$\frac{dN_A}{dt} = N_{\text{Rn}} \lambda_{\text{Rn}} - N_A \lambda_A$$

7

Para encontrar la solución de las ecuaciones diferenciales para cada producto de decaimiento sucesivo, se puede suponer que la fuente original de Rn es constante, puesto que la vida media de éste es más de 200 veces mayor que cualquiera de sus productos de decaimiento de vida corta. Las soluciones para el crecimiento de la actividad de cada radionucleido, son:

Para Radón

$$A_{\text{Rn}} = A_{\text{Rn}} = \text{cte}$$

8

RaA (^{218}Po)

$$A_A = A_{Rn} (1 - e^{-\lambda_A t}) \quad 9$$

RaB (^{214}Pb)

$$A_B = A_{Rn} \left(1 - \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} e^{-\lambda_A t} - \frac{\lambda_A}{\lambda_A - \lambda_B} e^{-\lambda_B t} \right) \quad 10$$

RaC (^{214}Bi)

$$A_C = A_{Rn} \left(1 - \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} \cdot \frac{\lambda_C}{\lambda_C - \lambda_A} e^{-\lambda_A t} - \frac{\lambda_A}{\lambda_A - \lambda_B} \cdot \frac{\lambda_C}{\lambda_C - \lambda_B} e^{-\lambda_B t} \right. \\ \left. - \frac{\lambda_A}{\lambda_A - \lambda_C} \cdot \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_C} e^{-\lambda_C t} \right) \quad 11$$

RaC' (^{214}Po)

$$A_{C'} = A_C \quad 12$$

es conveniente por comodidad utilizar el concepto de vida promedio donde $\tau = 1/\lambda$, por lo que las ecuaciones anteriores toman la siguiente forma:

Para Rn

$$A_{Rn} = A_{Rn} = \text{cte} \quad 13$$

Para RaA

$$A_A = A_{Rn} (1 - e^{-t/4.39}) \quad 14$$

Para RaB

$$A_B = A_{Rn} (1 + 0.128 e^{-t/4.39} - 1.128 e^{-t/38.6}) \quad 15$$

Para RaC

$$A_{C'} = A_{Rn} (1 - 0.0235e^{-t/4.39} - 4.2594e^{-t/38.6} + 3.2829e^{-t/28.4}) \quad 16$$

Para $A_{C'}$

$$A_{C'} = A_C \quad 17$$

Existen diversas técnicas para la graficación de las ecuaciones anteriores, por ejemplo la ecuación 15 produce el resultado mostrado en la figura 1, la figura 2 muestra las curvas de crecimiento de la actividad RaA , RaB , RaC y $A_{C'}$, utilizando las ecuaciones 13 hasta 17. En la tabla II, se encuentran listados algunos valores numéricos para las curvas de crecimiento, de acuerdo a las mismas ecuaciones.

En algunas ocasiones las ecuaciones de crecimiento requieren, un tratamiento especial; sobre todo cuando se requieren estudios de una atmósfera de Radón puro en tiempos relativamente cortos. Las ecuaciones de crecimiento 14, 15 y 16, contienen términos exponenciales, los cuales pueden ser expandidos como series de potencias

Para Rn

$$A_{Rn} = A_{Rn} \quad 18$$

Para RaA

$$\begin{aligned} A_A &= A_{Rn} \left(\lambda_A t - \frac{(\lambda_A t)^2}{2} + \dots \right) \\ &= A_{Rn} \left(\frac{t}{\tau_A} \right) \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{t}{\tau_A} \right) + \dots \right) \\ A_A &\approx A_{Rn} \left(\frac{t}{\tau_A} \right) \quad \text{donde} \quad \left(\frac{t}{\tau_A} \right) \ll 1 \end{aligned} \quad 19$$

Para RaB

$$A_B = A_{Rn} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{t}{\tau_A} \right) \left(\frac{t}{\tau_B} \right) \right] \quad \text{en general} \quad \left(\frac{t}{\tau} \right) \ll 1 \quad 20$$

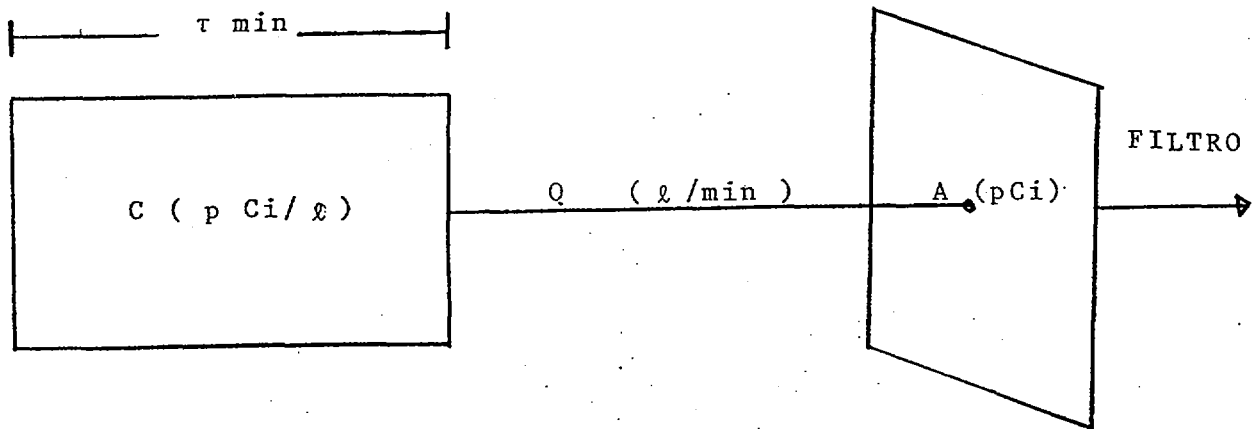
Para RaC

$$A_C = A_{Rn} \left[\frac{1}{6} \left(\frac{t}{\tau_A} \right) \left(\frac{t}{\tau_B} \right) \left(\frac{t}{\tau_C} \right) \right] \quad \text{para toda } \left(\frac{t}{\tau} \right) \ll 1 \quad 21$$

Las relaciones anteriores son útiles para evaluar la composición radiactiva de una atmósfera de aire con cierta concentración de Radón, minutos después de que se han removido todos los productos de decaimiento por un filtro absoluto. En otras palabras puede describir la "juventud" radiactiva del aire, consideración muy útil en recintos donde existe una alta concentración de Radón, puesto que entre 25% y 40% de los productos del decaimiento son inhalados y retenidos en el pulmón.

LA ACTIVIDAD EN UN FILTRO

Cuando el aire del medio ambiente es pasado regularmente por un filtro, la actividad radiactiva se acumula, debido a la deposición de los productos del decaimiento del Radón de vida corta.



Supongase una concentración filtrable de un sólo radionúclido cuya concentración C esta dada en pCi/l , y es pasada a través de un filtro a una razón volumétrica $Q(l/min)$. La razón de deposición del radionúclido en el filtro se da como

$$C(pCi/l) \quad Q(l/min) = CQ(pCi/min.) \quad 22$$

La razón de cambio, dA/dt , de la actividad A , acumulada en cualquier tiempo t sobre el filtro, es la razón de la nueva actividad CQ menos la razón de decaimiento λA de la actividad existente,

$$\frac{dA}{dt} = QC - A\lambda$$

23

Integrando la ecuación diferencial, tenemos

$$A = \frac{QC}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

definiendo $QC/\lambda = QC\tau$, la actividad se escribe como

$$A = QC\tau (1 - e^{-t/\tau})$$

24

La ecuación 24 se encuentra graficada en la figura 3, de ésta se pueden obtener varios puntos importantes:

- 1.- La máxima actividad en el filtro es equivalente a la actividad que puede ser depositada sobre el filtro en un intervalo de tiempo igual a 1 vida promedio τ , sin decaer. La actividad en equilibrio en el filtro $QC\tau$, es igual a la actividad contenida en un volumen de aire, $Q\tau$ (l), que puede ser filtrada en una vida promedio τ .
- 2.- La forma de crecimiento exponencial $(1 - e^{-\lambda t})$ es similar a la que presenta un producto del decaimiento proveniente de un padre de vida larga. Para la curva de acumulación del filtro, la constante de actividad equivalente a la del padre de vida larga, es $QC\tau$ (pCi).
- 3.- La pendiente inicial es la razón instantánea de crecimiento dA/dt en $t=0$ de la ecuación 23, cuando $A=0$, es simplemente la razón de acumulación constante QC (pCi/min) / τ^λ , además la recta que parte del origen de coordenadas, extrapolando la pendiente inicial, corta al eje del tiempo exactamente en 1 vida promedio τ , figura 3.

El interés por analizar la concentración de los productos del decaimiento del Radón en un filtro ha sido compartido por diversos investigadores, estos en general han partido de las siguientes suposiciones:

- a) El aire que será filtrado tiene una concentración de Radón constante.

- b) Los productos de decaimiento de vida corta, están en equilibrio - con su ascendiente el Radón.
- c) El filtro tiene 100% de eficiencia para retener los productos del decaimiento y cero eficiencia para retener el Radón.
- d) El flujo de aire a través del filtro es mantenido constante en - Q (ℓ/min).

Las figuras 3 y 4 proporcionan información al respecto.

Consideremos el crecimiento de RaA en filtro, la figura 3 muestra el comportamiento del crecimiento de RaA. Inicialmente, la actividad de RaA crecerá rápidamente y si el flujo de aire a través del - filtro se mantiene constante por algunas vidas medias de RaA (entre - 15 y 20 min), la actividad A_A de RaA alcanzará un estado estacionario con valor máximo $QC_A \tau_A (\text{pCi}) = A_{Rn}$, el cual se mantendrá mientras el flujo de aire exista en las condiciones indicadas. Se debe notar que C_A es la concentración de RaA en el aire y $\tau_A = 4.39$ min es la vida media - de RaA.

Así como RaA se acumula en el filtro, este empieza a decaer en - RaB, de acuerdo con la actividad de RaB, inicialmente se incrementa - como el cuadrado del tiempo. En la figura 4, primera columna se mues - tra el comportamiento del incremento de actividad de RaA y RaB.

Siguiendo el modelo anterior RaB decae en RaC, se debe recordar que RaC decae en RaC', y éste decae muy rápidamente, de tal forma que el decaimiento α de RaC' se puede tratar en conjunto con el decaimien - to β y γ de RaC.

La curva de crecimiento de RaC, incrementa inicialmente con el cu - bo del tiempo, la curva de crecimiento para RaC tiene su origen en el estudio de la actividad RaA depositada en el filtro, existe la misma forma de la curva para RaC mostrada en la figura 2. Con respecto al decaimiento de RaC en RaC' ambas actividades se consideran las mis - mas. Las ecuaciones (16) (17) describen el comportamiento en ella -

$$A_{Rn} = Q C_A \tau_A$$

La figura 4, primera columna, muestra el crecimiento de RaA, RaB, RaC = RaC', en cada diagrama la escala vertical es normalizada a 1., esto es $Q C_A \tau_A = 1$.

La segunda columna representa la acumulación del producto RaB - existente en el aire del medio ambiente y colectada por el filtro, de igual manera se presenta abajo de la gráfica de crecimiento de RaB la del producto del decaimiento, RaC.

La acumulación de la actividad RaB sigue la curva de crecimiento, Figura 3, descrita por la ecuación (24), con $C=C_B$ y $\tau = \tau_B$, lo que es matemáticamente equivalente a la ecuación 15, la actividad A_{Rn} es reemplazada por la actividad de la fuente efectiva $Q C_B \tau_B$, que puede ser expresada en términos de $Q C_A \tau_A$ como.

$$Q C_B \tau_B = \left(\frac{\tau_B}{\tau_A} \right) \left(\frac{C_B}{C_A} \right) (Q C_A \tau_A)$$

y si las actividades en el aire de RaA y RaB están en equilibrio $C_A = C_B$, la máxima actividad de RaB será

$$Q C_B \tau_B = \frac{\tau_B}{\tau_A} (Q C_A \tau_A) = \frac{38.6}{4.39} (Q C_A \tau_A)$$

$$Q C_B \tau_B = 8.79 (Q C_A \tau_A) \quad 25$$

que es 8.79 veces mayor a la producida por el decaimiento de RaA cuando este está depositado en el filtro.

El depósito directo de RaB en el filtro actúa como padre de RaC, el cual se incrementa inicialmente como el cuadrado del tiempo. El comportamiento de RaB y RaC está descrito por las ecuaciones 14 y 15 y graficada en la segunda columna de la figura 4.

Existe también un depósito directo del producto de decaimiento de RaC en el filtro, su crecimiento se muestra en la gráfica de la 3a columna de la figura 4. La componente RaC crece de acuerdo con la ecuación 24 con una vida promedio τ_C .

El equilibrio se alcanza cuando la actividad es $Q C_C \tau_C$, que puede ser expresada como

$$Q C_C \tau_C = \left(\frac{\tau_C}{\tau_A} \right) \left(\frac{C_C}{C_A} \right) (Q C_A \tau_A)$$

En el aire de un medio ambiente normal RaC está en equilibrio con RaA, por lo que $C_C = C_A$ y

$$Q C_C \tau_C = \frac{\tau_C}{\tau_A} C (Q C_A \tau_A) = \frac{28.4}{4.39} (Q C_A \tau_A)$$

$$Q C_C \tau_C = 6.47 (Q C_A \tau_A)$$

26

En la cuarta columna de la figura 4 se muestra la suma de los radionúclidos RaA, RaB, RaC existentes en el filtro, RaA es una curva exponencial, la curva RaB es la suma de dos componentes y RaC es la suma de 3 componentes. Para la actividad de RaC se debe recordar que es igual a la actividad de RaC, todo el tiempo.

La tabla III proporciona valores de la deposición directa de RaB y de la acumulación por medio del decaimiento radiactivo de RaC. La tabla IV proporciona valores de la deposición directa de RaC en el filtro.

Refiriéndonos a la gráfica del extremo inferior derecho de la figura 4, es conocida como gráfica de alfa total, ya que es el resultado de los productos de radiación alfa, RaA + RaC.

DIFUSION DE RADON

Una de las características más importantes del Radón es su migración. Este deber ser estudiado de acuerdo a los mecanismos de migración que existen, en el medio en que se localice, ya sea subterráneo o en la atmosfera.

Muchas variables son significativas en la migración del Radón: la razón de decaimiento, las constante de difusión y en su caso la velo-

cidad de arrastre del medio, así mismo, humedad, presión atmosférica lluvia, nieve etc.

En general deben distinguirse dos mecanismos de Migración; difusión y transporte. Cuando existe difusión, el Radón se mueve con respecto al medio ocupando todo el espacio del cual pueda disponer. Por transporte se entiende el movimiento del medio, llevando con él al Radón. De hecho es común encontrar asociados a los dos fenómenos.

El fenómeno de migración de Radón es tan complejo que diversos autores han establecido coeficientes de difusión particulares de los medios en que se difunde el Radón, así como de agentes físicos externos, Tabla V.

De acuerdo al argumento anterior es conveniente estudiar el comportamiento de difusión del Radón en condiciones controladas. Se ha propuesto un medio continuo de extensión superficial infinita, del cual fluye uniformemente un gas radiactivo de constante de decaimiento λ , cuya concentración inicial C_0 permanece constante en el tiempo, el gas se difunde uniformemente una longitud vertical H , de acuerdo con lo anterior y si el coeficiente de difusión es D se propone que la concentración C , como función de H , es:

$$C = C_0 e^{-FH} \quad 27$$

donde $F = (\lambda/D)^{1/2}$

Si suponemos una concentración de 100 pCi/l en el límite entre la superficie generadora de Radón y la atmósfera, donde la constante de decaimiento del Radón es 2.1×10^{-6} /seg. y el coeficiente de Difusión de este en el aire, a 15°C y 760 mm Hg es 1.2×10^{-2} /cm /seg. A la distancia $H = 20$ cm sobre la superficie se tiene una concentración de Radón de 91.97 pCi/l.

DIFUSION DE RADON A TRAVES DE MEMBRANAS.

En los estudios realizados para conocer el comportamiento del Radón y de sus productos del decaimiento, se han encontrado varias aplicaciones, en Geología, Prospección de Uranio, así como Seguridad Radiológica, entre otras.

Conforme estos estudios avanzaban, también surgían diversos problemas. En algunas ocasiones la información que proporciona el Radón era alterada por la presencia de sus productos de decaimiento, en otras ocasiones, el detector de Radón tenía que permanecer largos periodos de tiempo sometidos al rigor de la humedad ambiental, éstos detectores al ser analizados proporcionaban información poco confiable.

La utilización de membranas para filtrar los productos de decaimiento del Radón y la utilización de éstas para protección del detector ha abierto un nuevo renglón en el estudio del Radón.

La técnica del análisis de trazas nucleares en plásticos delgados sensibles a las partículas ha cobrado popularidad debido a su bajo costo, su casi inexistente umbral, y naturalmente por la integración de los conteos aún en largos periodos de tiempo. Para proteger el detector plástico, figura 5, cuando este se encuentra en el subsuelo, y registrar las partículas que provienen del Radón que fluye del material adyacente, se propuso rodearlo con un vaso, este proporciona un cierto volumen de aire que envuelve al detector, por otro lado, si el vaso tiene un tamaño adecuado, los productos de decaimiento adheridos al vaso, al emitir partículas, se encuentran a tal distancia que no se registran en el detector. El problema de la existencia de aerosoles e isótopos del Radón de vida corta existentes en el volumen de aire, es resuelto colocando una membrana en la boca del vaso, el resultado es un sistema sensible específicamente al Radón 222.

El vapor de agua deja de ser un problema al colocarse la membrana, en caso de ser necesario, se puede colocar material desecante para reducir las concentraciones del vapor de agua. La figura 6 muestra los resultados de utilizar una membrana de PVC. La membrana además de proporcionar protección al detector plástico, eliminando humedad y filtran

dos los productos del decaimiento del ^{222}Rn , es una barrera casi impermeable para el Radón 220, aspecto muy importante en estudios de sismología, prospección de Uranio, prospección geotérmica, etc.

REFERENCIAS.

- 1.- Roble D. Evans
Engineers' guide to the elementary behavior of Radon daughters.
Health Physics 17(1969) 229-252 17(1969) 229-252.
2. Allan B. Tanner
Radon migration in the ground. a review
U.S. Geologic Survey (1978) 161-179.
3. S.D. Schery and D. Siegel
The role of channels in the transport of Radon from the soil.
Journal of Geophysical Research 91-B12 (1986) 12366-12374.
4. Jens Sogaard-Hansen and Anders Damkjaer
Determining ^{222}Rn diffusion lengths in soil and sediments.
Health Physics 53-5 (1987) 455-459.
5. A.L. Frank and E.V. benton
Properties of a small Radon diffusion chamber
with plastic track detectors
Solid State Nuclear Track Detectors
Proceedings at the 11th International Conference
Bristol, 1981.
6. M. Humar, M. Najzer and R. llić
Moisture-insensitive probes for separate measurement
of Radon isotopes.
Solid State Nuclear Track Detectors
Proceedings of the 11th International Conference
Bristol, 1981.

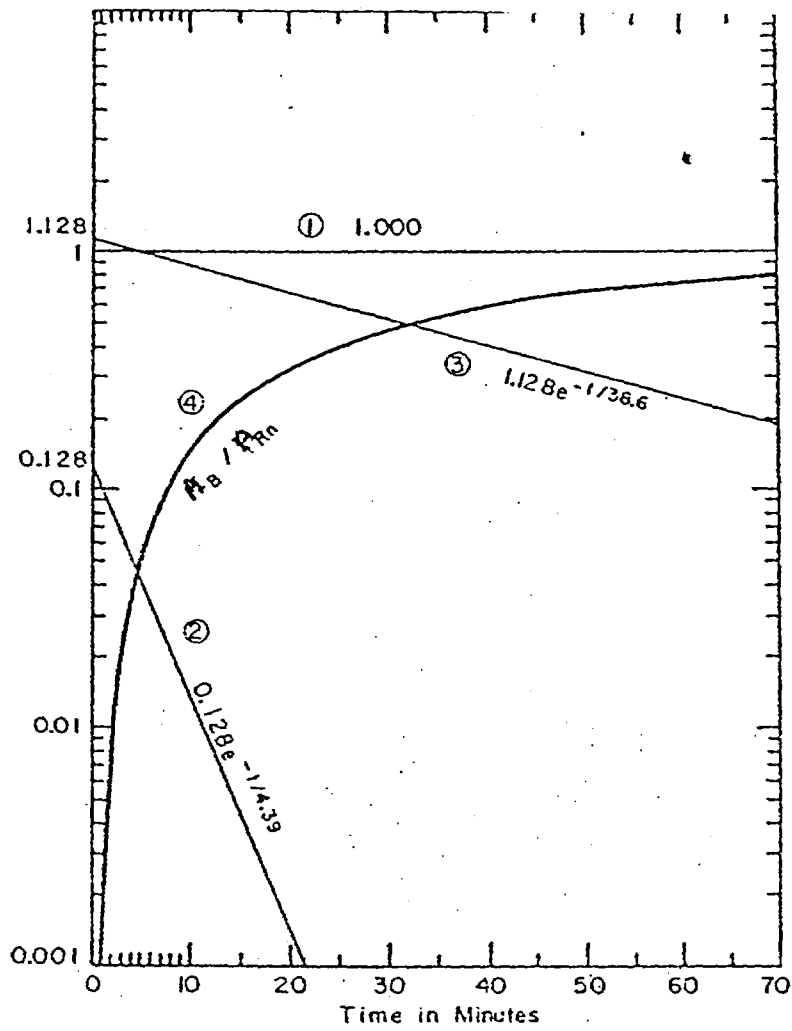


Figura 1. Crecimiento de la actividad de RaB de acuerdo a la ec - 15 del texto.

$$A_B = A_{Rn} (1 + 0.128e^{-t/4.39} - 1.128e^{-t/38.6})$$

Tabla I. Secuencia de decaimiento principal del Radio (Ra) y el Radón (Rn). La última columna indica el número de átomos necesarios para producir una actividad de - de 100 pCi.

Classical designation		Isotopic designation		Principal type of radiation	Half-period T	Mean-life $\tau = 1/\lambda$	Number of atoms per 100 pCi ($N = I\tau$)	
name	symbol	name	symbol					
radium	Ra	radium-226	^{226}Ra	α	1620 yr	2330 yr	2.7×10^{11}	
radon	Rn	radon-222	^{222}Rn	α	3.82 day	5.50 day	1,770,000	α
radium A	RaA	polonium-218	^{218}Po	α	3.05 min	4.39 min	977	α
radium B	RaB	lead-214	^{214}Pb	β, γ	26.8 min	38.6 min	8580	
radium C	RaC	bismuth-214	^{214}Bi	β, γ	19.7 min	28.4 min	6310	
radium C'	RaC'	polonium-214	^{214}Po	α	0.00016 sec	0.00023 sec	0.0008	α
radium D	RaD	lead-210	^{210}Pb	β	22 yr	32 yr	3.7×10^9	α
radium E	RaE	bismuth-210	^{210}Bi	β	5.0 day	7.2 day	2.3×10^6	
radium F	RaF	polonium-210	^{210}Po	α	138 day	199 day	6.3×10^7	α
(polonium)	(Po)							

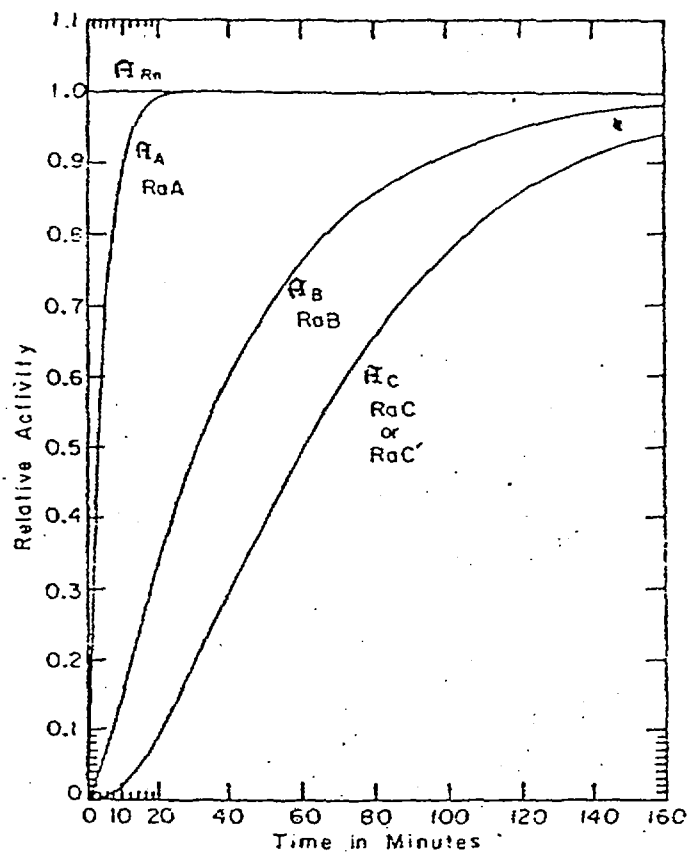


Figura 2. Crecimiento de la actividad de los productos de decaimiento de vida corta. La actividad del Radón se considera constante y normalizada a la unidad.

Tabla II. Valores numéricos del crecimiento de la actividad de RaA (A_A), RaB (A_B) y RaC (A_C). La actividad del Radón se considera constante, se normaliza tomando la razón de la actividad del producto de decaimiento a la actividad del Radón.

0.5	0.1074	0.000706	0.00000417
1	0.204	0.00277	0.0000322
2	0.366	0.0101	0.0002396
3	0.495	0.0210	0.000755
4	0.598	0.0345	0.00167
5	0.680	0.0500	0.00352
6	0.745	0.0670	0.00550
7	0.797	0.0851	0.00801
8	0.838	0.104	0.0111
9	0.871	0.123	0.0147
10	0.898	0.143	0.0188
11	0.918	0.162	0.0235
12	0.935	0.182	0.0287
13	0.948	0.201	0.0344
14	0.959	0.220	0.0406
15	0.967	0.239	0.0472
16	0.974	0.258	0.0542
17	0.979	0.276	0.0617
18	0.983	0.295	0.0695
19	0.987	0.312	0.0776
20	0.989	0.329	0.0861
25	0.997	0.410	0.132
30	0.999	0.482	0.184
35	1.000	0.545	0.237
40	1.000	0.600	0.292
45	1.000	0.648	0.346
50	1.000	0.691	0.398
55	1.000	0.729	0.449
60	1.000	0.762	0.497
70	1.000	0.816	0.584
80	1.000	0.858	0.660
90	1.000	0.890	0.724
100	1.000	0.915	0.778
110	1.000	0.935	0.822
120	1.000	0.950	0.858
130	1.000	0.961	0.887
140	1.000	0.970	0.910
150	1.000	0.977	0.929
160	1.000	0.982	0.944
170	1.000	0.986	0.956
180	1.000	0.989	0.966

Time Ra A Ra B Ra C
min, t

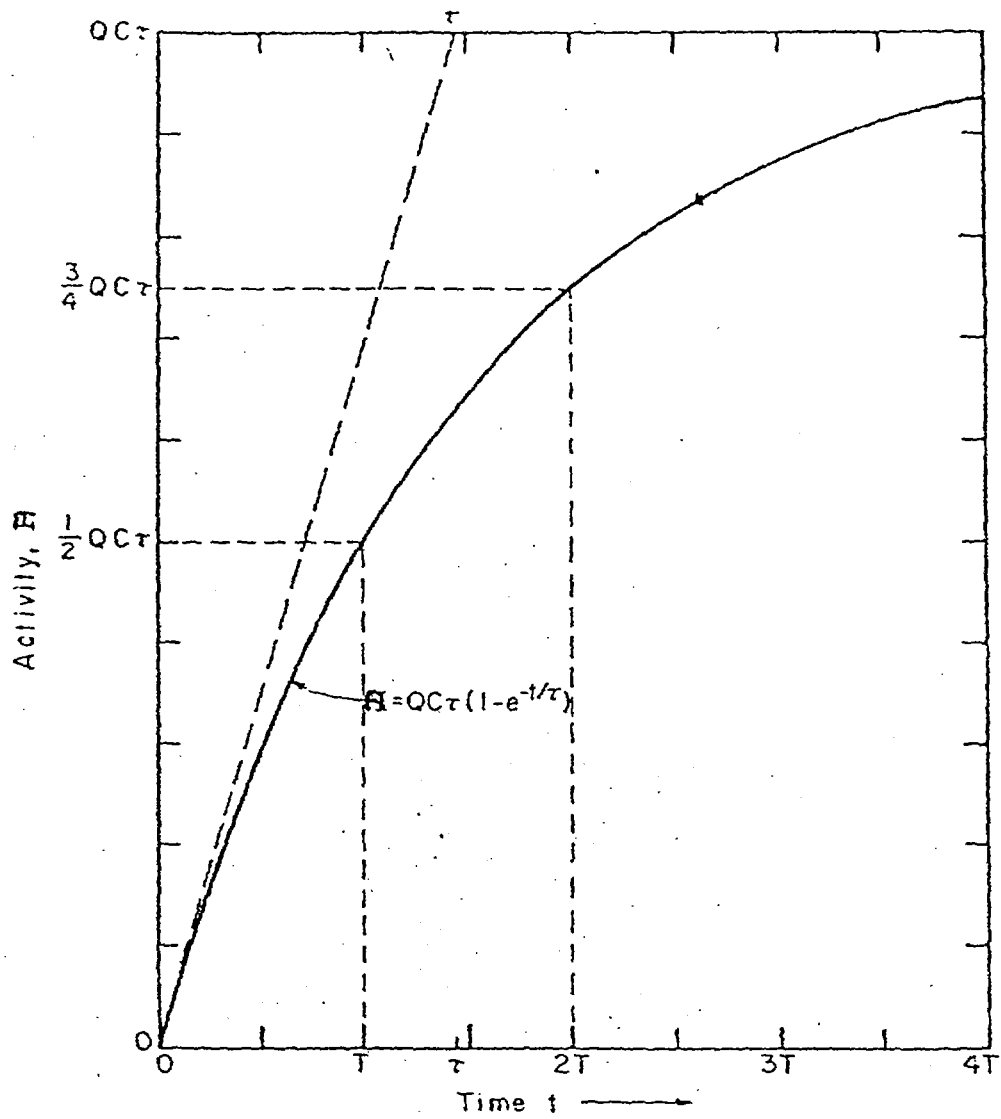


Figura 3. Acumulación de la actividad A de un radio-nuclido en un filtro de aire.

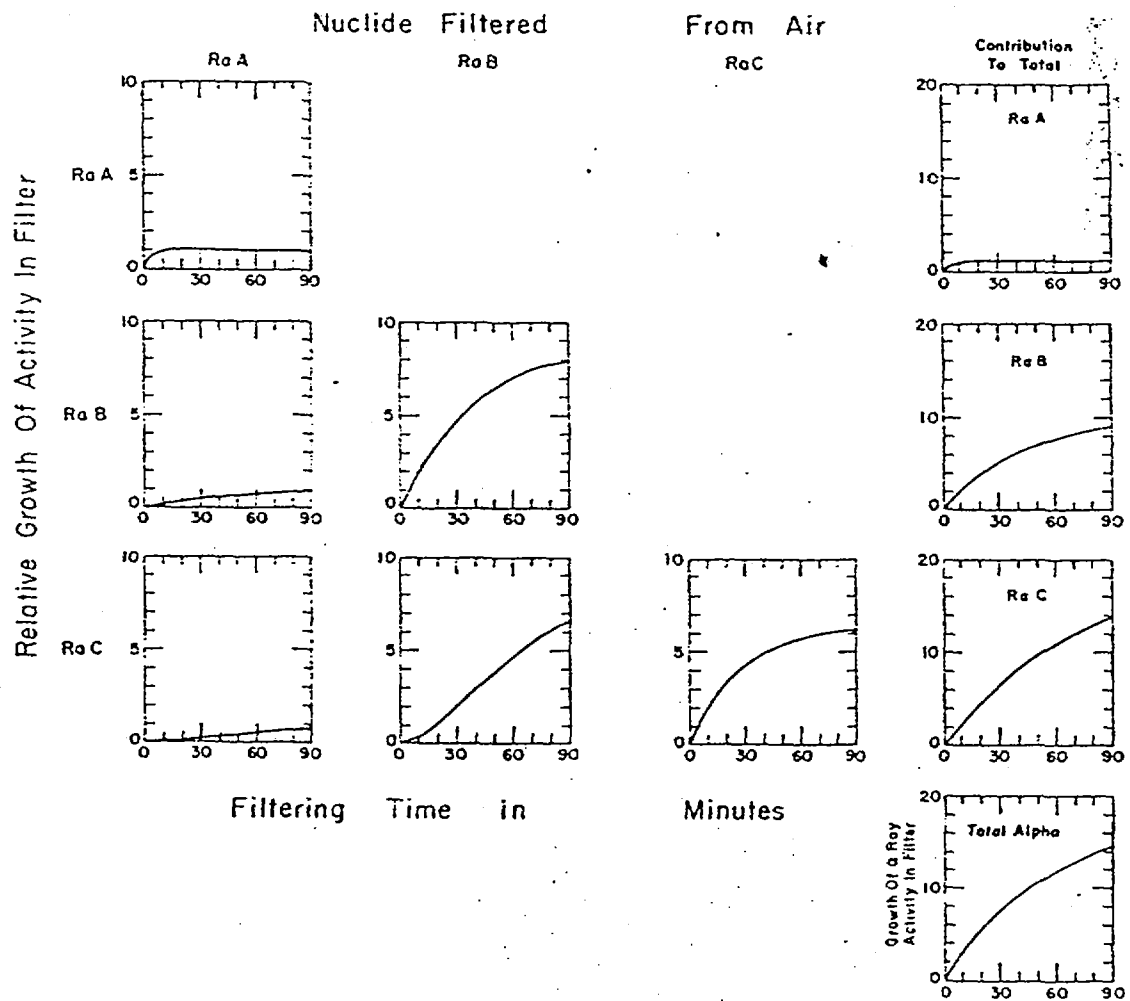


Figura 4. Crecimiento de la actividad de los radionuclidos de vida corta provenientes del Radón en un filtro. Se considera una atmósfera estable y en equilibrio.

Tabla III. Acumulación del radionúclido RaB ambiental en un filtro y el crecimiento de RaC a partir de RaB colectado.

Time, t min	RaB		RaC	
	$A_B/QC_A \tau_{A+}$	$A_C/QC_A \tau_{A+}$	$A_B/QC_B \tau_{B*}$	$A_C/QC_B \tau_{B*}$
0.5	0.1129	0.0009892	0.01285	0.0001125
1	0.2244	0.003918	0.02553	0.0004457
2	0.4431	0.01536	0.05041	0.001747
3	0.6561	0.03386	0.07465	0.003852
4	0.8638	0.05900	0.09827	0.006712
5	1.066	0.09035	0.1213	0.01028
6	1.263	0.1275	0.1437	0.01451
7	1.455	0.1701	0.1656	0.01936
8	1.643	0.2178	0.1869	0.02478
9	1.825	0.2703	0.2076	0.03075
10	2.003	0.3271	0.2279	0.03722
11	2.176	0.3881	0.2476	0.04415
12	2.345	0.4529	0.2668	0.05152
13	2.510	0.5211	0.2855	0.05929
14	2.670	0.5927	0.3037	0.06743
15	2.826	0.6672	0.3215	0.07591
16	2.978	0.7445	0.3388	0.08470
17	3.127	0.8243	0.3557	0.09378
18	3.271	0.9064	0.3722	0.1031
19	3.412	0.9906	0.3882	0.1127
20	3.550	1.077	0.4038	0.1225
25	4.185	1.529	0.4761	0.1740
30	4.744	2.005	0.5397	0.2281
35	5.234	2.488	0.5955	0.2831
40	5.666	2.968	0.6446	0.3376
45	6.045	3.435	0.6877	0.3908
50	6.378	3.884	0.7256	0.4419
55	6.670	4.312	0.7588	0.4905
60	6.927	4.714	0.7881	0.5362
70	7.352	5.439	0.8364	0.6188
80	7.679	6.060	0.8737	0.6894
90	7.933	6.582	0.9025	0.7488
100	8.128	7.014	0.9247	0.7980
110	8.279	7.369	0.9418	0.8384
120	8.395	7.658	0.9551	0.8712
130	8.485	7.891	0.9653	0.8978
140	8.555	8.079	0.9732	0.9191
150	8.608	8.229	0.9793	0.9361
160	8.650	8.348	0.9840	0.9497
170	8.682	8.443	0.9877	0.9605
180	8.706	8.518	0.9905	0.9690

+ (Equilibrium Air)

* C_B arbitrary

$$C_B = C_A$$

Tabla IV. Acumulación de RaC ambiental en un filtro

Time (t) min.	RaC $Ac/QC_A \tau_A^1$ Equilibrium	RaC $Ac/QC_C \tau_C$ Arbitrary
0.5	0.1123	0.01744
1	0.2237	0.03457
2	0.4396	0.06794
3	0.6480	0.1002
4	0.8493	0.1313
5	1.044	0.1613
6	1.231	0.1903
7	1.412	0.2183
8	1.587	0.2453
9	1.756	0.2714
10	1.919	0.2966
11	2.076	0.3209
12	2.228	0.3444
13	2.375	0.3670
14	2.516	0.3889
15	2.653	0.4100
16	2.785	0.4304
17	2.912	0.4501
18	3.035	0.4691
19	3.154	0.4875
20	3.269	0.5052
25	3.785	0.5850
30	4.218	0.6519
35	4.581	0.7081
40	4.886	0.7552
45	5.141	0.7947
50	5.356	0.8278
55	5.535	0.8556
60	5.686	0.8789
70	5.919	0.9148
80	6.082	0.9401
90	6.197	0.9578
100	6.278	0.9703
110	6.335	0.9791
120	6.375	0.9853
130	6.403	0.9897
140	6.423	0.9927
150	6.437	0.9949
160	6.447	0.9964
170	6.454	0.9975
180	6.458	0.9982

Tabla V
Resumen de Coeficientes de Difusión (D). reportado para isotopos
del Radón en varios medios.

Diffusing Isotope	Fluid	Medium	D (cm ² /sec)	Conditions	Authority
Rn, Tn, An.....	Air	Continuous	1.0×10^{-1}	Various	Various. quoted in Zimens, 1943
Rn.....	"	"	1.20×10^{-1}	15° C., 76 cm. Hg	Hirst and Harrison, 1939
".....	H ₂	"	4.76×10^{-1}	"	"
".....	He	"	3.51×10^{-1}	"	"
".....	Ne	"	2.17×10^{-1}	"	"
".....	Ar	"	9.2×10^{-2}	"	"
".....	Alcohol	"	2.69×10^{-2}	18° C.	Róna, 1917, and Ramstedt, 1919, quoted in Zimens, 1943
".....	Toluene	"	2.67×10^{-2}	"	"
".....	Benzene	"	2.36×10^{-2}	"	"
".....	Water	"	1.13×10^{-2}	"	"
".....	Air, 4% moisture	Building sand 1.40 gm./cm ³ , 39% poros- ity	5.4×10^{-2}	Not stated	Bulashevich and Khayritdinov, 1959
Tn.....	Air, no moisture	Fine sand (mostly quartz)	6.8×10^{-2}	Not stated	Grammakov, 1936
".....	Air, 8.1% moisture	"	5.0×10^{-2}	"	"
".....	Air, 15.2% mois- ture	"	1.0×10^{-2}	"	"
".....	Air, 17% moisture	"	5.0×10^{-3}	"	"
Rn.....	Air	Eluvial-detrital depos- its of granodiorite	4.5×10^{-2}	Mean effective val- ue in natural oc- currence	Popretinskiy, 1961
".....	"	Diluvium of metamor- phic rocks	1.8×10^{-2}	"	"
".....	"	Eluvial-detrital depos- its of granite	1.5×10^{-2}	"	"
".....	"	Loams	8.0×10^{-3}	"	"
".....	"	Varved clays	7.0×10^{-3}	"	"
".....	Air, 37.2% mois- ture	Mud, 1.57 gm/cm ³	5.7×10^{-2}	19°-20° C.	Baranov and Novitskaya, 1949
".....	Air, 85.5% mois- ture	Mud, 1.02 gm/cm ³	2.2×10^{-2}	19°-20° C.	"
".....	Solid	Barium nitrate	8.0×10^{-20}	Not stated (room temperature)	Strassmann, quoted by Flüge and Zimens, 1939

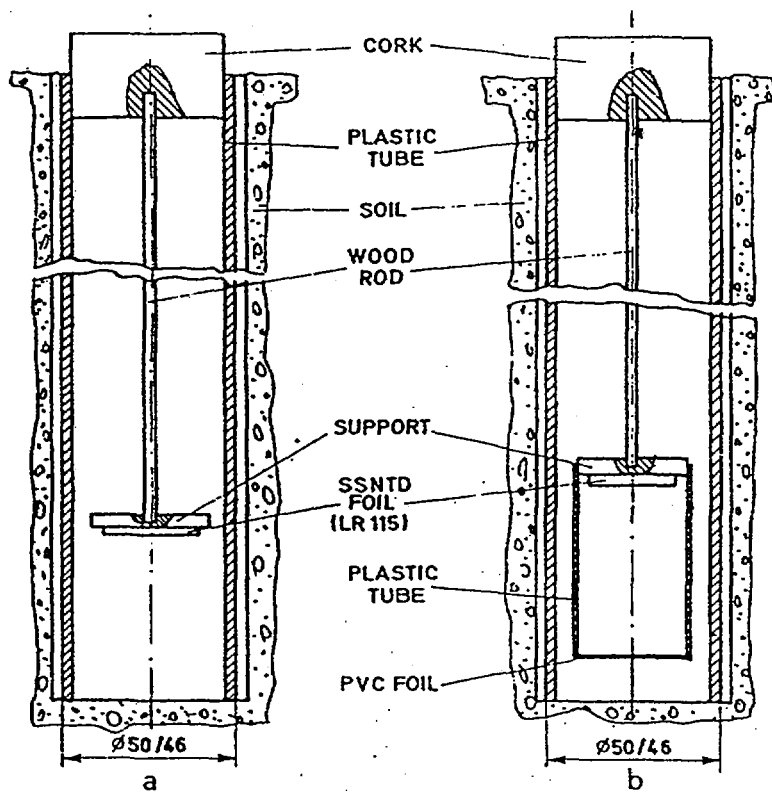
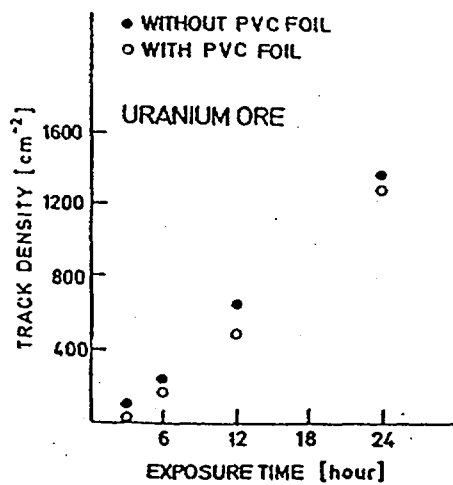
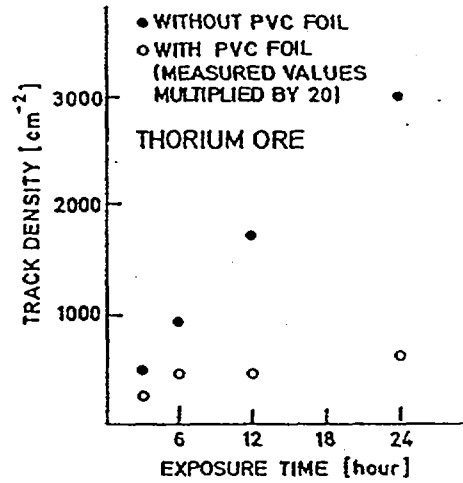


Figura 5. Diagrama esquemático de sondas de prueba. La figura b), muestra un arreglo - que utiliza una membrana de PVC.



a



b

Figura 6. La permeabilidad del Radón (²²²Rn) y Radón (²²⁰Rn) respectivamente, se muestra en las gráficas #a y #b, de acuerdo al arreglo de la figura 5 b.