

05.70.13
05.70.14
05.70.15

C.N.E.A. Biblioteca
AF. PUBLICACIONES
2 1970 ✓

SAN JUAN
República Argentina

aplicación de radioisótopos en hidrología

6º curso regional

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

05.70.13

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
REPUBLICA ARGENTINA

SELECCION DEL TRAZADOR RADIOACTIVO EN AGUAS SUBTERRANEAS
Y SUPERFICIALES

Héctor R. Gómez

APLICACION DE RADIOISOTOPOS EN HIDROLOGIA
6to CURSO REGIONAL

San Juan, 13 de octubre al 20 de noviembre de 1970

CONTENIDO

SECCION	PAG
1.0.0 INTRODUCCION	1
2.0.0 SELECCION DEL TRAZADOR RADIACTIVO	2
2.1.0 PROPIEDADES FISICO QUIMICAS DEL TRAZADOR EN EL MEDIO POR DONDE ESCURRE	2
2.1.1 Aguas subterráneas	2
2.1.2 Aguas superficiales	5
2.1.3 Pruebas de laboratorio o en campaña para comprobar el comporta- miento del trazador en el medio donde deberá escurrir	5
2.2.0 ESTABILIDAD Y SOLUBILIDAD DEL TRAZADOR EN EL AGUA ...	7
2.3.0 PERIODO DE SEMIDESINTEGRACION	7
2.4.0 POSIBILIDADES DE DETECCION Y MEDICION. RESPUESTA DEL DETECTOR EN MEDIO INFINITO, HOMOGENEO O ISOTROPICO ..	8
2.5.0 CONCENTRACIONES MINIMAS MEDIBLES (CMM) Y CONCENTRA- CIONES MINIMAS DETECTABLES (CMD)	15
2.6.0 COSTO Y DISPONIBILIDAD	16
2.7.0 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS TRAZADORES RADIACTIVOS	17

Nota: Ilustraciones y gráficos al final del texto.

1.0.0 INTRODUCCION

Los trazadores radiactivos e isotópicos son usados en hidrogeología en distintos medios: aguas superficiales, subterráneas, interrelación, sedimentología, etc.

Tratamos aquí de dar alguna información referente a la selección del trazador más apto para una determinada aplicación o investigación. Entre los cientos de radioisótopos e isótopos existentes sólo unos pocos son aptos o están disponibles para ser usados como trazadores del agua: la selección del más eficiente es fácil cuando se trata de un problema de aguas superficiales con límites de tiempo y espacio, más o menos predecibles; sin embargo, en aguas subterráneas, donde el medio suele ser ignorado o mal conocido, al igual que su dinámica, la rigurosidad y atención que debe darse a la etapa de selección es mucho mayor.

El presente resumen traduce, aproximadamente, sólo parte de las investigaciones o trabajos realizados para conocer el comportamiento de los trazadores en el ámbito fluvial, marítimo o subterráneo. Es por ello que aconsejamos a quien deba realizar una experiencia de larga o imprevisible duración en medios subterráneos desconocidos que, antes de contentarse con lo aquí desarrollado o intentar métodos de "ciegos" añada la investigación pre-experiencia con la ayuda de la abundante bibliografía disponible (sólo parte aquí expuesta) y el uso de aproximaciones empíricas que contribuyan a hacer más acertada la elección del método a emplear y el trazador.

Por otra parte el análisis de los nucleidos disponibles, sus propiedades y el comportamiento en el medio por donde escurrirá debe ser más exhaustivo si se buscan resultados cuantitativos o semicuantitativos en contraposición con las experiencias solamente cualitativas.

2.0.0 SELECCION DEL TRAZADOR RADIOACTIVO

2.1.0 PROPIEDADES FISICO QUIMICAS DEL TRAZADOR EN EL MEDIO POR DONDE ESCURRE

El trazador debe seguir fielmente el movimiento del agua sin precipitación, intercambio iónico, absorción física o química, precipitación química o coloidal. El trazador ideal es, luego, aquel que se identifica con el medio y responde a las mismas leyes hidrodinámicas.

Las severas condiciones a que es sometido el trazador en aguas subterráneas, derivadas de la "hostilidad" del medio hace que este punto adquiera prioridad en la selección del nucleído y la forma química en que se encuentra. En aguas superficiales -medición de caudales por ejemplo- el contacto del agua marcada con los sedimentos, rocas o sólidos en general es reducido; la selección resulta más fácil y la gama de trazadores aptos es mayor.

2.1.1 Aguas subterráneas

La pérdida de trazador por absorción, intercambio, etc. es proporcional al tiempo y superficie de contacto trazador-sedimentos; fijada luego la distancia que debe recorrer el trazador la velocidad del mismo en el acuífero será determinante del contacto antes mencionado. La velocidad es proporcional al gradiente hidráulico, permeabilidad y porosidad.

Las soluciones, sólidos o coloides que conforman los acuíferos o estratos permeables tienen capacidad para fijar o intercambiar (1) los iones presentes en el agua (trazador, por ejemplo); dos tipos extremos de intercambio ocurren, la mayoría de las veces simultáneamente: absorción física y/o absorción química.

En virtud de la primera, regida por las leyes de Van Der Waals, se establece una (generalmente débil) unión entre el absorbente y el absorbido que en muchos casos fija transitoriamente el trazador retardando sólo su tránsito e introduciendo errores por defecto en el cálculo de velocidad. La absorción química en cambio, es una unión de valencia, más energética, que se materializa en la superficie o el interior del absorbente; el anión, catión o forma no iónica usada como trazador se pierde cualquiera sea la levigación posterior o los cambios físico-químicos en el medio. La energía de unión es del orden de 0,5 Kcal por molécula absorbida en el caso de absorción física; en la absorción química, en cambio, la energía de unión es del orden de 20 - 30 Kcal/mol. (2).

La absorción física o química se verifica más intensamente en estratos que contienen arcillas, coloides, limos o sustancias orgánicas, (humus por ejemplo), minerales zeolíticos o minerales férricos, etc.

Las arcillas y las materias orgánicas dan origen a coloides electro negativos que fijan particularmente los cationes: quedan pues, ya excluidos en la primera selección de trazadores radiactivos aptos para recorrer largos trayectos en aguas subterráneas o permanecer largos lapsos en contacto con los acuíferos, los cationes.

Algunos aluminatos, en cambio, pueden formar coloides electro positivos y otros minerales dan origen a coloides anfóteros: cuando estos minerales abundan, el uso de aniones como trazadores puede resultar no aconsejable quedando reducidas las posibilidades de selección a forma no iónicas o trazadores naturales tales como el tritio. De acuerdo a la naturaleza de la arcilla, varía la capacidad de intercambio con los cationes; según la bibliografía antes mencionada (1) para distintos tipos de arcillas, el intercambio, expresado en miliequivalentes por 100 g estaría comprendido entre los siguientes valores:

Caolinita	3 - 15	mE/100 g
Halloysita, 2 H ₂ O	5 - 10	"
Halloysita, 4 H ₂ O	40 - 50	"
Montmorillonita	80 - 150	"
Illita	10 - 40	"
Vermiculita	100 - 150	"
Llorita	10 - 40	"

El grado de fijación de los cationes depende además de la valencia de los mismos: en términos generales podemos decir que los bivalentes son más fijados o bien la unión es más enérgica que en el caso de los monovalentes.

En aquellos lugares donde abundan las materias orgánicas, tales como los estratos que contienen humus, turba, etc. la capacidad de intercambio también es grande.

Los coloides electronegativos que abundan en las arcillas y compuestos húmicos superficiales o poco profundos tienen una capacidad de retención muy elevada: 200 a 400 miliequivalentes/100 gramos.

La fijación de iones marcados con los estratos depende sólo de la naturaleza de estos últimos y de las condiciones físico-químicas imperantes en el medio (temperatura, presión, precipitación, etc.). Juega también un importante papel la concentración del trazador en el agua.

Si un elemento abunda en el agua y se ha establecido un equilibrio geoquímico entre esta última y los terrenos podría usarse como trazador un radioisótopo de aquel elemento (²⁴Na ó ⁴⁵Ca por ejemplo, en aguas saturadas de sodio o calcio).

Los estratos compuestos por arena y gravas en general tienen baja capacidad de intercambio o absorción; lo mismo ocurre en los acuíferos calcáreos. En

estos casos los cationes no son siempre desechables.

Otros de los factores que influyen considerablemente en la retención del trazador es la porosidad. Fijado el recorrido del nucleído a mayor porosidad menor velocidad y por consiguiente menor tiempo de contacto o posibilidad de intercambio.

Independientemente del tiempo de contacto, se ha podido comprobar, por otra parte, que, en arcillas de igual composición química pero distinta granulometría, la retención del trazador practicamente no varía (3).

El intercambio de iones es además función de la concentración de éstos en el agua; la absorción relativa es, naturalmente, mayor cuando la solución es muy diluida. Por esta razón es conveniente adicionar a la solución marcada, una considerable cantidad de portador.

En virtud de la variada gama de sustancias disueltas que pueden contener las aguas podemos agregar que algunos trazadores radiactivos de mediocre rendimiento en acuíferos podrían eventualmente utilizarse en aguas:

- cloruradas sódicas: ^{32}P , ^{137}Cs , ^{24}Na ;
- alcalinas: ^{45}Ca , ^{59}Fe , ^{110}Ag , ^{82}Br , ^{131}I , ^{14}C ;
- sulfatadas cálcicas o carbonatadas: ^{51}Cr , ^{45}Ca , ^{35}S .

Como podemos apreciar el problema de selección en algunos casos se puede tornar complejo y puede ser preciso realizar un estudio previo de laboratorio y/o campaña para comprobar el comportamiento del soluto (trazador en determinada forma química) frente al absorbente y solvente (agua).

Por último digamos que el tritio es el único trazador que puede usarse sin prueba alguna ya que es parte constituyente del agua; por ello se usa frecuentemente para verificar el comportamiento de otros trazadores. Algunos autores opinan que la molécula HTO intercambia más que la molécula H_2O con el agua de constitución de los sedimentos o rocas (4). El error introducido por este mayor intercambio es despreciable a los fines prácticos.

En términos generales y haciendo un rápido resumen podemos decir que el comportamiento del:

^3H

es excelente en cualquier acuífero y con cualquier tipo de aguas (desmineralizadas subterráneas, superficiales o marinas).

^{35}S , ^{82}Br , ^{131}I , (^{60}Co , ^{58}Co , ^{51}Cr , ^{192}Ir y otros) como EDTA y

(^{60}Co , ^{58}Co) como $\text{K}_3\left[^{60}\text{Co}(\text{CN})_6\right]$

tienen en general elevado rendimiento o sea se fijan poco en cualquier tipo de estratos y con cualquier tipo de agua.

^{24}Na , ^{45}Ca , ^{45}C , ^{32}P , ^{110}Ag , ^{198}Au

en ciertos casos pueden tener aceptable rendimiento. En aguas superficiales y experiencias de poca duración pueden usarse.

2.1.2 Aguas superficiales

Todo lo expresado en el punto anterior es válido también en aguas superficiales; sin embargo aquí la severidad del medio frente al nucleído trazador es siempre inferior y la selección resulta más fácil.

Las experiencias son más cortas y el tiempo de contacto del trazador con los sedimentos en suspensión o en el fondo muy reducido.

Existen trabajos de medición de caudales en ríos en los que se ha utilizado cationes sin haber encontrado pérdidas apreciables. El ^{198}Au y el ^{24}Na por ejemplo.

2.1.3 Pruebas de laboratorio o en campaña para comprobar el comportamiento del trazador en el medio donde deberá escurrir.

Las conclusiones y resultados que se obtienen en experiencias de laboratorio deben ser manejadas con extrema precaución ya que los resultados pueden diferir considerablemente respecto a los reales (en el terreno) pues es muy difícil en un laboratorio someter el trazador a las condiciones físico-químicas e hidrodinámicas que imperan en los acuíferos o medios por donde debe escurrir el agua.

Por lo general, las pruebas de laboratorio pueden ser aceptadas para comparar o comprobar la "calidad" de dos o más trazadores frente a una determinada probeta, muestra de sedimento o estrato representativos del medio por donde escurrirá el trazador en el terreno. Tienen luego sólo valor relativo.

En nuestros laboratorios disponemos de dispositivos para hacer percolar agua marcada por columnas o muestras de distinto tipo de sedimentos. La figura 1 muestra el esquema de estas instalaciones que en términos generales se asemejan a los denominados permeámetros de carga fija.

El trazador radiactivo o los trazadores que simultáneamente pueden introducirse o inyectarse a la entrada de la columna o muestra a analizar permite comprobar la pérdida del nucleído al atravesar esa columna. Esta pérdida se obtiene midiendo la concentración del trazador antes de la inyección y la concentración del mismo en el agua de elución.

$$A_p (\mu\text{C}) = A_i (\mu\text{C}) - A_r (\mu\text{C})$$

$$A_p (\mu\text{C}) = C_i \left(\frac{\mu\text{C}}{\text{ml}} \right) \cdot V_i (\text{ml}) - C_r \left(\frac{\mu\text{C}}{\text{ml}} \right) \cdot V_r (\text{ml})$$

$$A_p \left(\frac{\text{ctas}}{\text{min}} \right) = C'_i \left(\frac{\text{ctas}}{\text{min ml}} \right) V_i (\text{ml}) - C'_r \left(\frac{\text{ctas}}{\text{min ml}} \right) V_r (\text{ml})$$

$A_p, A_i, A_r (\mu\text{C})$: actividad perdida, inyectada y recuperada;

$C_i, C_r \left(\frac{\mu\text{C}}{\text{ml}} \right)$: concentración inyectada y recuperada;

$C'_i, C'_r (\text{ctas}/\text{min ml})$: concentración medida, inyectada y recuperada;

$V_i, V_r (\text{ml})$: volumen perdido y recuperado.

Cuando la medición de dos concentraciones o actividades difieren en dos, tres o cuatro órdenes de magnitud es necesario tomar una alícuota de la concentración que se inyecta en el circuito hídrico y esto obliga a fraccionar y diluir esa alícuota hasta obtener una concentración o actividad compatible con el orden de magnitud de la concentración o actividad de elución.

Las mediciones de A_i y A_r deben realizarse con idéntica geometría.

La inyección del trazador la realizamos cuando el sistema está en funcionamiento y se ha establecido que el caudal de salida es constante; es decir cuando toda la columna o muestra del acuífero esta completamente saturada.

Suele quedar la duda respecto al momento en que debe detenerse la experiencia: para ello es conveniente intercalar entre la columna y el recipiente donde se recupera el agua marcada un detector colimado y blindado (fig. 1).

Cuando la curva de elución recupera el nivel de actividad que se medía antes de inyectar el trazador se detiene la experiencia. Esta curva $e = f(t)$ permite obtener datos sobre el comportamiento del trazador. Las experiencias se realizan inyectando el trazador en forma continua o instantánea

La eficiencia de marcación en laboratorios se suele realizar también poniendo en íntimo contacto una masa determinada de terreno con el trazador disuelto en agua. Midiendo las concentraciones antes y después de la experiencia se pueden también obtener referencias sobre el comportamiento del trazador.

Las experiencias en campaña sin embargo aportan resultados más confiables. El método denominado "single well pulse technique" (5) (6) (7) consiste en inyectar un volumen conocido de agua marcada en el acuífero y después recuperarlo, bombeando el agua nuevamente hacia la superficie. La medición de la actividad específica inyectada y recuperada permiten conocer el porcentaje de trazador perdido.

La fig. 3 permite apreciar el comportamiento del ^{30}Co [$\text{K}_3(\text{CN})_6$] frente al Cl (considerado como un trazador excelente) y también a un colorante. En esta experiencia se inyectaron 25.000 m^3 de agua marcada y como puede apreciarse cuando el volumen de agua recuperada por bombeo es tres veces superior (9) (10) al inyectado, prácticamente se ha recuperado todo el trazador.

En la fig. 2 se puede apreciar el excelente comportamiento del ^{51}Cr (EDTA) en acuíferos de origen glacio-fluvial (12). Aquí la técnica empleada consistió en inyectar en un pozo agua marcada con ^3H y ^{51}Cr (EDTA). Desde otros pozos situados a 25 m y 11 m del anterior se extrajeron periódicamente muestras y se compararon las actividades relativas de ^3H y ^{51}Cr . El comportamiento de este último, como puede apreciarse es excelente ya que las curvas ^3H y ^{51}Cr prácticamente coinciden.

2.2.0 ESTABILIDAD Y SOLUBILIDAD DEL TRAZADOR EN EL AGUA

Todos los radioisótopos que están indicados en la Tabla I son muy estables con aguas de distinta composición química y la solubilidad de los compuestos mencionados es elevada. Una excepción en los ya mencionados los constituye el ^{198}Au como cloruro, en cambio al estado coloidal la estabilidad es mayor.

2.3.0 PERIODO DE SEMIDESINTEGRACION

El período de semidesintegración debe ser compatible con el lapso que media entre la producción del radioisótopo y la finalización de la experiencia en campaña. En ese período es preciso tener en cuenta el tiempo que demandan las siguientes operaciones: Irradiación, fraccionamiento, diluciones, marcación, transporte al lugar donde se realiza la experiencia y lapso previsible que durará la misma. Este último valor no siempre es posible de calcular en aguas subterráneas y sólo groseras estimaciones son posibles cuando no se cuenta con referencias hidrodinámicas del acuífero.

Según puede apreciarse en la Tabla II cuando el lapso transcurrido entre la calibración y la medición es superior a 5 ó 6 períodos de semidesintegración la actividad residual sólo alcanza al 3,12 % y 1,56 % de la actividad inicial, siendo por lo tanto, ya difícil detectar el trazador si la dilución de las muestras o la dilución en el punto de detección en el terreno es grande.

Cuando se realizan experiencias con trazadores radiactivos en aguas subterráneas es preciso conocer por lo menos el orden de magnitud del lapso que

media entre la inyección y la detección del trazador radiactivo con el fin de seleccionar este último en base a su período de semidesintegración. En base a las conocidas fórmulas de D'Allen Hazen, Zunker, etc. se calcula la permeabilidad K del medio y de esta manera se puede tener una idea aproximada del tiempo de tránsito del trazador entre dos puntos. De acuerdo a la expresión de Darcy:

$$v_1 = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{K}{m_e} \frac{dh}{dl}$$

Se despeja Δt y los parámetros distancia (Δl) porosidad efectiva (m_e) y gradiente hidráulico dh/dl son estimados generalmente en base a mediciones simples y expeditivas (13).

2.4.0 POSIBILIDADES DE DETECCION Y MEDICION. RESPUESTA DEL DETECTOR EN MEDIO INFINITO, HOMOGENEO O ISOTROPICO

La detección de los trazadores radiactivos en Hidrología se suele realizar sumergiendo, total o parcialmente, el detector en un medio homogéneo e isotrópico (agua, por ejemplo) marcado uniformemente (al menos en un instante) con una solución radiactiva. Cuando la naturaleza y/o energía (partículas α y partículas β de baja energía, por ej. ^3H , ^{14}C , y ^{35}S) no lo permite es preciso extraer muestra periódica del sistema hidrodinámico marcado midiendo luego la concentración en laboratorio o en las inmediaciones del lugar de extracción. En la fig. 4 están expuestas las características principales de los radioisótopos de uso frecuente en Hidrología.

Los emisores de radiación α prácticamente no se usan; sin embargo en algunos casos puede intentarse su medición utilizando pantallas radiográficas o emulsiones nucleares para detectar su presencia "in situ" (14) (15).

Los emisores de radiación β puros (^3H , ^{14}C y ^{35}S), de baja energía, sólo pueden ser medidos con instrumental y técnicas especiales. El ^{32}P , en cambio, puede ser detectado y medido con instrumental portable y de bajo costo en las inmediaciones del lugar de trabajo. Como podemos apreciar en la fig. 4 este nucleído emite radiaciones β de energía que supera el umbral de 1,5 Mev sobre el que se puede pensar en detectar la radiación secundaria de frenamiento; radiación que, por su naturaleza, atraviesa espesores considerables y a partir de la cual podría intentarse la medición "in situ". Sin embargo, el grado de producción de radiación de frenamiento aumenta con el número atómico del material interpuesto y con la energía del electrón, siempre que esta última sea superior a 1,5 Mev. En el caso del ^{32}P debemos recordar que, a pesar de superar ese umbral,

en el medio "agua", "agua-roca", "agua-sedimento", etc. no existen, en elevada proporción al menos, elementos de alto Z; por esta razón la producción de rayos X es muy reducida.

Los emisores gamma, en cambio, son detectables y medibles en el lugar y al seleccionar el nucleído es preciso tener en cuenta la eficiencia con que pueden ser medidos, la concentración mínima detectable (CMD) y la concentración mínima medible (CMM). En una palabra, esto implica calcular la función de transferencia para un determinado nucleído, la que depende de:

- naturaleza de la radiación (α , β ó γ), actividad o concentración, energía y porcentaje de partículas o fotones por desintegración.
- eficiencia del detector (función también de la energía) y del sistema electrónico asociado.
- geometría fuente radiactiva-detector.

La respuesta del detector y sistema electrónico asociado (en impulsos/min. por ejemplo) será función de todas estas variables. En el caso más simple de detector sumergido en un volumen de agua igual o superior al volumen sensible de detección trataremos de hacer un análisis racional, al menos aproximado, de la función de transferencia o eficiencia, que es doble esperar. Para casos más complejos de detector colocado en las inmediaciones de interfases (por ej. detector en una perforación; detector en agua sobre sedimentos de fondo marcados, etc.) el análisis resulta, a veces, imposible de encarar y es preciso experimentar simulando mediciones y "geometrías" afines con las reales.

Supongamos que en el medio infinito, homogéneo e isotrópico de densidad ρ (g/cm^3), marcado uniformemente ($c = \text{cte}$) con un trazador radiactivo, emisor gamma de energía $h\nu$ (MeV) ocurren n (des/g seg) eventos primarios (16) (17) (18).

La energía disipada por unidad de volumen puede ser expresada (fig. 5):

$$n \left(\frac{\text{des}}{\text{g seg}} \right) \cdot h\nu \left(\frac{\text{MeV}}{\text{des}} \right) \rho_1 \cdot \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = n \cdot h\nu \cdot \rho_1 \cdot \left(\frac{\text{MeV}}{\text{cm}^3 \text{ seg}} \right) \quad (1)$$

y la intensidad de radiación primaria emitida por el elemento de volumen ds dx será:

$$n \cdot h\nu \cdot \rho_1 \cdot ds \cdot dx \cdot \frac{\text{MeV}}{\text{seg}}$$

y la que llega al centro de la esfera atenuada:

$$d \phi_{\text{primaria}} = n h \nu \rho_1 d\Omega dx \frac{1}{4 \pi x^2} e^{-\mu_{01} x} \left(\frac{\text{Mev}}{\text{cm}^2 \text{ seg}} \right)$$

$$\int_0^{4\pi} d\Omega = 4 \pi x^2$$

$$d \phi_{\text{primaria}} = n h \nu \rho_1 \frac{4 \pi x^2}{4 \pi x^2} e^{-\mu_{01} x} dx \frac{\text{Mev}}{\text{cm}^2 \text{ seg}} \quad (2)$$

μ_{01} : coeficiente de atenuación total para el medio (agua, por ej.) y la energía $h\nu$ (cm^{-1})

x : distancia o radio de la esfera (cm).

Se denomina dosis en la unidad de tiempo a la energía absorbida por la unidad de masa del medio en la unidad de tiempo; se expresa generalmente en unidades de Rad/seg ó Mev/g seg.

También podríamos decir que es la energía cedida al medio por unidad de masa y tiempo.

$$\dot{D}_{\text{primaria}} = \phi_{\text{primaria}} \frac{\mu_{a2}}{2} \quad (3)$$

μ_{a2} : coeficiente de absorción del medio 2 (detector, por ej.) (cm^{-1})

ρ_2 : densidad del medio 2 (g/cm^3)

μ_{02} : coeficiente de atenuación total del medio 2 (cm^{-1})

μ_{s2} : coeficiente de dispersión del medio 2 (cm^{-1})

$$\mu_{02} = \mu_{a2} + \mu_{s2}$$

Reemplazando (3) en (2) e integrando entre 0 y X o sea la esfera de radio igual o mayor que el "volumen sensible de detección" en el medio 1 nos queda:

$$d \dot{D}_{\text{primaria}} = n h \nu \rho_1 \frac{\mu_{a2}}{\rho_2} e^{-\mu_{01} x} dx \left(\frac{\text{Mev}}{\text{cm}^2 \text{ seg}} \right) \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right)$$

$$d \dot{D}_{\text{primaria}} = n h \nu \rho_1 \frac{\mu_{a2}}{\rho_2} e^{-\mu_{01} x} dx \left(\frac{\text{Mev}}{\text{g seg}} \right) \quad (4)$$

$$\dot{D}_{\text{primaria}} = n \, h\nu \, \rho_1 \frac{\mu_{a2}}{\rho_2} \int_0^X e^{-\mu_{01} x} dx$$

$$\dot{D}_{\text{primaria}} = n \, h\nu \, \frac{\rho_1}{\mu_{01}} \frac{\mu_{a2}}{\rho_2} (1 - e^{-\mu_{01} X})$$

$$\dot{D}_{\text{primaria}} = n \, h\nu \, \frac{\mu_{a2}/\rho_2}{\mu_{01}/\rho_1} (1 - e^{-\mu_{01} X}) \left(\frac{\text{Mev}}{\text{g} \cdot \text{seg}} \right) \quad (5)$$

Para expresar la dosis por unidad de tiempo y masa en unidades de Rad/seg, de más frecuente uso:

$$1 \text{ rad} = 100 \frac{\text{ergios}}{\text{g}} \text{ en cualquier medio}$$

$$1 \text{ Mev} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ ergios}$$

$$\frac{1 \text{ Mev}}{\text{g seg}} = 1,6 \cdot 10^{-8} \frac{\text{erg}}{\text{g seg}} \frac{1}{100} \frac{\text{rad}}{\text{seg}} = 1,6 \times 10^{-8} \left(\frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right) \quad (3)$$

Reemplazando (3) en (5)

$$\dot{D}_{\text{primaria}} = n \, h\nu \, \frac{\mu_{a2}/\rho_2}{\mu_{01}/\rho_1} (1 - e^{-\mu_{01} X}) 1,6 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right) \quad (7)$$

En la fig. 6 se ha representado la función $(1 - e^{-\mu_{01} X})$; como podemos apreciar para valores de $\mu_{01} X > 7$ la dosis absorbida en el centro de una esfera o medio homogéneo e isotrópico prácticamente no aumentará si se incrementa el volumen del medio ($c = \text{cte}$). Es decir con $\mu_{01} X > 7$ la dosis es mayor que el 99% de la dosis con $\mu_{01} X = \infty$ a igual concentración del nucleído.

El espesor de semirreducción o semiespesor está dado por

$$x_{1/2} = \frac{0,693}{\mu_{01}}$$

y el espesor promedio (mean free path) se suele expresar por:

$$x'_{1/2} = \frac{1}{\mu_{01}} \quad (\text{cm}) \quad (9)$$

El primero ($x_{1/2}$) equivale a un espesor de material capaz de reducir la

intensidad de la radiación primaria al 50% de la intensidad original mientras que el segundo ($x'_{1/2}$) lo reduce aproximadamente al 37%.

Se deduce a partir de (7) que con un recipiente de radio igual a $7 x'_{1/2}$ se puede calibrar cualquier detector (de volumen reducido) y obtener una respuesta igual a la que se obtendría en un recipiente de radio mayor si la concentración del trazador en ambos casos es igual.

Por otra parte para $x'_{1/2} = 3$ la señal se reduciría al 95% de la señal a volumen infinito. Estas consideraciones son válidas para:

- fuente de radiación puntual-detector o absorbente de reducida dimensión en medio homogéneo e isotrópico;
- fuente de radiación uniformemente distribuida en medio homogéneo e isotrópico-detector o absorbente de reducidas dimensiones.

En la Tabla III están expuestos los valores de $x_{1/2}$ y $x'_{1/2}$ en agua y agua-roca (valores estimados) en función de la energía del nucleído. En la fig. 4 por otra parte se expresan estos mismos valores ($x_{1/2}$ y $x'_{1/2}$) para los nucleídos de uso frecuente en hidrología. Los hemos calculado ya que para los casos de nucleídos de esquemas de desintegración compleja (^{131}I , ^{82}Br , etc.) no es posible tomar una energía promedio y acudir a la Tabla antes mencionada.

La dosis por unidad de tiempo debida a la radiación primaria ($\dot{D}_{\text{primaria}}$) en los casos de esquemas complejos puede ser calculada a partir de:

$$\dot{D}_{\text{primaria}} = 1,6 \cdot 10^{-8} n \sum_i p_i (h\nu)_i \frac{\mu_{a2}/\rho^2_{1i}}{\mu_{c1}/\rho^2_{2i}} \cdot (1 - e^{-\mu_{01} X}) \frac{\text{Rad}}{\text{seg}} \quad (10)$$

p_i : porcentaje de fotones por desintegración de energía $(h\nu)_i$

$(h\nu)_i$: energía del fotón (Mev).

Conviene aquí recordar que el número de eventos n expuestos en (10) están referidos a la unidad de masa del medio (g) de acuerdo a lo expuesto en (1), razón por la que en caso de usarse la unidad (desintegraciones/segundo ó curie), ambas han de ser, también, referidas a la unidad de masa.

Para obtener la dosis por unidad de tiempo total \dot{D}_{total} resta considerar la fracción de energía absorbida debida a la radiación secundaria. Evans *et al.* (13) suponiendo lineal la relación

$$B = a_1 \mu_{01} X$$

B : factor de multiplicación ("Build up")

a_1 : constante.

Llega a la siguiente expresión para relacionar las dosis por unidad de tiempo primarias ($\dot{D}_{\text{primarias}}$) y secundarias ($\dot{D}_{\text{secundarias}}$)

$$d \dot{D}_{\text{secundaria}} \approx \frac{\sigma_{sl}}{\mu_{01}} (\mu_{01} x) d \dot{D}_{\text{primaria}} \quad (11)$$

Reemplazando (11) en (7)

$$d \dot{D}_{\text{secundaria}} = \frac{\sigma_{sl}}{\mu_{01}} (\mu_{01} x) n \text{ hv} \rho_1 \frac{\mu_{a2}}{\rho_2} e^{-\mu_{01} x} dx$$

$$\dot{D}_{\text{secundaria}} = \int d \dot{D}_{\text{secundaria}} = n \text{ hv} \rho_1 \frac{\mu_{a2}}{\rho_2} \frac{\sigma_{sl}}{\mu_{01}} \int_0^X x e^{-\mu_{01} x} dx$$

$$\dot{D}_{\text{secundaria}} = n \text{ hv} \frac{\mu_{a2}/\rho_2}{\mu_{a1}/\rho_1} \frac{\sigma_{sl}}{\mu_{01}} \left[1 - e^{-\mu_{01} x} (1 + \mu_{01} x) \right] \quad (12)$$

En la fig. 6 está graficada la función

$$\left[1 - e^{-\mu_{01} x} (1 + \mu_{01} x) \right]$$

y podemos apreciar aquí también que para $\mu_{01} x \geq 7$ ($7 x'_{1/2}$ ó más) la misma es constante o sea que, en este caso también la energía absorbida en el centro de la esfera es superior al 99% de la energía que se absorberá con volumen infinito.

La respuesta de un detector colocado en el centro de un medio homogéneo e isotrópico, marcado uniformemente con un trazador radiactivo será proporcional a la dosis total por unidad de tiempo que recibe la unidad detectora.

$$\text{Señal} \left(\frac{\text{pulsos}}{\text{seg}} \right) = k \left(\frac{\text{pulsos}}{\text{rad}} \right) \dot{D}_{\text{total}} \left(\frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right) \quad k = \text{cte}$$

Sin embargo, no siempre es exactamente proporcional la señal de salida con la dosis total ya que la eficiencia de algunos detectores varía con la energía de las partículas absorbidas. fig. 7

La amplitud del pulso de salida de un detector tipo G.M. es aproximadamente independiente de la energía (sólo varía con las dimensiones del tubo G.M.) fig. 7 c)

En cambio si el detector es un cristal de centelleo la función $\xi = f(h\nu)$ toma la forma de la curva de la fig. 7 d)

En hidrología superficial y subterránea al igual que en sedimentología los detectores tipo G.M. suelen ser seleccionados en virtud de los siguientes ventajas:

- es posible construir tubos en una gran variedad de tamaños y formas, aptos para operar en las condiciones y medios "agresivos" que generalmente imperan en este tipo de experiencias de campaña. Resisten los golpes mejor que cualquier otro tipo de detector.

- el costo es reducido. Como la altura del pulso de salida depende principalmente de las dimensiones del tubo no se requiere mucha amplificación antes del contaje, razón por la cual se reduce también el costo del instrumental asociado.

Surge de esta apreciación una limitación: como la amplitud del pulso de salida es independiente de la energía de la radiación, no se puede, en las etapas siguientes, discriminar energías e identificar si es preciso, la radiación que proviene de, por ejemplo, dos fuentes de radiación de distinto espectro.

- es posible construir sondas con varios tubos que operen simultáneamente, por grupos separados o individualmente.

- la señal de salida es prácticamente independiente de la temperatura en un amplio rango. Los cristales de INa (Tl) son recomendables, en cambio, cuando se requiere mayor eficiencia de detección. El costo del detector y del circuito asociado es mayor, son más sensibles a los cambios de temperatura y las sondas equipadas con este detector son además, más frágiles para operar en campañ.

2.5.0 CONCENTRACIONES MINIMAS MEDIBLES (CMM) Y CONCENTRACIONES MINIMAS DETECTABLES (CMD)

De acuerdo a lo expuesto en el punto anterior la dosis por unidad de tiempo (\dot{D}) recibida por el detector nos permite predecir, al menos en forma aproximada, la sensibilidad de medición o respuesta del detector sumergido en una masa homogénea e isotrópica marcada uniformemente con un radioisótopo.

Simplificando la expresión (10) y suponiendo que el medio marcado tenga un volumen mayor o igual al "volumen sensible de detección", es decir, que la energía absorbida por unidad de masa sea igual a la energía emitida por unidad de masa, tendremos, al no tener en cuenta la radiación secundaria:

$$\dot{D} = 1,6 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{Rad g}}{\text{Mev}} \right) n \left(\frac{\text{des}}{\text{seg g}} \right) \sum_i p_i \left(\frac{\text{fot}}{\text{des}} \right) h \nu_i \left(\frac{\text{Mev}}{\text{fot}} \right) \left(\frac{\mu_{a2}/\rho_2}{\mu_{a1}/\rho_1} \right)_i \left(\frac{\text{cm}^2/\text{g}}{\text{cm}^2/\text{g}} \right)$$

Conocida la respuesta de un detector en el medio marcado con el trazador I podrá ser calculada la respuesta del mismo detector en el mismo medio marcado con el trazador II; por ejemplo, suponiendo que la eficiencia de detección para energías distintas es la misma ($K_1 = K_2$) o bien haciendo la corrección respectiva tendremos:

$$\frac{[\dot{D}]_I}{[\dot{D}]_{II}} = \frac{\left[1,6 \cdot 10^{-8} n \sum p_i h \nu_i \left(\frac{\mu_{a2}/\rho_2}{\mu_{a1}/\rho_1} \right) \right]_I}{\left[1,6 \cdot 10^{-8} n \sum p_i h \nu_i \left(\frac{\mu_{a2}/\rho_2}{\mu_{a1}/\rho_1} \right) \right]_{II}} =$$

$$= \frac{\text{Señal detector en medio marcado con trazador I}}{\text{Señal detector en medio marcado con trazador II}}$$

Es frecuente el uso de las expresiones que damos a continuación, basadas en el conocimiento de la eficiencia de detección F para un determinado detector y nucleido, con el fin de determinar las concentraciones mínimas detectables (CMD) y medibles (CMM) en base a criterios de índole práctica. En realidad es aconsejable triplicar o cuadruplicar estos valores si se quieren obtener valores más acordes con las condiciones que realmente imperan en la práctica:

$$\text{CMD } (\mu\text{c/m}^3) = \frac{2,8}{F} \sqrt{\frac{n_F}{t}} \quad \text{para } \frac{\sigma_n}{n} = 0,5$$

$$\text{CMM } (\mu\text{c/m}^3) = \frac{14}{F} \sqrt{\frac{n_F}{t}} \quad \text{para } \frac{\sigma_n}{n} = 0,1$$

F : factor de calibración $\left(\frac{\text{ctas/seg}}{\mu\text{c/m}^3} \right)$; n_F : conteo del fondo natural (ctas/seg).

La discusión de estos criterios puede encontrarse en la bibliografía (5)(20).

2.6.6 COSTO Y DISPONIBILIDAD

De acuerdo a la expresión general de activación:

$$A = F \sigma N (1 - e^{-0,693 t_i/T_{1/2}}) e^{-0,693 \phi/T_{1/2}}$$

El costo de un radioisótopo por unidad de actividad (A) depende del tiempo (t_i) de irradiación en el reactor nuclear el que es función de la sección eficaz (σ), del número de átomos presentes en el nucleido original (N) y del flujo (F) de irradiación.

El costo parcial de los compuestos y procesamiento pre-irradiación de la mayoría de los trazadores que se usan en hidrología es muy reducido; Sin embargo, inciden en el precio final, además de los items antes mencionados, el procesamiento pos - irradiación (inevitable sólo en algunos casos), el fraccionamiento calibración, transporte, etc.

El costo actual de irradiación en los reactores RA1 y RA3 de la CNEA es el siguiente:

Primera semana (hasta 48 horas útiles) \$ 28.- (pesos ley 18.188)
Por semana adicional (de 48 horas útiles) \$ 11,20 (pesos ley 18.188)

En la fig. 4 se informa sobre las actividades producidas por un flujo de 10^{12} m/cm²/seg.

El transporte aereo de emisores gamma de alta energía (⁶⁰Co, ²⁴Na, ⁸²Br, etc) resulta en general oneroso y en algunos casos llega a sobrepasar el costo de origen del nucleido. La CNEA produce la mayoría de los radioisótopos de uso frecuente en hidrología particularmente aquellos de períodos de semidesintegración cortos e medianos.

Hasta el presente, la mayor demanda de radioisótopos, al menos en lo que respecta al número de pedidos, proviene de los centros de investigación, diagnósticos y terapia médica, razón por la cual la mayoría de los nucleidos son procesados bajo severos controles farmacológicos (separación, purificación, etc.) que pueden evitarse cuando el destino final es el uso como trazadores en aguas superficiales o subterráneas. Valgan estas consideraciones para que, en ciertos casos, el usuario de prioridad a los costos de irradiación y se contemple la posibilidad de usar el radioisótopo tal como sale de nuestros reactores, realizando, si es preciso el fraccionamiento o agregado de portador, previo el uso en campaña, en las inmediaciones del lugar de inyección.

2.7.0 VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS TRAZADORES RADIACTIVOS

La mayoría de los radioisótopos artificiales que se usan en hidrología son emisores de radiación gamma y por lo tanto la presencia de los mismos en el agua puede ser detectada y medida en forma continua, con o sin contacto directo con el medio marcado. Otros radioisótopos, en cambio, en virtud de las limitaciones impuestas por la naturaleza de la radiación y/o la energía sólo son detectables por muestreo.

La alta sensibilidad con que pueden ser medidos los trazadores radiactivos y la posibilidad de medirlos "in situ" constituyen las principales ventajas y generalmente las razones que determinan su opción frente a los trazadores convencionales.

Las tablas V y VI referidas a los trazadores fluorescentes y salinos (19) permiten apreciar la sensibilidad relativa de detección. Los primeros pueden ser detectados y medidos en el lugar sólo cuando las condiciones son óptimas. La retención de los trazadores fluorescentes en aguas subterráneas, donde las condiciones son en general críticas, es elevada; sólo la rodamina en algunos casos puede ser utilizada en cortos trayectos o bien en experiencias concretadas en lapsos poco prolongados.

Los trazadores convencionales, y particularmente aquellos que contienen Cl son en cambio poco retenidos por los suelos pero la baja sensibilidad de detección que obliga en general a poner en juego elevadas masas de soluciones salinas los hace poco recomendables en aguas subterráneas; por otra parte sólo se pueden medir extrayendo muestras (medición discontinua).

En cambio, con radioisótopos las masas de trazadores puestas en juego son muy reducidas, por esta razón, para disminuir la retención o pérdida se agrega generalmente portador inactivo. Esta operación puede realizarse en las inmediaciones del lugar donde se realiza la experiencia, razón por la cual queda en general facilitado su transporte y manipulación.

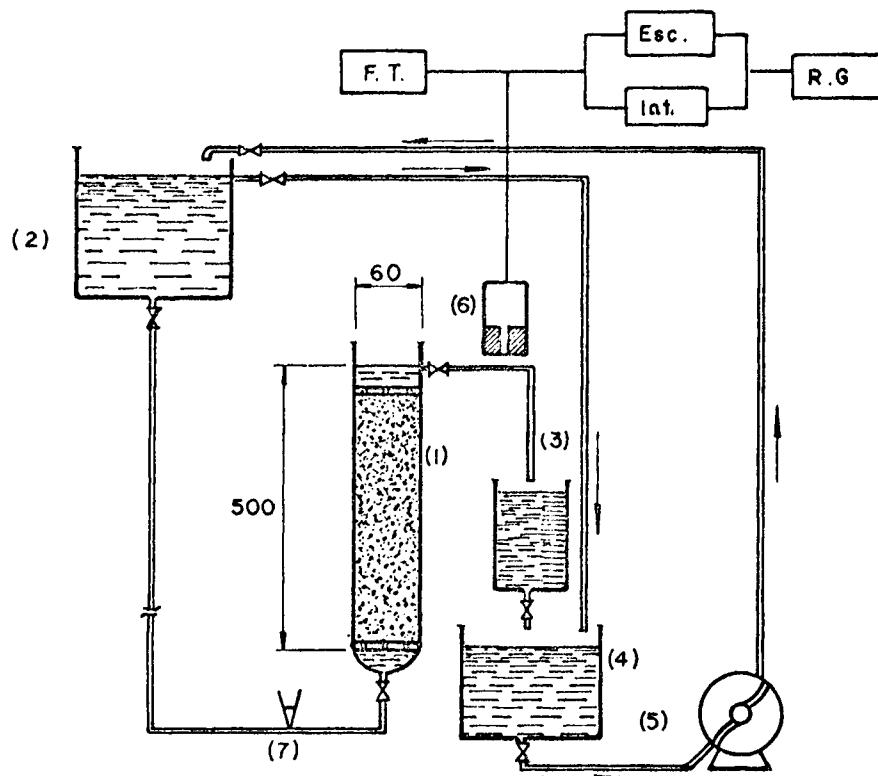
El blindaje necesario en caso de emisores gamma de elevada energía (^{24}Na , ^{82}Br , ^{60}Co) es sin duda una limitación frente a las ventajas mencionadas.

Por último debemos agregar las restricciones que imponen las normas de seguridad al uso de nucleidos de períodos de semidesintegración largo o bien las limitaciones derivadas de las concentraciones máximas permisibles en aguas que, concebiblemente, pudiesen llegar a centros de consumo.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Schoellier, H. Les Eaux. Souterraines; Masson y Cía. (1962)
- 2.- Molinari, J. Les traceurs isotopiques en hidrologie. Annales des Mines. Oct. 1969.
- 3.- Lallemand, A., Grison, G. Contribution a la selection de traceurs radio-actifs pour la hidrologie. IAEA - SM. 129/52.
- 4.- Kaufman, W.J., Oriob, G. Measuring ground water movement with radioactive and chemical tracers. J. Am. Water Works Assoc, 48, 5, may 1956.
- 5.- Hours, R. Appl. de la rad a l'hidraulique souterraine DC/R/AR/60-12 RH/GM CEA.
- 6.- Halevy, E., Nir, A. Use of rad. in studies of ground water flow. Sec. UN Int. Conf. on The Peaceful Uses of AE. Geneve (1958)
- 7.- Halevy, E. Nir, A. Use of rad. in studies ground water flow. Water planning for Israel Ltd. Publ. No. 32, T. Aviv. April (1960).
- 8.- Feely, Walton et al. The potencial appl. of rad. techn. to water resources invest. and utilization. NYO 9040. AEC Research and Dev. Isotopes Inc. (1961).
- 9.- Sternan, R., Nir, A. et al. Rad tracers in large scale recharge studies of groundwater. Isotopes in hydrology. Proc. of a Symposium. Vienna, (1966).
- 10.- Ellis, W.R. et al. The use of rad. tracers (^{131}I) in the inv. of a power station cooling pond. AEEC/E8 Sydney, sept. 1958.
- 11.- Lallemand, Grison, G. Contribution a la selection de traceurs radio-actifs pour la hidrologie. IAEA-SM 129/52.
- 12.- Knutsson, G., Junggren, K.L. et al. Field and laboratory test. of. Cr-51 EDTA and T water. Proc. of a Symposium Tokyo 5-9 novel, 1963.
- 13.- Gómez, H. "Determinación de filtraciones y permeabilidad en un embalse de tierra" Embalse Sumampa-Prov. Catamarca. publicación interna EN-15/32, CNEA, Buenos Aires, (1970)
- 14.- Hazaa, I.B., Single well. Technique for determination of the direction and velocity of underground water flow using ^{32}P .

15. - Gómez, H. "Radiografía industrial con radioisótopos" Reseña teórico práctica, publicación interna EN-6/13, CNEA, Buenos Aires, feb. 1969.
13. - Evans, R. The atomic Nucleus. No. Graw Hill book Comp. Inc.
17. - Castagnet, A.C., Lorenzetti, J.R., Gillen R. "Telemedición digital, por atenuación gamma, del nivel y densidad de líquidos almacenados en tanques" publicación interna EN-7/14, CNEA, Buenos Aires, marzo 1969.
18. - Dosimetría de las radiaciones ionizantes. CNEA (Arg.) Curso de Metodología y Aplicación de Radioisótopos.
19. - Molinari, J. Les traceurs salins et fluorescentes en hidrologie DR/SAR G/69-15/JM/MCT.
20. - Hours, R. Kaufman, W.J. Low level tritium measurement with the liquid scintillation spectrometer. F. Rep. No. 1 oct. 1, 1959. Sanit Eng. Res. Lab Univ. of Calif. Berkely.



- (1) Columna con filtros y sedimentos
- (2) Recipiente de volumen constante
- (3) Recuperación del volumen de elución para medir Q
- (4) Recipiente de almacenaje
- (5) Motobomba
- (6) Detección del trazador radiactivo para determinar $c = f(t)$
- (7) Inyección del trazador radiactivo

Fig. 1 Dispositivos y circuitos hídricos para medir retención de trazadores en columnas de sedimentos o rocas.

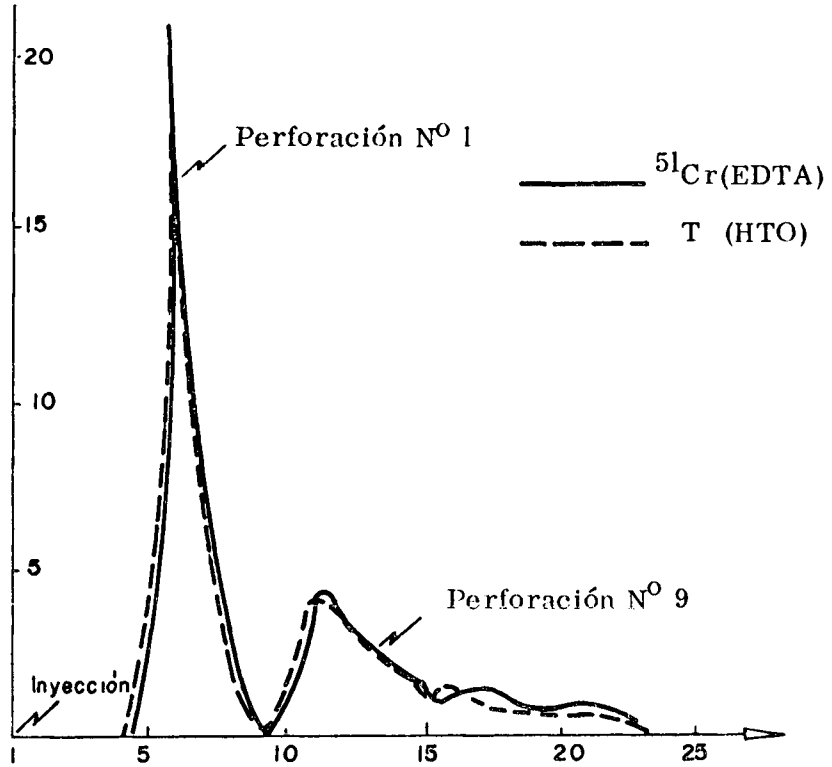


Fig. 2 - Comportamiento del $^{51}\text{Cr}(\text{EDTA})$ en acuíferos de origen glacio-fluvial. Distancia inyección-detección 2,5 m para la perforación N° 1 y 11 m para la perforación N° 9 (12)

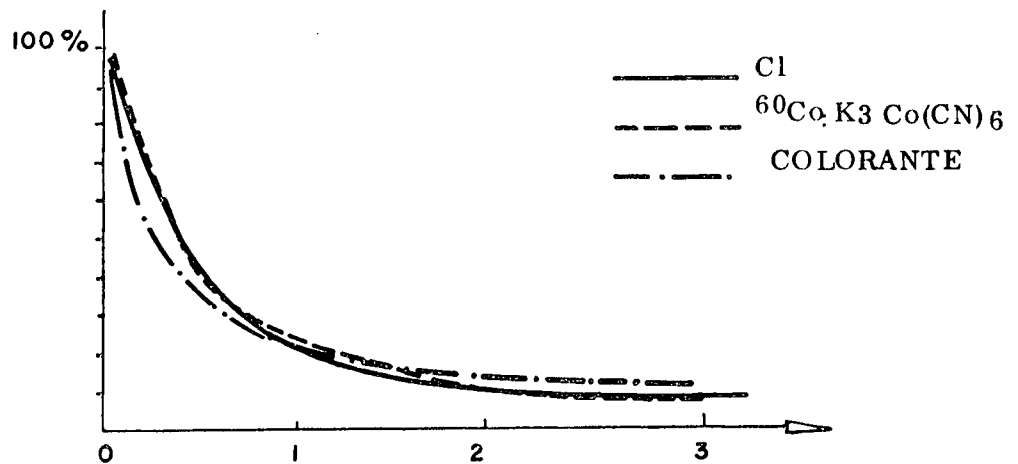
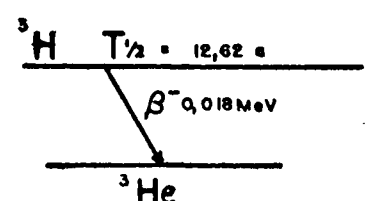
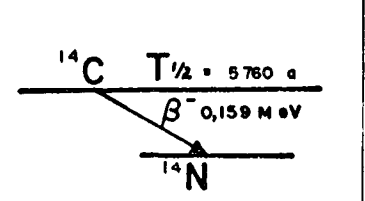


Fig. 3 - Comportamiento del ^{60}Co frente al Cl y un colorante en formación arenosa. Método del pozo único (9)

<p>${}^3\text{H}$</p>  <p>$T_{1/2} = 12,62 \text{ a}$</p> <p>$\beta^- 0,018 \text{ MeV}$</p> <p>${}^3\text{He}$</p> <p>$E_{\text{max}} = 18 \text{ kev}$</p> <p>$E_{\text{med}} = 5,5 \text{ kev}$</p>	<p>Recorrido para E_{max}</p> <p>En aire: 4,5 mm</p> <p>En agua: 6 μ</p>	<p>Origen Natural:</p> <p>${}^{14}\text{N} (n, {}^3\text{H})$</p> <p>Producción Artificial:</p> <p>${}^6\text{Li} (n, \alpha) {}^3\text{H}$</p> <p>Forma ${}^3\text{H HO}$</p> <p>Unidad:</p> <p>$1 \text{ UT} = \frac{1 \text{ átomo } {}^3\text{H}}{10^{18} \text{ átomos H}} =$</p> <p>$7,1 \cdot 10^{-3} \text{ des/min cm}^3 \text{ agua}$</p>
---	---	--

<p>${}^{14}\text{C}$</p>  <p>$T_{1/2} = 5760 \text{ a}$</p> <p>$\beta^- 0,159 \text{ MeV}$</p> <p>${}^{14}\text{N}$</p> <p>$E_{\text{max}} = 159 \text{ kev}$</p> <p>$E_{\text{med}} = 50 \text{ kev}$</p>	<p>Recorrido para E_{max}</p> <p>En aire: 19,3 cm</p> <p>En agua: 250 μ</p>	<p>Origen Natural:</p> <p>${}^{14}\text{N} (n, p) {}^{14}\text{C}$</p> <p>Producción Artificial:</p> <p>${}^{14}\text{N} (n, p) {}^{14}\text{C}$</p>
---	--	--

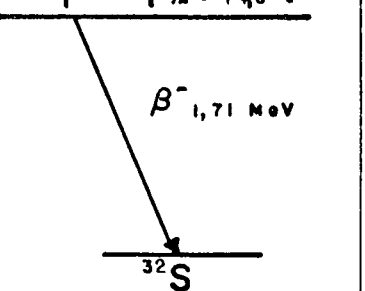
<p>${}^{32}\text{P}$</p>  <p>$T_{1/2} = 14,3 \text{ d}$</p> <p>$\beta^- 1,71 \text{ MeV}$</p> <p>${}^{32}\text{S}$</p> <p>$E_{\text{max}} = 1,71 \text{ MeV}$</p> <p>$E_{\text{med}} = 700 \text{ kev}$</p>	<p>Recorrido para E_{max}</p> <p>En aire: 603 cm</p> <p>En agua: 8 mm</p>	<p>Proceso de Producción:</p> <p>${}^{31}\text{P} (n, \gamma) {}^{32}\text{P}; \sigma = 0,19 \text{ barns}$</p> <p>Actividad Producida</p> <p>$(10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{seg})$</p> <p>1 semana: 25 mc/g de P</p>
--	---	---

Fig. 4

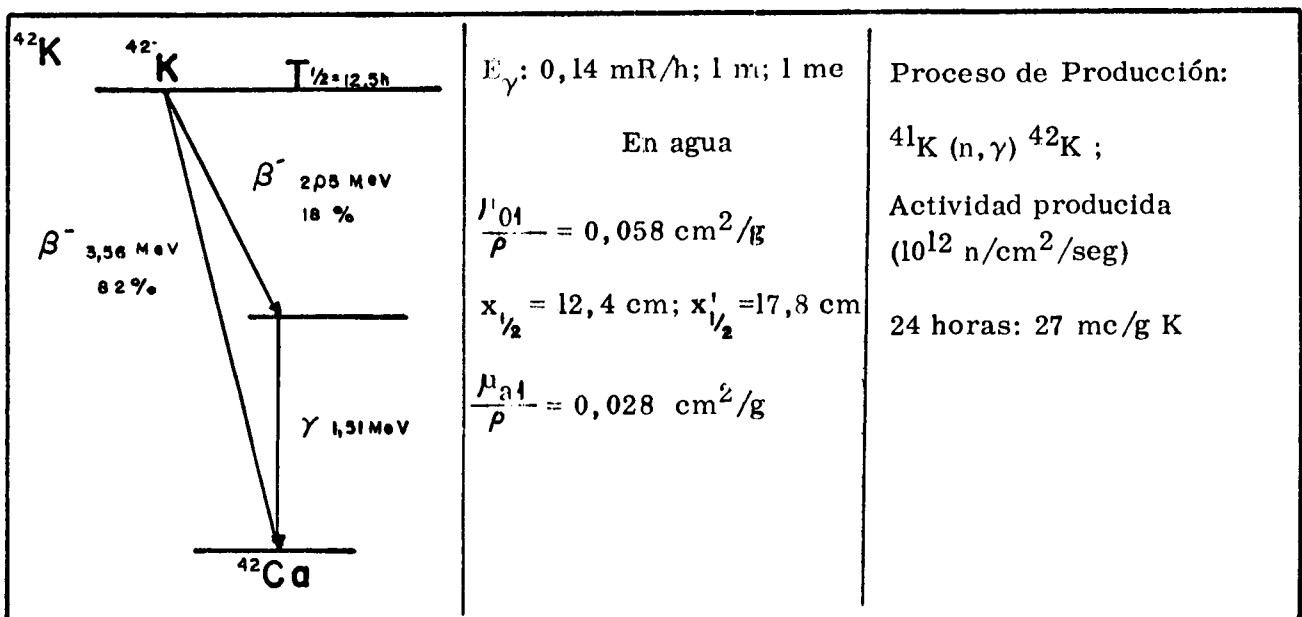
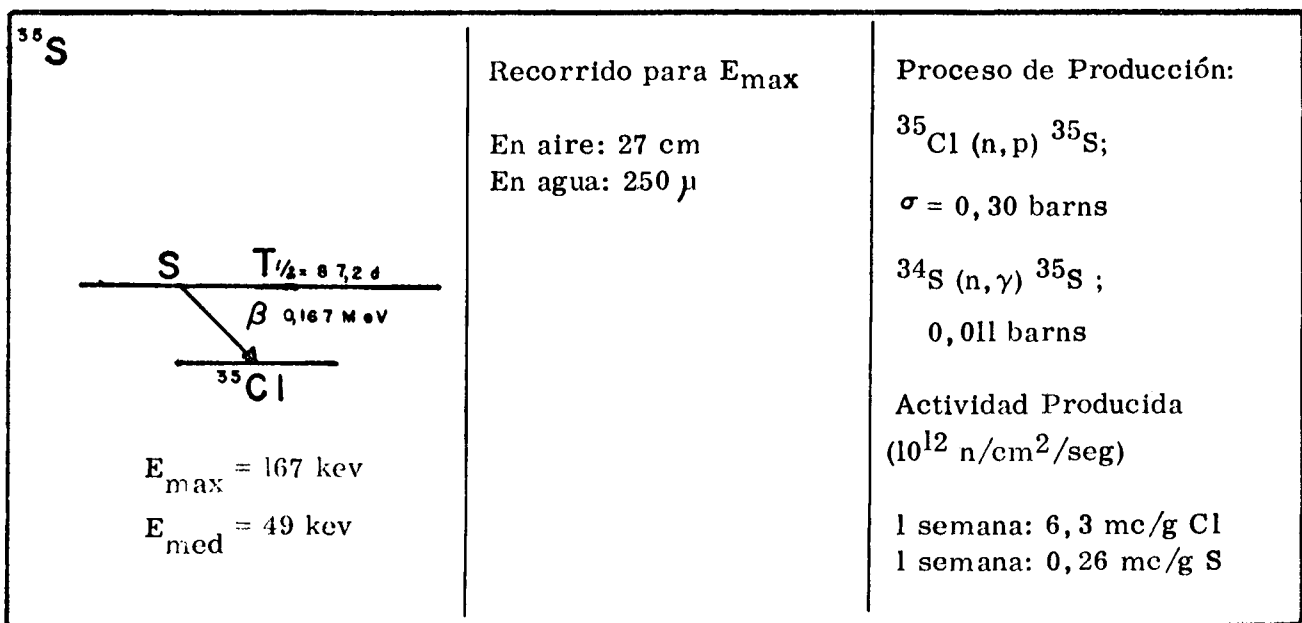
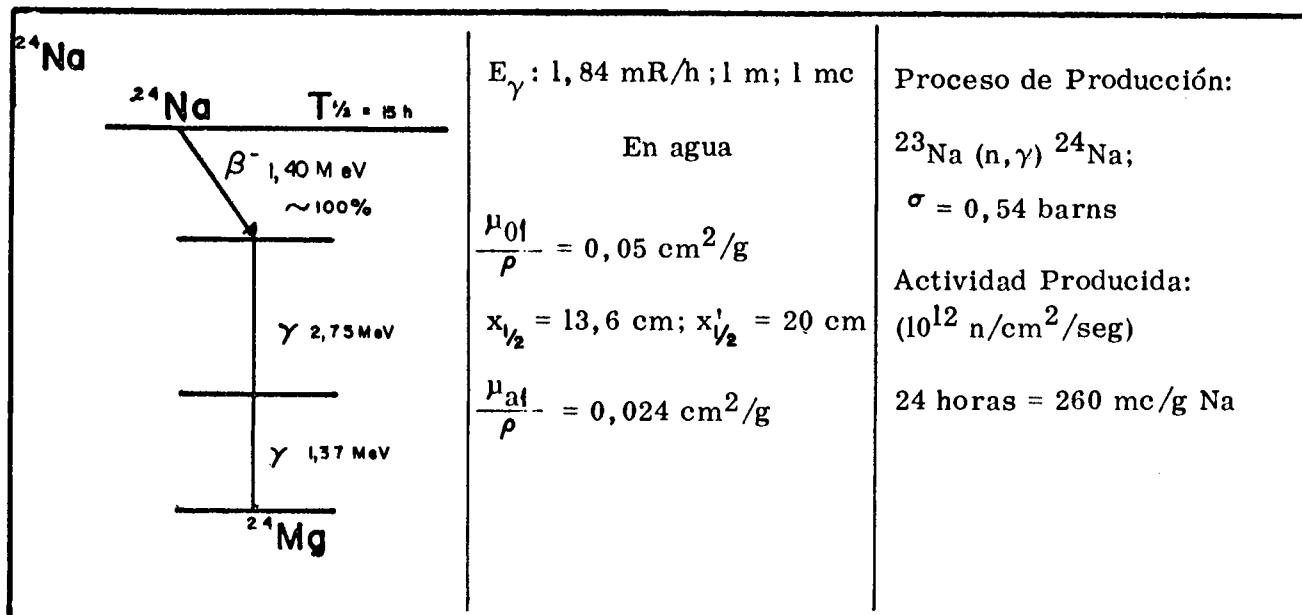


Fig. 4

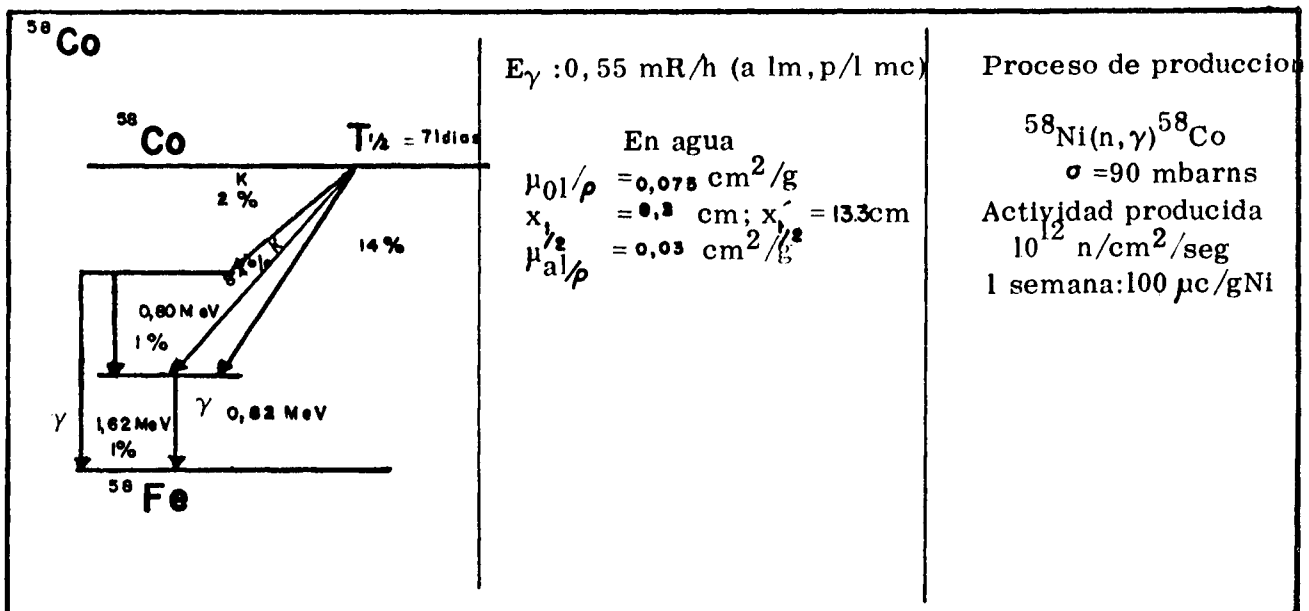
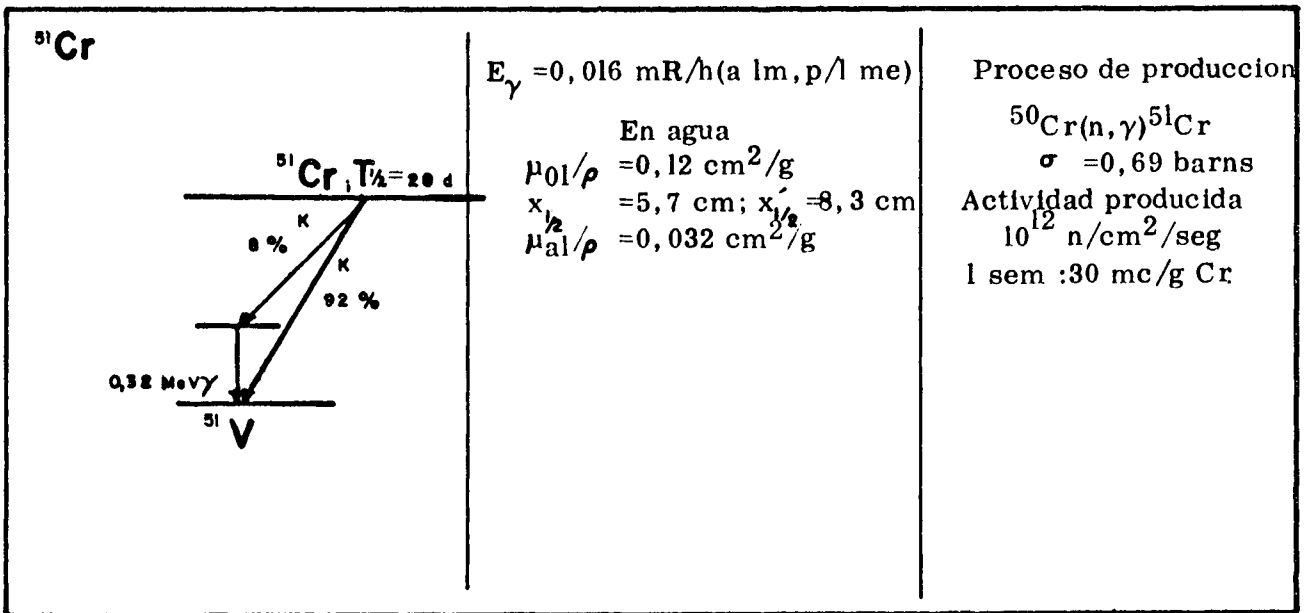
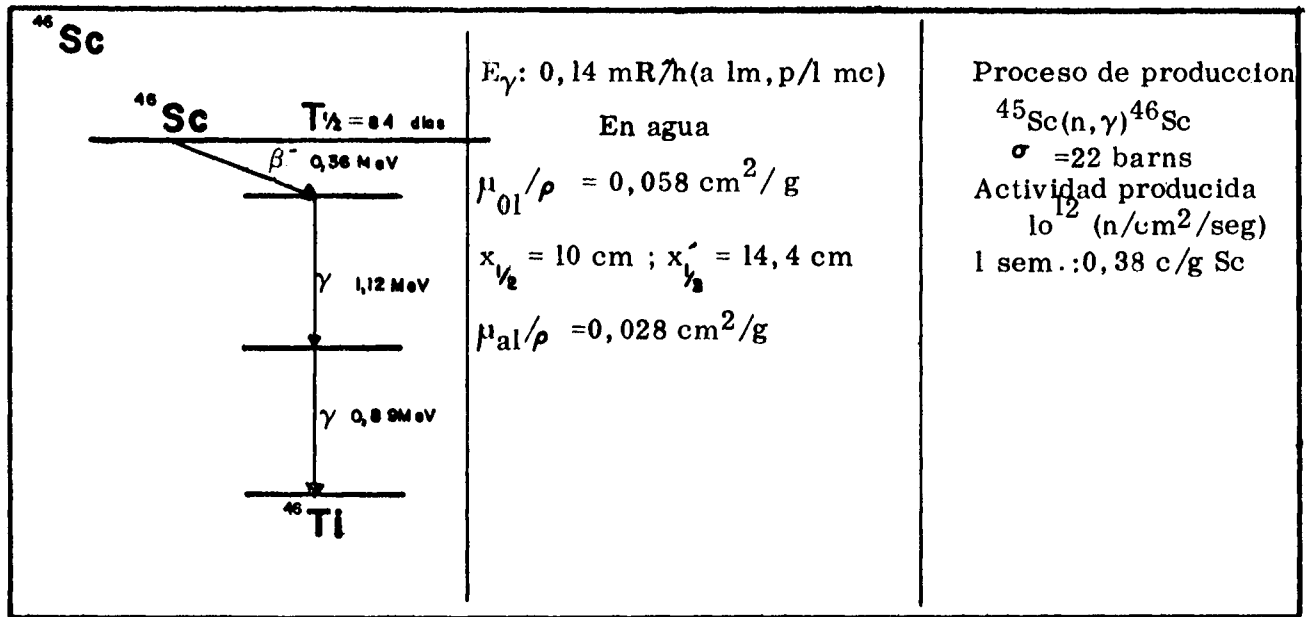


Fig. 4

<p>⁶⁰Co</p> <p>⁶⁰Co $T_{1/2} = 5,3 \text{ a}$</p> <p>$\beta^- 0,31 \text{ MeV}$</p> <p>$\gamma 1,17 \text{ MeV}$</p> <p>$\gamma 1,34 \text{ MeV}$</p> <p>⁶⁰Ni</p>	<p>$E_\gamma: 1,31 \text{ mR/h; } 1 \text{ m; } 1 \text{ mc}$</p> <p>En agua</p> <p>$\frac{\mu_{0\gamma}}{\rho} = 0,063 \text{ cm}^2/\text{g}$</p> <p>$x_{1/2} = 11,1 \text{ cm; } x'_{1/2} = 15,8 \text{ cm}$</p> <p>$\frac{\mu_{a\gamma}}{\rho} = 0,029 \text{ cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Proceso de Producción:</p> <p>$^{59}\text{Co} (n, \gamma) ^{60}\text{Co}$;</p> <p>$\sigma = 37 \text{ barns}$</p> <p>Actividad Producida ($10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{seg}$)</p> <p>1 semana : 23 mc/g Co</p>
--	--	--

<p>⁶⁵Zn</p> <p>⁶⁵Zn $T_{1/2} = 248 \text{ d}$</p> <p>β^+ 1,12 MeV 45 %</p> <p>$\gamma 1,12 \text{ MeV}$ 45 %</p> <p>K 55 %</p> <p>⁶⁵Cu</p>	<p>$E_\gamma: 0,27 \text{ mR/h; } 1 \text{ m; } 1 \text{ mc}$</p> <p>En agua</p> <p>$\frac{\mu_{0\gamma}}{\rho} = 0,067 \text{ cm}^2/\text{g}$</p> <p>$x_{1/2} = 10,4 \text{ cm; } x'_{1/2} = 14,9 \text{ cm}$</p> <p>$\frac{\mu_{a\gamma}}{\rho} = 0,031 \text{ cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Proceso de Producción:</p> <p>$^{64}\text{Zn} (n, \gamma) ^{65}\text{Zn}$;</p> <p>$\sigma = 0,22 \text{ barns}$</p> <p>Actividad producida ($10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{seg}$)</p> <p>1 semana = 0,88 mc/g Zn</p>
--	--	--

<p>⁸²Br</p> <p>⁸²Br $T_{1/2} = 35,4 \text{ h}$</p> <p>$\beta^- 0,44 \text{ MeV}$</p> <p>$\gamma 0,55 \text{ MeV}$ 70 %</p> <p>$\gamma 0,62 \text{ MeV}$ 43 %</p> <p>$\gamma 0,70 \text{ MeV}$ 27 %</p> <p>$\gamma 1,32 \text{ MeV}$ 27 %</p> <p>$\gamma 1,48 \text{ MeV}$ 18 %</p> <p>$\gamma 1,04 \text{ MeV}$ 30 %</p> <p>$\gamma 0,83 \text{ MeV}$ 84 %</p> <p>⁸²Kr</p>	<p>$E_\gamma: 1,46 \text{ mR/h; } 1 \text{ m; } 1 \text{ mc}$</p> <p>En agua</p> <p>$\frac{\mu_{0\gamma}}{\rho} = 0,084 \text{ cm}^2/\text{g}$</p> <p>$x_{1/2} = 8,2 \text{ cm; } x'_{1/2} = 12 \text{ cm}$</p> <p>$\frac{\mu_{a\gamma}}{\rho} = 0,032 \text{ cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Proceso de Producción:</p> <p>$^{81}\text{Br} (n, \gamma) ^{82}\text{Br}$;</p> <p>$\sigma = 1,6 \text{ barns}$</p> <p>Actividad producida ($10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{seg}$)</p> <p>24 horas = 160 mc/g Br</p>
--	---	--

Fig. 4

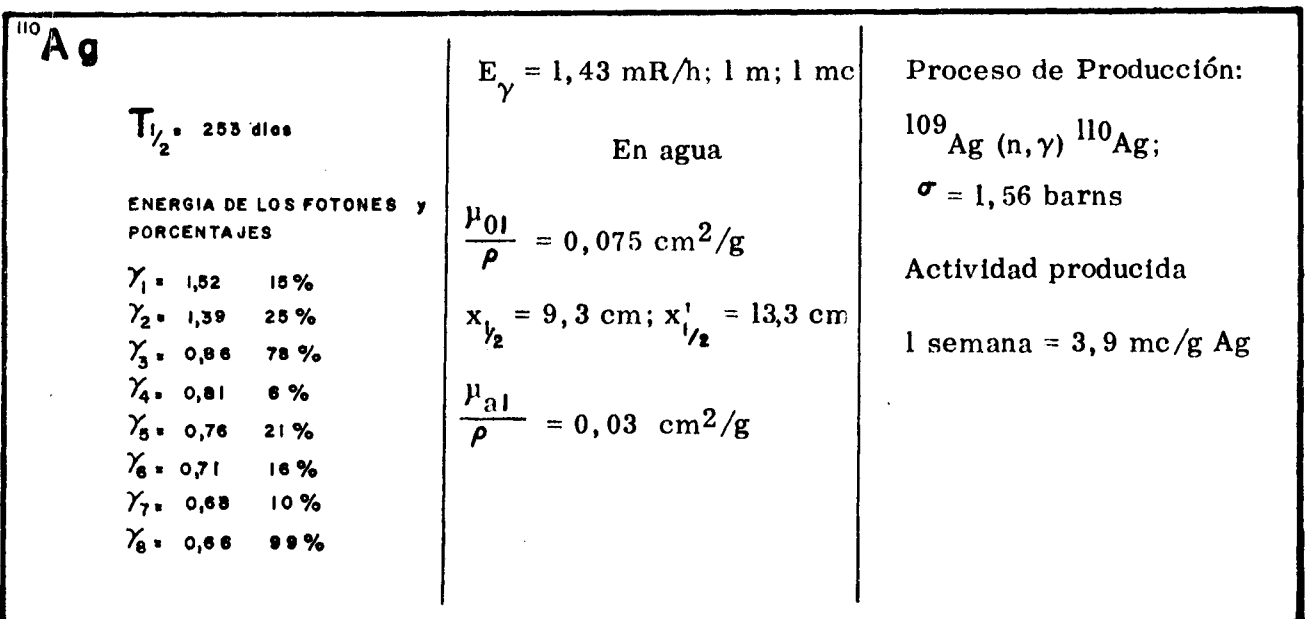
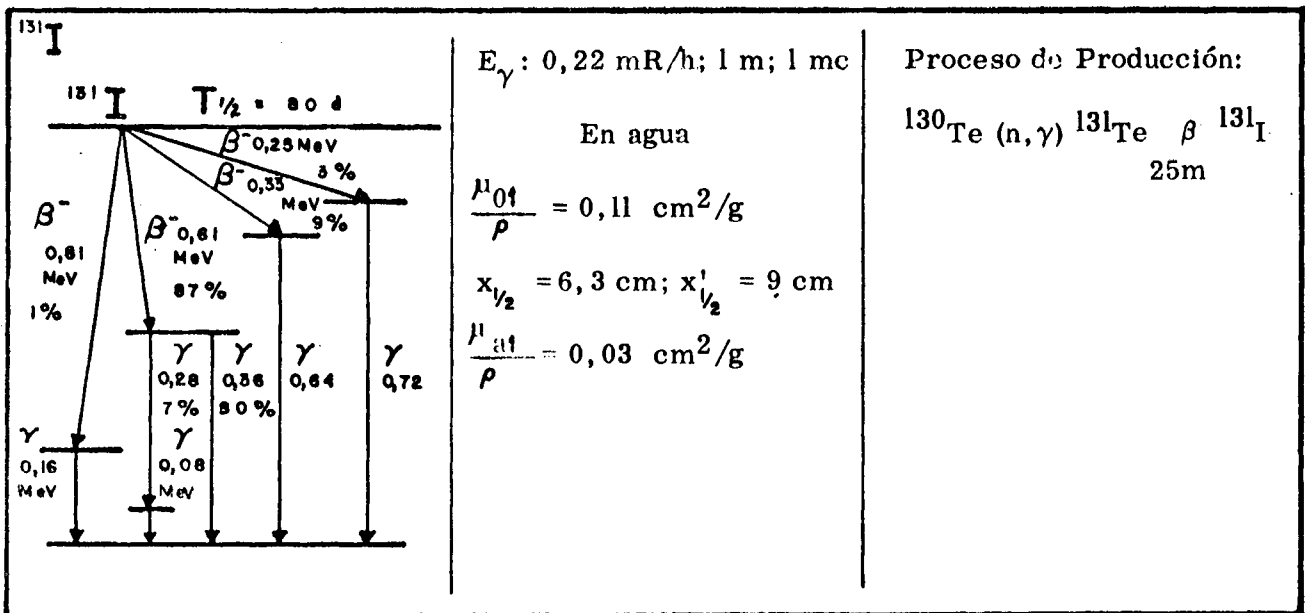
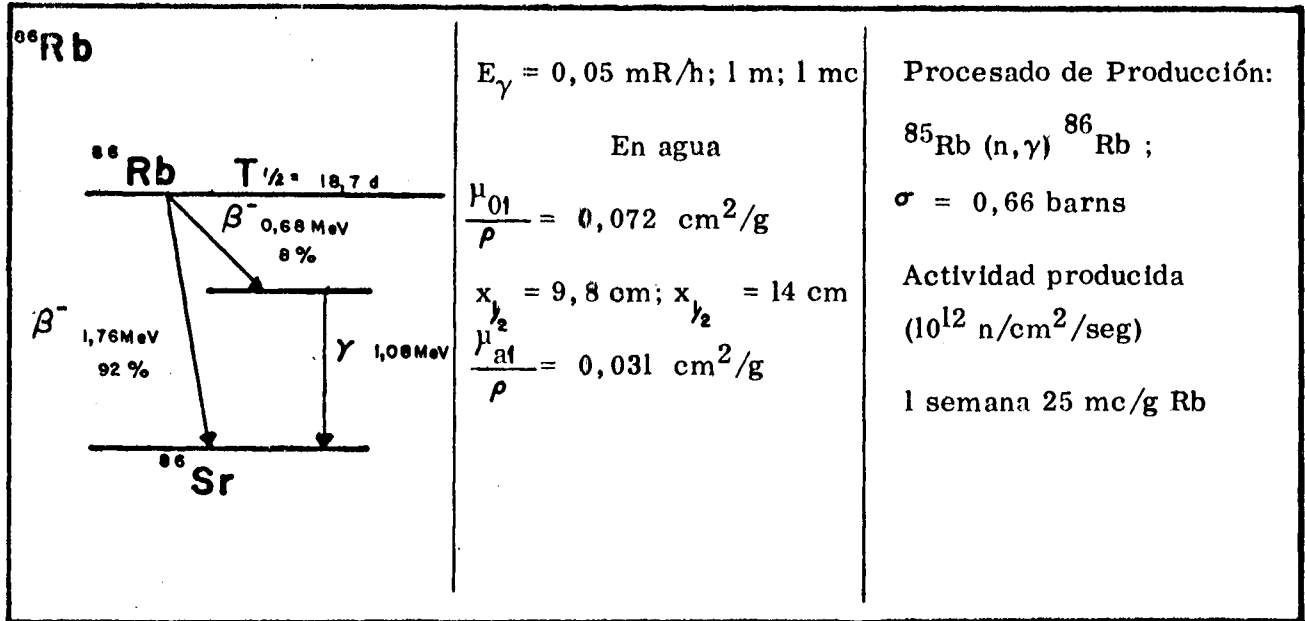
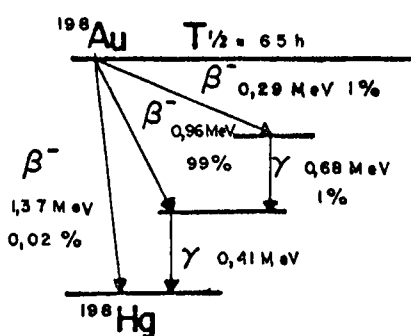


Fig.4

<p>^{192}Ir</p> <p>$T_{1/2} = 74 \text{ días}$</p> <p>ENERGIA DE LOS FOTONES γ PORCENTAJES</p> <table border="0"> <tr><td>$\gamma_1 = 0,61$</td><td>7%</td></tr> <tr><td>$\gamma_2 = 0,60$</td><td>12%</td></tr> <tr><td>$\gamma_3 = 0,46$</td><td>57%</td></tr> <tr><td>$\gamma_4 = 0,32$</td><td>85%</td></tr> <tr><td>$\gamma_5 = 0,31$</td><td>30%</td></tr> <tr><td>$\gamma_6 = 0,30$</td><td>25%</td></tr> <tr><td>$\gamma_7 = 0,20$</td><td>4%</td></tr> </table>	$\gamma_1 = 0,61$	7%	$\gamma_2 = 0,60$	12%	$\gamma_3 = 0,46$	57%	$\gamma_4 = 0,32$	85%	$\gamma_5 = 0,31$	30%	$\gamma_6 = 0,30$	25%	$\gamma_7 = 0,20$	4%	<p>$E_\gamma = 0,48 \text{ mR/h; } 1 \text{ m; } 1 \text{ mc}$</p> <p>$\frac{\mu_0}{\rho} = 0,105 \text{ cm}^2/\text{g}$</p> <p>$x_{1/2} = 6,6 \text{ cm; } x'_{1/2} = 9,6 \text{ cm}$</p> <p>$\frac{\mu_a}{\rho} = 0,033 \text{ cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Proceso de Producción</p> <p>$^{191}\text{Ir} (n, \gamma) ^{192}\text{Ir}$;</p> <p>$\sigma = 370 \text{ barns}$</p> <p>Actividad producida ($10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{seg}$)</p> <p>1 semana: 1,7 mc/g Ir</p>
$\gamma_1 = 0,61$	7%															
$\gamma_2 = 0,60$	12%															
$\gamma_3 = 0,46$	57%															
$\gamma_4 = 0,32$	85%															
$\gamma_5 = 0,31$	30%															
$\gamma_6 = 0,30$	25%															
$\gamma_7 = 0,20$	4%															

<p>^{198}Au</p> <p>$T_{1/2} = 65 \text{ h}$</p> 	<p>$E_\gamma = 0,23 \text{ mR/h; } 1 \text{ m; } 1 \text{ mc}$</p> <p>$\frac{\mu_0}{\rho} = 0,103 \text{ cm}^2/\text{g}$</p> <p>$x_{1/2} = 6,6 \text{ cm; } x'_{1/2} = 9,8 \text{ cm}$</p> <p>$\frac{\mu_a}{\rho} = 0,033 \text{ cm}^2/\text{g}$</p>	<p>Proceso de Producción</p> <p>$^{197}\text{Au} (n, \gamma) ^{198}\text{Au}$;</p> <p>$\sigma = 98 \text{ barns}$</p> <p>Actividad producida ($10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{seg}$)</p> <p>1 semana: 6,2 mc/g Au</p>
---	--	---

--	--	--

Fig. 4

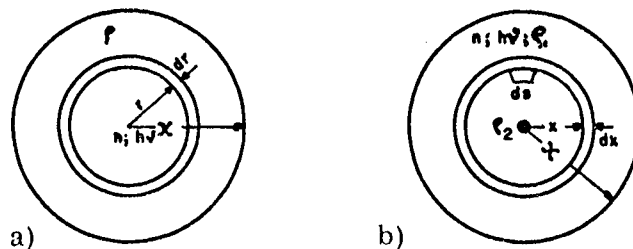


Fig. 5 - a) Fuente puntual, medio homogéneo e isotrópico
 b) Fuente homogéneamente distribuida en medio homogéneo e isotrópico

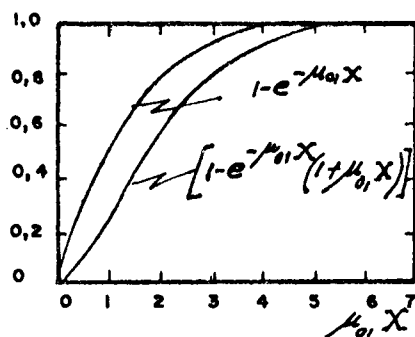


Fig. 6 - Porcentaje de radiación primaria y secundaria que llega a un punto situado en medio homogéneo e isotrópico en función de los espesores promedio (x')

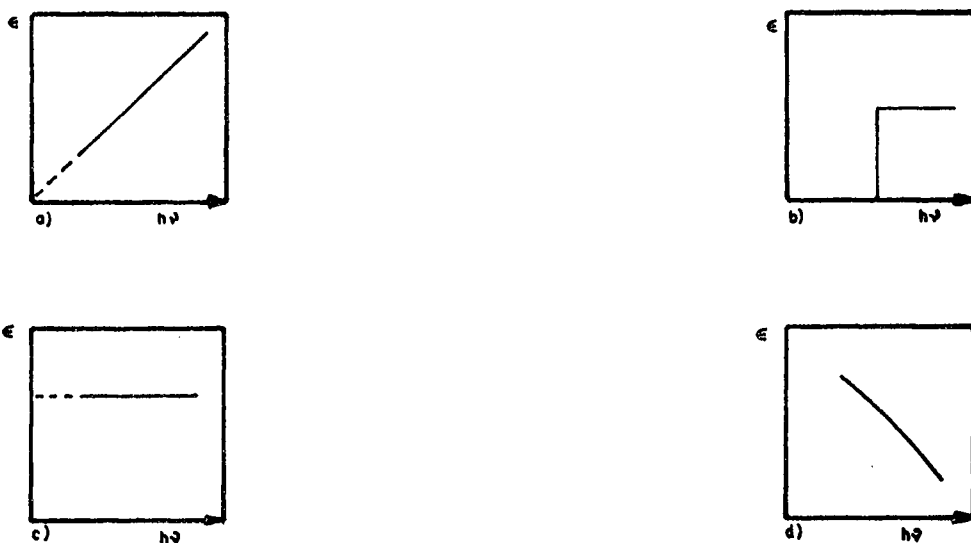


Fig. 7 - Eficiencia de detección en función de la energía de los fotones ($h\nu$)

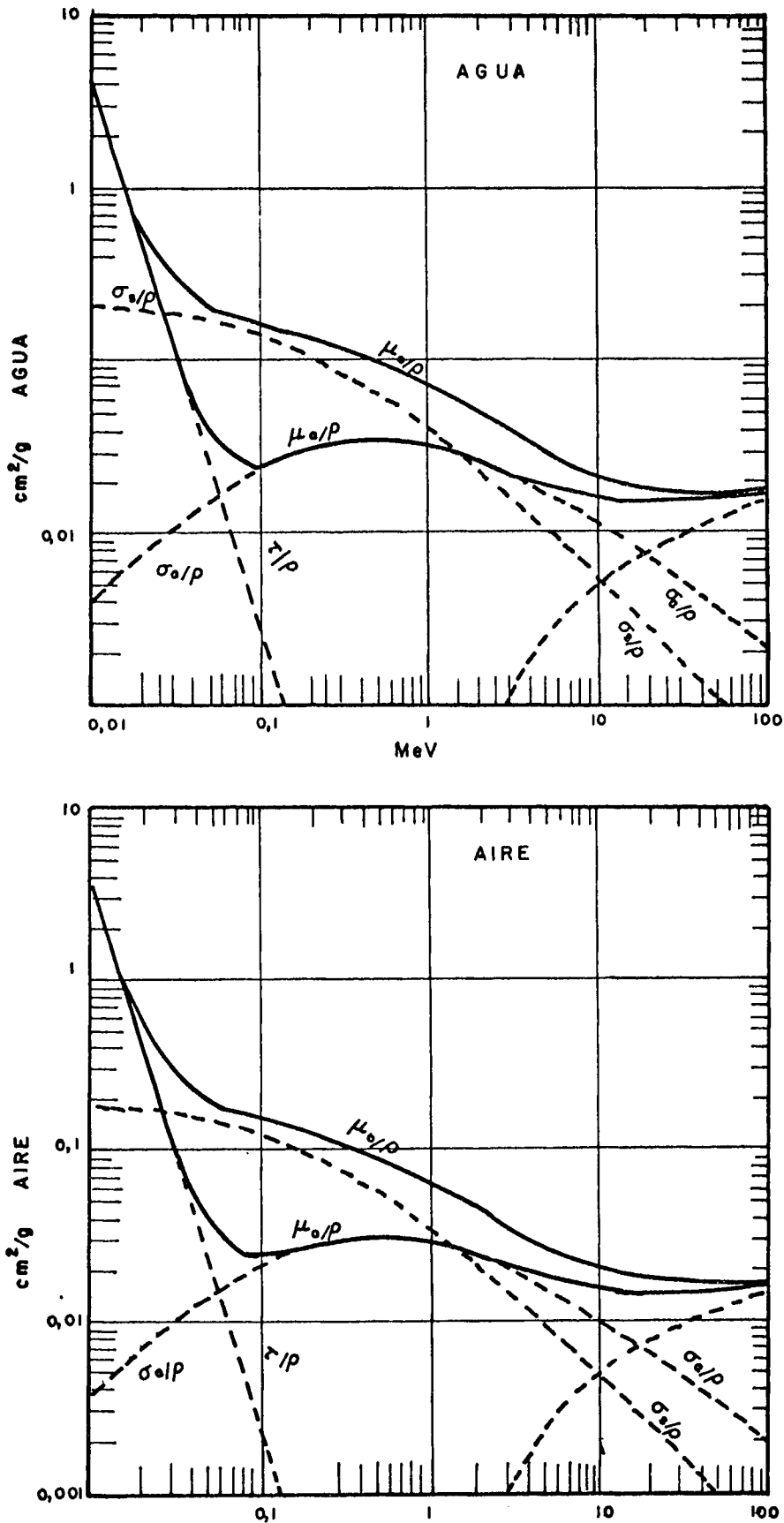


Fig. 8 - Coeficientes máscos de atenuación y absorción en agua y aire.

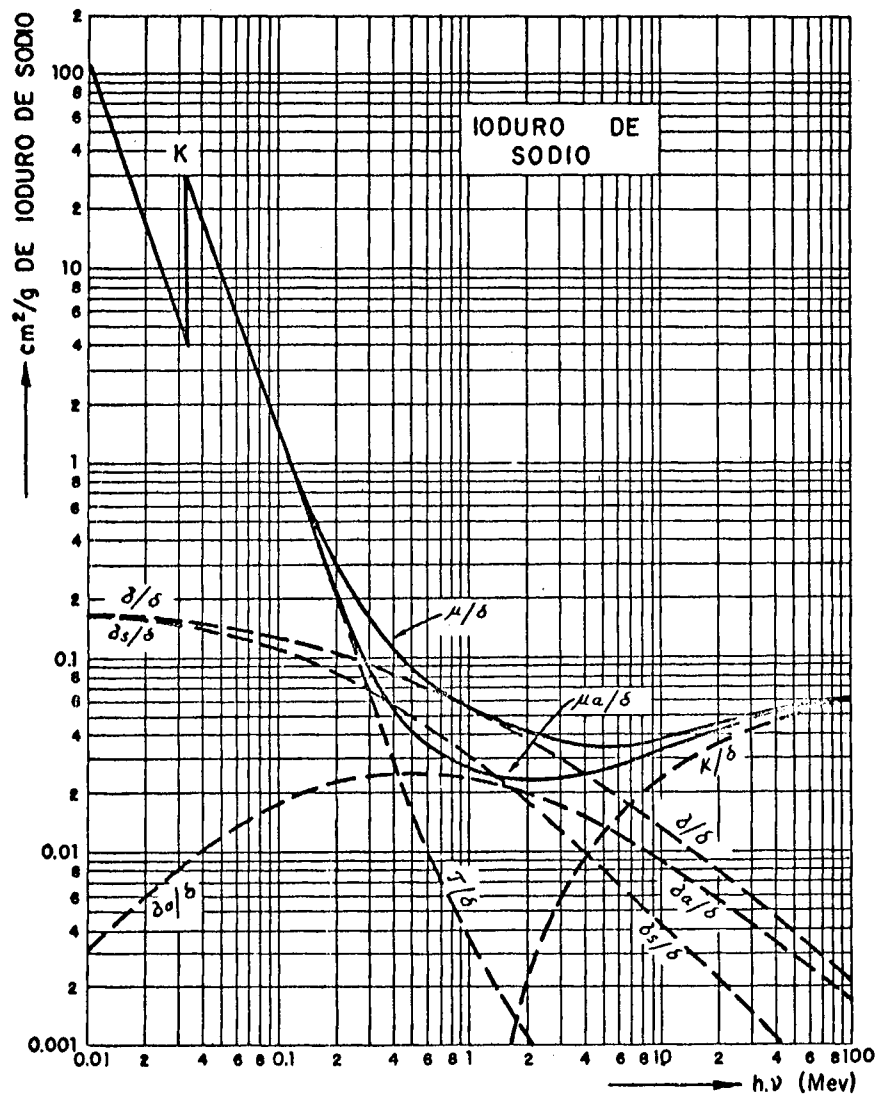


Fig. 8 - Coeficientes de atenuación másicos en yoduro de sodio.

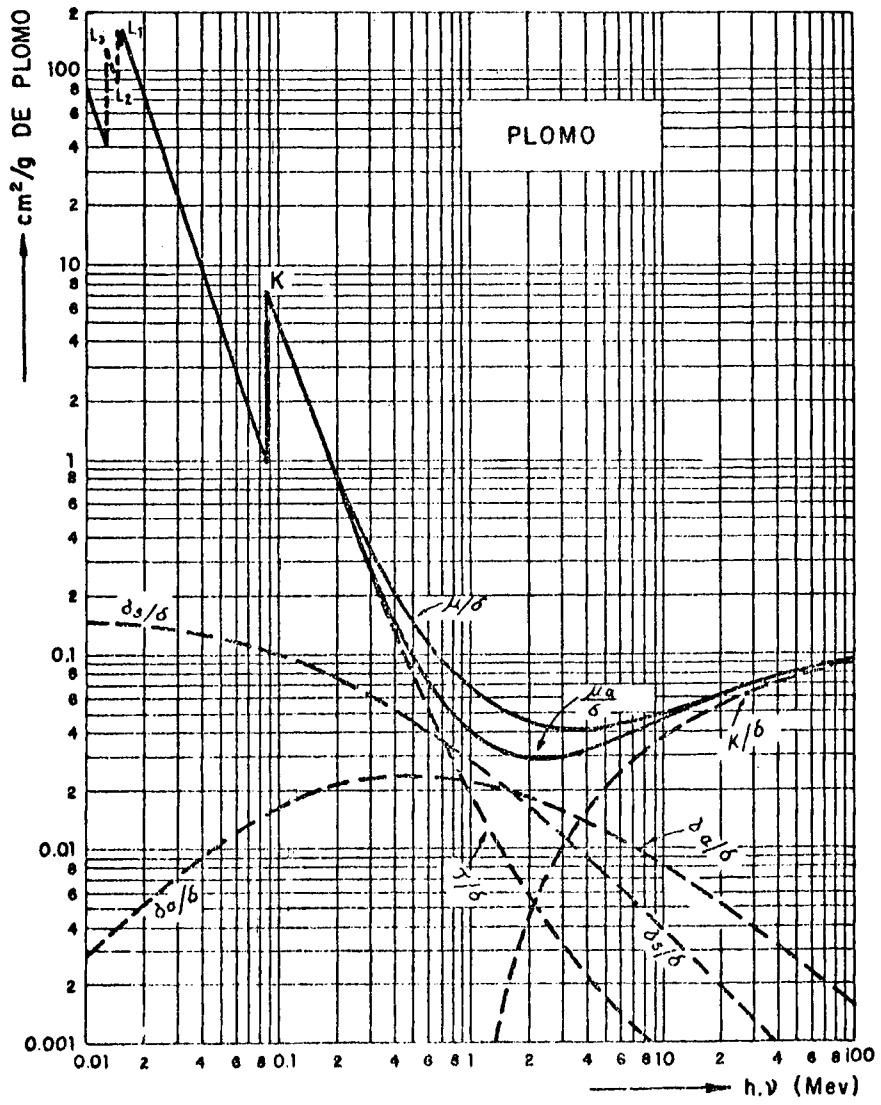


Fig. 8 - Coeficientes de atenuación másicos en plomo.

Tabla I

Radioisotopos usados en Hidrología

Radioisotopo	Formo quimica mos usual	Periodo de semi-desintegracion	Concentracion max. permisible en agua x		Tipo de radiacion Princip. componentes		Algunas referencias con respecto a su comportamiento xxxx
			$\mu\text{C}/\text{cm}^3$		Beta	Gamma	
			xx	xxx	MeV	MeV	
³ H	HTO	12,3 a	0,1	$3 \cdot 10^{-3}$	0,018		I II
¹⁴ C		5760 a	0,2	$8 \cdot 10^{-4}$	0,159		
²⁴ Na		15 h	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	1,40	2,75 1,57	III IV
³² P		14,2 d	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	1,71		IV
³⁵ S		89 d	$2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-5}$	0,167		II
³⁶ Cl		$3 \cdot 10^5$ e	$2 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-5}$	0,71		II
⁴⁵ Ca	Ca EDTA	163 d	$3 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-6}$	0,26		III IV V
⁴⁶ Sc		84 d	10^{-3}	$4 \cdot 10^{-5}$	0,36	1,12 0,89	IV V
⁵¹ Cr	Cr EDTA	27,8 d	0,05	$2 \cdot 10^{-3}$		0,32	II IV V
⁵⁸ Co	Co EDTA $\text{K}_3\text{Co}(\text{CN})_6$	72 d	$4 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	0,47	0,81	Y
⁵⁹ Fe	Fe EDTA	45 d	$2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-5}$	0,27 0,46	1,10 1,59	IV V
⁶⁰ Co	Co EDTA $\text{K}_3\text{Co}(\text{CN})_6$	5,2 a	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-5}$	0,31	1,17 1,33	II IV V
⁶⁵ Zn	Zn EDTA	243 d	$3 \cdot 10^3$	10^{-4}		1,12	IV V
⁸² Br	$\text{Br-NH}_4 \cdot \text{BrNa}$	36 h	$8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0,45	0,55 1,47	II
⁸⁶ Rb		19 d	$2 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-5}$	0,68 1,76	1,08	IV
⁸⁹ Sr		51 d	$3 \cdot 10^{-4}$	10^{-5}	1,46		IV
⁹⁰ ⁹⁰ Sr-Y		65 a 64 h			0,54 2,26		IV
¹⁰⁶ TiO ₂ Rw-Rh							II IV V
¹¹⁰ Ag		253 d	$9 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	0,88 0,66		
¹¹⁴ In			$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$			II IV V
¹²⁴ Sb		60 d	$7 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	0,61 0,22	1,70 0,72	IV V
¹³¹ I	I Na	8 d	$6 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-8}$	0,81	0,36 0,64	II
¹⁴⁰ ¹⁴⁰ Ba-La		12,8 d 40 h	$6 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	1,38 etc.	1,60 etc.	IV
¹⁴³ Pr			10^{-3}	$8 \cdot 10^{-5}$			IV
¹⁴⁷ Pm		2,5 a	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0,22		IV
¹⁷⁰ Tm		127 d	10^{-3}	$8 \cdot 10^{-5}$	0,97	0,084	IV
¹⁹² Ir	Ir EDTA	74 d	10^{-3}	$4 \cdot 10^{-5}$	0,67 0,54	0,32 0,46	IV
¹⁹⁸ Au	Coloidal	65 h	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	0,96	0,41	

x De "Basic Safety Standars for Rad Protection" IAEA, Saf. Serie N° 9 (1962)

xx Operadores

xxx Público en general

xxxx I Excelente

II Existen numerosos trabajos confirmando su buen comportamiento en aguas subterráneas y superficiales

III Si las aguas estan saturadas de este elemento pueden tener resultados aceptables

IV Como cationes, son generalmente malos trazadores en aguas subterráneas ; en cierto tipo de estratos pueden ser aceptables (calcáreos, arenas, etc.)

V Empleados generalmente en forma de complejos

TABLA III

Espesores medios en agua

ENERGIA	Espesor de semirreducción $X_{\frac{1}{2}} = 0,693$ u_{01}	Espesor promedio $X'_{\frac{1}{2}} = 1$ u_{01}
	AGUA	AGUA
MeV	cm	cm
0,5	7,25	10,4
0,6	8,0	11,5
0,8	9,0	12,9
1,0	10,0	14,5
1,2	11,0	15,8
1,4	11,75	16,9
1,6	12,5	18,0
1,8	13,25	19,1
2,0	14,0	20,2
2,2	14,75	21,1
2,4	15,50	22,3
2,6	16,25	23,4
2,8	16,75	24,1
3,0	17,50	25,2

TABLA IV

CONCENTRACIONES MINIMAS MEDIBLES DE ALGUNOS
RADIOISOTOPOS EN AGUA

(2)				
	^3H	^{51}Cr	^{131}I	^{82}Br
C.M.M. ($\mu\text{C}/\text{m}^3$) sin enriquecimiento precisión: 1% probabilidad: 64%	50	30	4	1
	DETECTOR			
	c. líquido "Packard"	Cristal	INa (Tl)	4,5 x 5 cm
	TIEMPO DE CONTAJE			
	2 h	1.000 seg	1.000 seg	1.000 seg
	DETECTOR EN EL CENTRO DE CILINDRO			
		18 l	18 l	30 l
(5)				
	^3H	^{51}Cr	^{131}I	^{82}Br
C.M.M. ($\mu\text{C}/\text{m}^3$) sin enriquecimiento precisión: 1 % posibilidad: 64 %			2,15 °	0,335 °
			0,55 °°	0,089 °°
			0,23 °°°	0,036 °°°
			Detector: Cristal INa(Tl) 1,5" x 1"	
		Tiempo de Contaje ° 1/3 min °° 5 min °°° 30 min		
		Geometría Detector en el centro con volumen "Infinito" Fondo Natural \approx 50 c/min		

Tabla V

Trazadores Fluorescentes usados en Hidrología (19)

TRAZADOR \ PROPIEDADES	URANINA	RHODAMINA B	SULFORHODAMINA B* y G**
Sensibilidad de detección (Valores relativos; A. "in situ")	Elevada 1	Elevada 1	Buena 0,5
Ruido de fondo en la detección	Elevado (En aguas cargadas)	Reducido	Reducido
Degradación a la luz	Muy elevada	Elevada	Nula
Influencia de la temperatura sobre la medición (Variación por °C)	Reducida -0,36%	Elevada -2,7%	Elevada* ; Nula** -2,9%* 0%**
Retención en suelos	Muy baja	Muy elevada	Reducida
Solubilidad	Alta 300 g/l	Reducida ~ 10 g/l Se puede mejorar con	Reducida ~ 10 g/l solventes orgánicos

Tabla VI

Trazadores convencionales usados en Hidrología (19)

TRAZADOR \ PROPIEDADES	Cr ₂ O ₇	INa	ClNa	SO ₄ Mg	NO ₃ Na	ClLi
Solubilidad (g/l)	600	> 1.500	300 a 400	500	75	600
Concentración mínima medible (por muestreo)	0,2 a 2.10 ⁻⁶ Sin reconcentración	10 ⁻¹⁰ A. por Activ.	10 ⁻⁵ Colorimetría	1 a 2.10 ⁻⁶	0,5.10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
	0,2 a 2.10 ⁻⁷ Con reconcentración	10 ⁻⁹ A. Catalítico	Conductimetría 10 ⁻⁵ a 10 ⁻⁶ A. "in situ"			
Comportamiento en aguas subterráneas	Mediocre	Aceptable en aguas con muy reducido tenor de I	Mediocre	Mediocre	Mediocre	Aceptable

