

G.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 4	AÑO 1971

05.71.02

EN-19/51

REPUBLICA ARGENTINA  
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION  
GERENCIA DE ENERGIA

TRAZADORES RADIOACTIVOS EN HIDROGEOLOGIA  
- RESEÑA TEORICO PRACTICA -

Héctor R. Gómez  
Departamento de Radioisótopos - División Aplicaciones

Buenos Aires - marzo 1971

REPUBLICA ARGENTINA  
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION  
GERENCIA DE ENERGIA

TRAZADORES RADIACTIVOS EN HIDROGEOLOGIA  
- RESEÑA TEORICO PRACTICA -

Héctor R. Gómez  
Departamento de Radioisótopos - División Aplicaciones

Buenos Aires - marzo 1971

## CONTENIDO

<u>SECCION</u>	<u>PAG.</u>
1.0.0	INTRODUCCION ..... 1
2.0.0	SELECCION DEL TRAZADOR RADIOACTIVO ..... 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 ..... 7
2.1.3	Pruebas de laboratorio o en campaña para comprobar el comportamiento del trazador en el medio donde deberá escurrir ..... 7
2.2.0	ESTABILIDAD Y SOLUBILIDAD DEL TRAZADOR EN EL AGUA ..... 10
2.3.0	PERIODO DE SEMIDESINTEGRACION ..... 10
2.4.0	POSIBILIDADES DE DETECCION ..... 11
2.5.0	CONCENTRACIONES MINIMAS MEDIBLES (CMM) Y CONCENTRACIONES MINIMAS DETECTABLES (CMD).. 20
2.6.0	COSTO Y DISPONIBILIDAD ..... 21
2.7.0	VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS TRAZADORES RADIOACTIVOS ..... 23
3.0.0	TRAZADORES RADIOACTIVOS EN AGUAS SUPERFICIALES 25
3.1.0	DISTANCIA MINIMA DE BUEN MEZCLADO ..... 27
3.1.1	Verificación del mezclado (lateral) ..... 31
3.1.2	Tiempo de paso de la "Ola radiactiva" o "Nube radiacti- va (pico) ..... 31
3.2.0	METODOS DE MEDICION DE CAUDALES CON TRAZADO RES RADIOACTIVOS ..... 32
3.2.1	Método de los "dos picos" ..... 32
3.2.2	Método de las cuentas totales ..... 35
3.2.2.1	Constante de proporcionalidad o calibración (F) ..... 38
3.2.2.2	Cálculo de la actividad necesaria ..... 41

<u>SECCION</u>	<u>PAG.</u>
3.2.2.3	Formas de medición o variantes del método ..... 42
3.2.2.4	Sistema de inyección ..... 45
3.2.2.5	Corrientes divergentes ..... 45
3.2.3	Método de inyección continua o dilución ..... 46
3.2.3.1	Cálculo de la actividad a inyectar ..... 47
3.2.4	Comparación entre los métodos descriptos ..... 47
3.3.0	ESTUDIOS DE DIFUSION Y DISPERSION ..... 49
3.4.0	TECNICAS DE APLICACION EN PERFORACIONES Y TRANSPORTE DE FLUIDOS ..... 51
3.4.1	Generalidades ..... 51
3.4.2	Perforaciones ..... 53
3.4.2.1	Perfilaje de pozos ..... 53
3.4.2.2	Determinación de permeabilidad y porosidad ..... 55
3.4.2.3	"Punzonamiento" de camisas y cemento ..... 56
3.4.2.4	Control del cementado ..... 57
3.4.3	Explotación ..... 58
3.4.3.1	Producción y recuperación secundaria ..... 58
3.4.3.2	Control de los procesos de inundación ..... 59
3.4.3.3	Localización de fracturas geológicas o estratos de alta permeabilidad ..... 60
3.4.4	Almacenamiento, procesos y transporte de fluidos ..... 63
3.4.4.1	Identificación de componentes ..... 63
3.4.4.2	Tiempo de permanencia real ..... 64
3.4.4.3	Separación de componentes de una mezcla ..... 67
3.4.5	Transporte ..... 67
3.4.5.1	Localización y limitación de interfases ..... 68
3.4.5.2	Localización de obstrucciones ..... 69
3.4.5.3	Localización de pérdidas, filtraciones e interconexiones .. 71
3.4.5.4	Técnica general de localización de fugas ..... 71
3.4.5.5	Técnica de las fuentes puntuales ..... 73
3.4.5.7	Técnica de localización de fugas con inyección discreta ... 74
3.4.5.6	Técnica de la localización de fugas con inyección continua . 76
3.4.5.8	Detección de fugas con detectores introducidos en la cañería 77
3.4.6	Otras consideraciones sobre detección de pérdidas ..... 78
4.0.0	TECNICAS NUCLEARES EN AGUAS SUBTERRANEAS .... 78
4.1.0	DEFINICIONES Y ALGUNAS REFERENCIAS RESPECTO A PARAMETROS FUNDAMENTALES EN AGUAS SUBTERRA- NEAS..... 86
4.1.1	Porosidad, rendimiento específico y retención específica . 86
4.1.2	Ley de Darcy; velocidad y permeabilidad ..... 87
4.1.3	Transmisibilidad ..... 91

<u>SECCION</u>	<u>PAG.</u>
4.1.4	91
4.2.0	93
4.2.1	93
4.2.1.1	93
4.2.1.2	97
4.2.2	100
4.2.2.1	100
4.2.2.2	103
4.2.2.3	108

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 una información actualizada de las aplicaciones más difundidas con el objeto de promover su uso y dotar al curso de Aplicación de Radioisótopos en Ingeniería e Industria, dictado regularmente por la Comisión Nacional de Energía Atómica, de una reseña teórico práctica, complemento necesario de las clases respectivas.

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" ahonde 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 nucleídos 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 intercambio iónico, absorción física o química y 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 y de la frecuentemente larga duración de las experiencias, obliga a profundizar en la selección del nucleído y su forma química. 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 aptos para recorrer largos trayectos en aguas subterráneas o permanecer lapsos prolongados 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 formas 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 <sub>2</sub> O	5 - 10	"
Halloysita, 4 H <sub>2</sub> 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 energética 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 cada 100 gramos.

La fijación de iones marcados con los estratos, depende particularmente 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 (<sup>24</sup>Na ó <sup>45</sup>Ca 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.

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

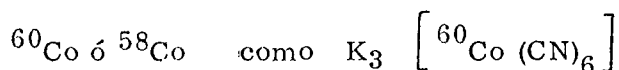
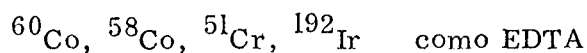
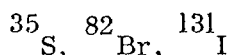
Como es dable apreciar el problema de selección en algunos casos es complejo y puede ser preciso realizar un estudio previo de laboratorio y/o campaña para comprobar el comportamiento del soluto (trazador en determinada forma química) frente al absorbente y solvente (agua).

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 (en virtud de la diferencia de masa) intercambia más que la molécula H<sub>2</sub>O con el agua de constitución de los sedimentos o rocas (4). El error introducido por este mayor intercambio es despreciable a los fines prácticos.

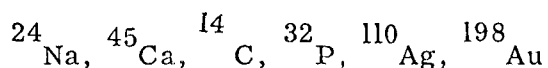
En términos generales y haciendo un rápido resumen podemos decir que el comportamiento del:



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



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



en ciertos casos pueden tener aceptable rendimiento. En aguas superficiales y experiencias de poca duración pueden usarse teniendo siempre presente las limitaciones antes expuestas

### 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 de fondo más reducido.

Existen trabajos de medición de caudales en ríos en los que se han utilizado cationes sin haber encontrado pérdidas apreciables; es el caso del  $^{198}\text{Au}$  y el  $^{24}\text{Na}$ .

### 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. La concentración de trazador o trazadores que se inyecta a la entrada de la columna es medida "in situ" o por muestreo y comparada con la concentración medida en la salida o agua de elución para así deducir la pérdida o cantidad fijada en la columna a ensayar.

En base a las ecuaciones expuestas deducimos la cantidad de trazador perdido al pasar por las columnas.

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

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

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

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

$C_i, C_r \left( \frac{\mu\text{C}}{\text{ml}} \right)$  : 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.

Es preciso tener en cuenta que la medición de la actividad inyectada ( $A_i$ ) y de la actividad recuperada ( $A_r$ ) deben realizarse con idéntica geometría de detección. 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  $^{60}\text{Co} \left[ \text{K}_3 (\text{CN})_6 \right]$  frente al Cl (considerado como un trazador excelente) y también a un colorante. En esta experiencia se inyectaron  $25.000 \text{ m}^3$  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  $^{51}\text{Cr}$  (EDTA) en acuíferos de origen glacio-fluvial (12). Aquí la técnica empleada consistió en inyectar en

un pozo agua marcada con  $^3\text{H}$  y  $^{51}\text{Cr}$  (EDTA). Desde otros pozos situados a 25 m y 11 m del anterior se extrajeron periódicamente muestras y se compararon las actividades relativas de  $^3\text{H}$  y  $^{51}\text{Cr}$ . El comportamiento de este último, como puede apreciarse es excelente ya que las curvas  $^3\text{H}$  y  $^{51}\text{Cr}$  prácticamente coinciden.

### 2.2.0 ESTABILIDAD Y SOLUBILIDAD DEL TRAZADOR EN EL AGUA

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 lo constituye el  $^{198}\text{Au}$  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 seleccionarlo en base a su período de semidesintegración. Las conocidas fórmulas de D'Allen Hazen, Zunker, etc. permiten calcular 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:

$$v_l = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{K}{m_e} \frac{dh}{dl} \quad \therefore \quad \Delta t = \frac{\Delta l}{K} m_e \frac{l}{dh/dl}$$

La distancia  $\Delta l$  y el gradiente hidráulico  $dh/dl$  son estimados en base a las referencias topo-geológicas disponibles del área en estudio y la porosidad efectiva  $m_e$  se estima o se mide en las muestras de perforaciones existentes. (13)

#### 2.4.0 POSIBILIDADES DE DETECCION Y MEDICION. RESPUESTA DEL DETECTOR EN MEDIO INFINITO, HOMOGENEO E 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  $\alpha$  y partículas  $\beta$  de baja energía, por ej.  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ , y  $^{35}\text{S}$ ) no lo permite es preciso extraer muestras periódicas del sistema hidro-

dinámico 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  $\alpha$  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  $\beta$  puros ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  y  $^{35}\text{S}$ ), de baja energía, sólo pueden ser medidos con instrumental y técnicas especiales. El  $^{32}\text{P}$ , 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  $\beta$  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  $^{32}\text{P}$  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 ( $\alpha$ ,  $\beta$  ó  $\gamma$ ), 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 dable 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 medios y "geometrías" afines con las reales.

Supongamos que en el medio infinito, homogéneo e isotrópico de densidad  $\rho$  ( $\text{g/cm}^3$ ), 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:

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

$$\int_0^{4\pi} ds = 4 \pi x^2$$

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

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

$x$  : 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/seg. También podríamos decir que es la energía cedida al medio por unidad de masa y tiempo.

$$d D_{\text{primaria}} = d \phi_{\text{primaria}} \frac{\mu_{a2}}{\rho_2} \quad (3)$$

$\mu_{a2}$  : coeficiente de absorción del medio 2 (detector, por ej.) ( $\text{cm}^{-1}$ );

$\rho_2$  : densidad del medio 2 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\mu_{02}$  : coeficiente de atenuación total del medio 2 ( $\text{cm}^{-1}$ );

$\mu_{s2}$  : coeficiente de dispersión del medio 2 ( $\text{cm}^{-1}$ ).

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

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

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

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

$$D_{\text{primaria}} = n h \nu \rho_1 \frac{\mu_{a2}}{\rho_2} \int_0^x e^{-\mu_{01} x} dx$$

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

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

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

$$\text{Rad} = 100 \frac{\text{erg}}{\text{g}} \therefore 1 \frac{\text{erg}}{\text{g}} = \frac{1}{100} \text{Rad}; \quad 1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ erg}$$

$$1 \frac{\text{MeV}}{\text{g seg}} = 1,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{erg}}{\text{g seg}} = 1,6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{100} \frac{\text{Rad}}{\text{seg}}$$

$$1 \frac{\text{MeV}}{\text{g seg}} = 1,6 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Rad}}{\text{seg}} \quad (6)$$

Reemplazando la ec. (6) en la ec. (5)

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

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 homogé-

neo 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:

$$x'_{1/2} = \frac{1}{\mu_{01}} \quad (\text{cm}) \quad (8)$$

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. Todas estas consideraciones son válidas para:

- fuente de radiación puntual con detector o absorbente de reducida dimensión en medio homogéneo e isotrópico;
- fuente de radiación uniformemente distribuida en medio homogéneo e isotrópico y 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 (estos últimos son valores sólo aproximados) 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.

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:

$$\dot{D}_{\text{primaria}} \approx 1,6 \cdot 10^{-8} n \sum_i p_i (h\nu)_i \frac{(\mu_{a2}/\rho_1)_i}{(\mu_{01}/\rho_2)_i} \cdot (1 - e^{-\mu_{01} X}) \frac{\text{Rad}}{\text{seg}} \quad (9)$$

$p_i$  : 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 la ecuación (9) están referidos a la unidad de masa (g) del medio de acuerdo a lo expuesto en la ecuación (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  $\dot{D}_{\text{total}}$  resta considerar la fracción de energía absorbida debida a la radiación secundaria. Evans R. (16) 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 ( $\dot{D}_{\text{secundarias}}$ )

$$d \dot{D}_{\text{secundaria}} \approx \frac{\sigma_{sl}}{\mu_{01}} (\mu_{01} x) d \dot{D}_{\text{primaria}} \quad (10)$$

Reemplazando la ecuación (10) en la ecuación (7)

$$d \dot{D}_{\text{secundaria}} = \frac{\sigma_{s1}}{\mu_{01}} (\mu_{01} x) n h \nu \rho_1 \frac{\mu_{a2}}{\rho_2} e^{-\mu_{01} x} dx$$

$$\dot{D}_{\text{secundaria}} = \int d \dot{D}_{\text{secundaria}} = n h \nu \rho_1 \frac{\mu_{a2} \sigma_{s1}}{\rho_2 \mu_{a1}} \mu_{01} \int_0^x e^{-\mu_{01} x} dx$$

$$\dot{D}_{\text{secundaria}} = n h \nu \frac{\mu_{a2} / \rho_2}{\mu_{a1} / \rho_1} \frac{\sigma_{s1}}{\mu_{01}} \left[ 1 - e^{-\mu_{01} x} (1 + \mu_{01} x) \right] \quad (11)$$

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 las 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 estos detectores son además , más frágiles para operar en campaña.

## 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 (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:

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

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

Con el fin de conocer las concentraciones mínimas detectables (CMD) y medibles (CMM) se usan criterios de índole práctica que como los que damos a continuación sirven para comparar la eficiencia de distintos detectores frente a diversos nucleídos:

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

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

**F** : factor de calibración  $\left(\frac{\text{ctas}/\text{seg}}{\mu\text{c}/\text{m}^3}\right)$  ;

$n_F$  : contaje del fondo natural (ctas/seg).

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

## 2.6.0 COSTO Y DISPONIBILIDAD

De acuerdo a la expresión general de activación 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 ( $\sigma$ ), del número de átomos presentes en el nucleído original (N) y del flujo (F) de irradiación.

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

El costo parcial de los compuestos y procesamiento pre-irradiación de la mayoría de los trazadores que se usan en hidrología es 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) ..... \$ 28,00 (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/cm<sup>2</sup>/seg.

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

de 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 ( $^{24}\text{Na}$ ,  $^{82}\text{Br}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ) 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 nucleídeos 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.

### 3.0.0 TRAZADORES RADIACTIVOS EN AGUAS SUPERFICIALES

El aforo de fluidos en hidrología e ingeniería de procesos se realiza con técnicas e instrumental de eficiencia limitada por las características físicas y químicas del fluido, el tipo de conducto, canalización o lecho y el intervalo o escala de medición.

Cuando se conoce la sección transversal o "perímetro mojado" para medir el caudal -cantidad de fluido por unidad de tiempo- se usan:

- Limnímetros o escalas verticales graduadas, dispuestas en forma tal que una parte de la misma esté permanentemente inmersa en el agua. Estos equipos, colocados generalmente en la estación de aforo suelen estar equipados con registradores gráficos acoplados a flotadores y son insustituibles en estaciones fijas de control permanente. En relevamientos expeditivos, la calibración presenta escollos a veces insalvables ya que el caudal depende en este caso no sólo de la sección transversal sino, además, de las características topográficas del cauce aguas abajo y arriba de la estación de aforo (los métodos de medición de caudales con trazadores radiactivos son muy indicados para calibrar estas estaciones de aforo). El caudal aquí es función de  $Q = f(h, t, s)$ .

Q : caudal ( $m^3/seg$ );

h : altura medida sobre el limnómetro (m);

t : factor de corrección; función de la topografía aguas abajo y arriba de la estación;

S : sección del río o caudal ( $m^2$ ).

- Medidores de velocidad tipo turbina o molinete, por ejemplo el Price, Woltman, etc. El número de revoluciones es proporcional a la velocidad de la corriente quedando los resultados supeditados al estado mecánico de los mismos.

La relación entre las revoluciones por segundos  $n$  y la velocidad  $v$  en metros por segundo se expresa por una ecuación de la forma:

$$v = a + bn$$

$a$  : velocidad de arranque o velocidad necesaria para vencer el rozamiento mecánico;

$b$  : constante.

Este tipo de instrumental con caudal inferior al 5% del nominal da un considerable error por defecto. La precisión de la medición depende además del número de molinetes y la ubicación de los mismos en la sección de la medición.

Aquí también, por el hecho de medir velocidades en vez de caudal, es preciso conocer la sección de medición. Estos equipos además son afectados por remolinos, cambios de dirección de la corriente, etc.

La velocidad del molinete es función de la posición del mismo en la sección ya que existe, como es sabido, un gradiente vertical y otro horizontal. La velocidad media se encuentra en una posición comprendida entre el 0,2 y 0,8 de la altura (0 para nivel superior, 1 para fondo). No obstante los inconvenientes mencionados estos dos tipos de aforadores son insustituibles cuando se quiere medir en forma continua.

Los contadores tipo Venturi, Pitot, etc., miden la velocidad del fluido en base a manómetros diferenciales que controlan pérdida de carga o presión estática y dinámica entre la entrada y salida del cono reductor. Son usados generalmente en cañerías.

Hasta hace pocos años los aforos expeditivos, discontinuos o las calibraciones del instrumental antes mencionado en estaciones de aforo se realizaba con colorantes o soluciones salinas.

Con trazadores radiactivos es posible medir diluciones extremas y aforar caudales en un amplio rango (unos pocos litros/seg a 700-1000 m<sup>3</sup>/seg) con mediciones "in situ" e instrumental de reducido costo.

Las técnicas nucleares son particularmente aptas para: aforar ríos de montaña, de régimen turbulento y difícil acceso; calibrar el instrumental de medición de caudales en estaciones fijas de aforo; determinar la eficiencia de turbinas en estaciones hidroeléctricas; medir caudales en secciones sucesivas para determinar pérdidas entre las mismas.

### 3.1.0 DISTANCIA MINIMA DE BUEN MEZCLADO

Las partículas de un trazador ideal obedecen a las mismas leyes de movimiento que las partículas de las masas marcadas. A este enfoque hidrodinámico del problema cabría agregar el físico-químico que exige que el trazador no se pierda por absorción física-química, intercambio, precipitación, etc.

Al inyectar un trazador fluido o sólido en un medio de características similares (fluido o sólido) el trazador comienza a participar de la dinámica del sistema; fenómenos de difusión molecular, turbollinaria y particularmente transporte físico debido a la corriente, contribuyen a dispersarlo en las tres dimensiones de la corriente.

Durante un lapso más o menos corto, se establece, en la fase marcada un régimen "transitorio" durante el cual la dispersión o concentración del trazador en un instante y en cualquier sección varía considerablemente. Más allá en el tiempo y más allá en el espacio (aguas abajo del punto de inyección) la concentración en cada punto y en un instante tiende a ser constante. Comienza entonces un régimen "permanente" en el que

la concentración es prácticamente constante en cualquier punto de la sección en un instante dado e independiente de las condiciones en que el trazador fue inyectado, fig. 9.

En general se alcanza antes la dispersión uniforme longitudinal y en profundidad (en un instante) que la lateral. Esta última es, prácticamente, la que prefija la distancia mínima de buen mezclado en la mayoría de los casos.

Todo lo dicho es válido si durante el lapso que media entre la inyección del trazador y el paso de la última partícula marcada por el lugar de medición, el regimen del flujo es permanente o estacionaria (21). Cuando la velocidad es función del punto pero no del tiempo, el movimiento es permanente; en cambio si la velocidad en un punto cambió con el tiempo el movimiento es no permanente.

La distancia mínima de óptimo mezclado es función de:

a) la velocidad del fluido y por consiguiente del tipo de movimiento: laminar o turbulento. Con movimiento turbillionario se alcanza antes, en tiempo y espacio, el buen mezclado. fig. 10.

Del regimen laminar se pasa al regimen turbulento cuando el medio en movimiento pasa la denominada velocidad crítica superior y viceversa, se pasa del regimen turbulento al laminar, cuando se atraviesa la velocidad crítica inferior. Entre ambas velocidades el regimen es laminar inestable o turbulento inestable.

En canales o cañerías (l) fig. 9:

$$R_e = \frac{v_m d \rho}{\mu}$$

$R_e$  : número de Reynolds;

$v_m$  : velocidad media (cm/seg);

$\mu$  : viscosidad dinámica (g/cm seg);

$\rho$  : densidad (g/cm<sup>3</sup>);

d : diámetro del tramo cañería o canalización (valor medio en este último caso) (cm).

Para  $R_e < 1000$  el movimiento es laminar estable;

Para  $R_e > 10000$  el movimiento es turbulento estable.

Como límite frecuente se utiliza  $R_e = 2000$ .

En ríos:

Se puede adoptar un criterio similar. A los casos dudosos es difícil darle respuesta analítica.

En aguas subterráneas:

El límite superior de validez de las expresiones que definen la velocidad del fluido en medios porosos está definido para  $1 < R < 10$  mientras que se ha encontrado también movimiento laminar para  $1 < R < 700$ .

$$R_e = v_m \frac{\rho}{\mu} d$$

d: diámetro de las partículas.

b) la rugosidad de las paredes, superficie del lecho en el caso de ríos, granulometría o naturaleza del medio en aguas subterráneas, etc. fig. 10.

En la práctica se utilizan las siguientes expresiones para fijar las distancias mínimas de buen mezclado.

Tuberías o conductos forzados (inyección en el centro del conducto):

$$L_{\min} > 75 d$$

Si las instalaciones lo permiten es prudente duplicar este valor particularmente si la velocidad media de las partículas es baja, tendiendo al movimiento laminar.

Canales o ríos (23) (24) (25):

Fórmula de CREC:

$$L_{\min} > 9,5 n h = 9,5 \cdot 0,32 K R^{1/6} h = 3 h K R^{1/6}$$

fórmula de Rimmar:

$$L_{\min} > 0,13 N \frac{b^2}{h} \quad \text{siendo} \quad N = \frac{C (0,7 C + 6)}{g}$$

fórmula de Hull:

$$L_{\min} \geq a Q^{1/3}$$

$L_{\min}$  : distancia mínima de buen mezclado;

$d$  : diámetro de la tubería (m);

$h$  : tirante medio de agua (m);

$K$  : coeficiente de Strickler;

$R$  : radio hidráulico;

$n$  : relación entre la velocidad media y la velocidad de frotamiento;

$b$  : ancho medio de la sección de medición (m);

$c$  : coeficiente de Chézy :  $15 < c < 50$ ;

$g$  : aceleración de la gravedad (m/seg<sup>2</sup>);

$Q$  : caudal estimado (m<sup>3</sup>/seg);

$a$  : coeficiente;  $a=50$  con inyección en el centro;  $a=200$  con inyección lateral.

### 3.1.1 Verificación del mezclado (lateral)

Grado de mezclado: las expresiones anteriores han sido calculadas o verificadas para un grado de mezclado lateral inferior al 1%; es decir si tomamos simultáneamente por ejemplo tres muestras, dos laterales (margen izquierda y margen derecha) y una central, el grado de mezclado G (%) queda definido por:

$$G (\%) = \frac{1 - [(N_i - N_m) + (N_c - N_m) + (N_d - N_m)]}{3 N_m} 100$$

$N_i$  : total de cuentas de la muestra, tomado cerca de la margen izquierda;

$N_d$  : total de cuentas de la muestra, tomada cerca de la margen derecha;

$N_c$  : total de cuentas de la muestra, tomada cerca del centro;

$N_m$  : contaje promedio:  $N_m = \frac{N_i + N_d + N_c}{3}$

Este grado de mezclado debe ser inferior al 1% para alcanzar el "buen mezclado" antes expuesto.

### 3.1.2 Tiempo de paso de la "Ola radiactiva" o "Nube radiactiva" (pico).

Cuando se realiza una inyección instantánea en un conducto o canal, aguas abajo y en una sección distante x (m) de ese punto de inyección, el 99,9 % de la actividad ha pasado cuando transcurrió el tiempo T.

$$T (\text{seg}) = 9,3 \sqrt{\frac{m h x}{n v_m^2}}$$

m : coeficiente adimensional de dispersión longitudinal: 7,3 para canales y 10,1 para conductos forzados;

$n$  : relación entre velocidad media y velocidad de frotamiento

$v_m$  : velocidad media (m/seg).

En ríos es más difícil poder predecir este tiempo ya que sería preciso conocer coeficientes medios de dispersión longitudinal turbulentos, valores que, generalmente, no son conocidos. Es prudente comenzar a medir en el instante que se inyecta el trazador y terminar la operación cuando se ha restablecido la actividad del fondo natural, que se medía antes de la inyección. Este punto será ampliado más adelante.

### 3.2.0 METODOS DE MEDICION DE CAUDALES CON TRAZADORES RADIOACTIVOS

#### 3.2.1 Método de los "dos picos"

Este método que sólo es aplicable en conductos de sección o perímetro mojado conocido, consiste en inyectar en forma instantánea y puntual, en una sección del conducto, el trazador, y medir su paso con dos detectores instalados aguas abajo, que pueden estar sumergidos o en las inmediaciones de la cañería, cauce, etc.

Es conveniente para reducir el error, que la distancia entre la inyección y el primer detector sea superior a la distancia mínima de buen mezclado; mientras que la distancia que media entre los detectores debe ser superior a la distancia de interferencia de picos que es función de la dispersión longitudinal del trazador, la que, a su vez, depende de la distancia al punto de inyección, velocidad de respuesta de los equipos de medición y registro, etc. fig. II.

El caudal  $Q$  ( $m^3$ /seg) de acuerdo a la definición esta dado por:

$$Q = \iint_{\sigma} v d\sigma = v_m \sigma$$

V : velocidad instantánea.

La velocidad media ( $v_m$ ) cuando la distancia entre detectores ( $\Delta l$ ) es constante:

$$v_m = \frac{\Delta l}{n} \sum_i \left( \frac{l}{\Delta t} \right)_i = \Delta l \left( \frac{l}{\Delta t} \right)_m$$

n : número de partículas en movimiento.

En la fig. II se puede apreciar que la velocidad del centro de gravedad de la nube radiactiva ( $v_g$ ) está dado por la relación entre el caudal medido ( $Q_{\text{medido}}$ ) y la sección  $\sigma$

$$Q_{\text{medido}} = v_G \sigma = \Delta l \left( \frac{l}{\Delta t_m} \right) \sigma$$

Por otra parte el caudal medido será igual al caudal real o caudal dado por definición si:

$$v_G = v_m \cdot \left( \frac{l}{\Delta t_m} \right) = \left( \frac{l}{\Delta t} \right)_m$$

Cuando el movimiento es turbulento podemos decir que, prácticamente, la velocidad del centro de gravedad de la "nube radiactiva" es igual a la velocidad media de las partículas.

$$v_G \simeq v_m ; \quad 1 < \frac{v_G}{v_m} < 1,05$$

A medida que el movimiento tiende a ser laminar o que la dispersión longitudinal aumenta la relación anterior también aumenta. En casos especiales, tales como los que son frecuentes en aguas subterráneas o movimientos de sedimentos de fondo, es importante tener en cuenta la relación  $\beta$  (momentum o coeficiente de cantidad de movimiento)

ya que en movimientos laminares, bien definidos, la relación que sigue puede diferir considerablemente de uno.

$$\beta = \frac{v_G}{v_m}$$

La velocidad del centro de gravedad es, al menos formalmente, mayor que la velocidad media y en virtud de la proporcionalidad entre caudales y velocidades el caudal calculado a partir del baricentro es distinto, por exceso, al real.

La base teórica expuesta se cumple si:

- el caudal no varía durante el lapso que media entre la inyección y el pasaje del trazador por el segundo detector;
- la sección es constante entre los puntos de detección de la radiación;
- el fondo natural no varía durante el lapso antes mencionado;
- no hay aportes o pérdidas entre las secciones antes mencionadas.

El instrumental más apto para medir caudales con este método consta de dos detectores, fuente de tensión, integrador y registrador gráfico.

En virtud de tener que calcular el tiempo que media entre los dos baricentros en base a la distancia que hay entre los mismos, en el papel del registro gráfico, es aconsejable verificar si la velocidad nominal del registrador corresponde a la real.

$$Q_{\text{medido}} = v_G \sigma = \Delta l \left( \frac{l}{\Delta t_G} \right) \sigma \quad (12)$$

La velocidad del papel del registrador gráfico esta dada por:

$$v_{\text{papel}} = \frac{\Delta l_G}{\Delta t_G} \quad \cdot \cdot \cdot \quad \Delta t_G = \frac{\Delta l_G}{v_{\text{papel}}} \quad (13)$$

Reemplazando (13) en (12)

$$Q_{\text{medido}} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{seg}} \right) = \frac{\Delta l}{\Delta l_G / v_{\text{papel}}} \sigma$$

$\Delta l$  : distancia entre detectores (m);

$\Delta l_G$  : distancia entre baricentros, en el papel del registrador gráfico (cm);

$v_{\text{papel}}$  : velocidad del papel del registrador gráfico (cm/seg);

$\sigma$  : sección del conducto entre los puntos de medición (cm<sup>2</sup>).

Este método es considerado en general como el menos preciso de los aquí mencionados porque, igual que en los casos corrientes de aforo con instrumental convencional, lo que realmente medimos es velocidad en vez de caudal.

### 3.2.2 Método de las cuentas totales.

Este método fue desarrollado por D.D. Hull (26) (27) habiéndose ya difundido su uso para aforar gases o líquidos en tuberías, canalizaciones y ríos. Su uso es particularmente apto en el aforo de ríos de montaña o bien grandes caudales ya que la actividad a usar en cada medición es inferior a la que debería usarse con otros métodos.

La técnica consiste en adicionar en un lapso relativamente corto, una actividad conocida de trazador radiactivo y medir, aguas abajo, la variación de la actividad a su paso frente al lugar de detección.

Con caudal  $Q$  constante (régimen permanente) la concentración en el lugar de medición, varía en función del tiempo, distancia al punto de inyección, características de la corriente y del tiempo invertido en inyectar el nucleído.

Respecto al método anterior tiene la ventaja de que no es necesario conocer la sección del río o canal en el lugar de aforo y además sólo se necesita un cabezal de medición: se mide realmente el caudal y no la velocidad.

Si el detector tiene una respuesta  $R_t$  (ctas/seg) lineal respecto a la concentración  $c_t$  ( $\mu\text{c}/\text{m}^3$ ):

$$R_t \left( \frac{\text{ctas}}{\text{seg}} \right) = F \left( \frac{\text{ctas/seg}}{\mu\text{c}/\text{m}^3} \right) c_t \left( \mu\text{c}/\text{m}^3 \right) \quad (14)$$

y el contejo neto, en el lugar de medición al paso de la actividad será (fig. 4):

$$N = \int_{t(a)}^{t(b)} R_t dt \quad \therefore \quad N = F \int_{t(a)}^{t(b)} c_t dt \quad (15)$$

$N$ : contejo total entre  $t(a)$  y  $t(b)$  (cuentas)

El valor  $F \left( \frac{\text{ctas/seg}}{\mu\text{c}/\text{m}^3} \right)$  es denominado constante de calibración y como veremos mas adelante debe ser determinado con el mismo detector, nucleído y "geometría" que la que se utiliza en la medición del caudal.

Por definición el caudal  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{seg}$ ), constante durante la experiencia, está definido por:

$$Q = \frac{dV}{dt} \quad \therefore \quad dt = \frac{dV}{Q} \quad (16)$$

Reemplazando (16) en (15)

$$N = \frac{F}{Q} \int_{t(a)}^{t(b)} c(t) dV \quad (17)$$

Como es dable apreciar la expresión bajo el signo de integración no es otra cosa que la actividad inyectada  $A$  ( $\mu\text{c}$ ):

$$\int_{t(a)}^{t(b)} c_t dV = A \quad (18)$$

$dV$  : volumen elemental del medio homogéneo e isotrópico, marcado, que enfrenta al detector.

Por último entonces, el número de cuentas totales netas registradas entre

$t_{(a)}$  -  $t_{(b)}$  estará dado por:

$$N = \frac{F}{Q} A \quad . \quad . \quad Q = F \frac{A}{N} \quad (19)$$

Este razonamiento es válido si:

- La actividad inyectada  $A$  llega al punto de medición sin perderse parte en el camino, por adsorción, intercambio, etc.:

$$\int_{t(a)}^{t(b)} c_t dV = A$$

- La concentración  $c_t$  (actividad por unidad de volumen) en un instante dado sea la misma en cualquier punto de la sección de medición. Si la distancia inyección-medición supera la distancia mínima de buen mezclado, esta condición se cumple:

$$\int_{t(a)}^{t(b)} c(t) dt = \text{cte}$$

- La constante  $F$  fue determinada con el mismo detector, nucleído e "idéntica geometría".

- La constante  $F$  y la medición del caudal se realizaron en el rango en que la respuesta del detector  $R_t$  respecto a la concentración  $c_t$  es lineal.

- El fondo natural en el lugar donde está colocado el detector no varía durante

el intervalo de medición.

- El período de semidesintegración del nucleído es grande respecto al lapso de la experiencia. La actividad usada debe corregirse por decaimiento respecto a la de calibración.

- El tiempo o intervalo de contaje  $[t_{(a)} - t_{(b)}]$  es igual o superior al tiempo de pasaje de la "ola radiactiva".

El valor de  $N$  expuesto en (6) está referido al contaje neto, es decir: al contaje total debe deducirse el contaje del fondo natural  $n_F$  acumulado durante el mismo lapso. Como  $n_F$  no puede ser discriminado del contaje total  $N_T$  durante la experiencia, preciso es suponer que, durante el tiempo de contaje, el fondo se mantuvo constante.

$$N = N_T - n_F (t_{(b)} - t_{(a)}) \quad ; \quad n_F \text{ (ctas/seg) = cte}$$

Como podemos apreciar el método no sólo es válido para trazadores radiactivos, sino, también, para cualquier otro tipo de indicadores ya que si reemplazamos la actividad  $A$  por la masa de trazador  $M$  en (5) y la concentración  $c_{(t)}$  se refiere a esa masa, queda:

$$M = \int_{t_{(a)}}^{t_{(b)}} c_{(t)} \, dV \quad \int_{t_{(a)}}^{t_{(b)}} c_{(t)} \, dQ \, dt = Q \int_{t_{(a)}}^{t_{(b)}} c_{(t)} \, dt$$

$$Q = \frac{M}{\int_{t_{(a)}}^{t_{(b)}} c_{(t)} \, dt}$$

### 3.2.2.1. Constante de proporcionalidad o calibración (F)

Es la respuesta  $n_c$  (ctas/seg) del detector e instrumental asociado para una determinada concentración de trazador:

$$F = \frac{n_c}{A_c/V_c} \left( \frac{\text{ctas/seg}}{\mu\text{c/m}^3} \right)$$

$n_c$  : respuesta del detector (ctas/seg);

$A_c$  : actividad usada en la calibración ( $\mu\text{c}$ );

$V_c$  : volumen del recipiente de calibración ( $\text{m}^3$ ).

Depende del instrumental de medición, del nucleido y de la "geometría" de detección; por lo tanto su determinación debe hacerse en condiciones similares a las de medición, en el río, canal o tubería.

Si el detector es sumergido en el río y el volumen de agua que lo rodea es superior al volumen sensible de detección, la calibración debe hacerse en un recipiente cuyas dimensiones superen o contengan por lo menos a una esfera cuyo radio sea superior a siete veces el recorrido promedio ( $x'_{1/2}$ ) de los fotones primarios en agua.

Para la mayoría de los radioisótopos que se usan en hidrología han sido determinados los valores de  $x'_{1/2}$  en la tabla III.

$$x'_{1/2} = \frac{1}{\mu_{01}} ; x'_{\omega} > 7 x'_{1/2}$$

$\mu_{01}$  : coeficiente de atenuación lineal en agua ( $\text{cm}^{-1}$ ).

Si se trata de medir caudales en cañerías con el detector adosado a la superficie de la misma la constante de calibración se determinará con un tramo de cañería convenientemente elegido, de manera que el "volumen visto" por el detector o sonda resulte similar al de trabajo en campaña. Para reducir la longitud del caño a usar en

la calibración puede apelarse a una adecuada calibración del detector.

En este tipo de calibración estática es importante conocer la actividad y el volumen marcado con bastante precisión ya que el error se propagará en la medición del caudal. Lo aconsejable, cuando se quieren realizar aforos de precisión es usar en la calibración una alícuota de la actividad a emplear en el aforo, para compensar errores, ya que la actividad absoluta de los nucleidos en general está dada con un error relativamente grande e incompatible con la precisión que se busca con este método. En caso de usar una alícuota de la actividad empleada en el aforo tendremos:

$$F = \frac{n_c}{A_c/V_c} \left( \frac{\text{ctas/seg.}}{\mu\text{c/m}^3} \right) \quad (20)$$

Reemplazando la ecuación (7) en la ecuación (6):

$$Q = \frac{n_c}{A_c} \frac{A}{N} V_c \quad (21)$$

De esta manera se reducen los errores ya que si las actividades A y  $A_c$  provienen de dos fraccionamientos distintos, en los que es dable esperar en algunos casos errores de hasta  $\pm 5\%$ , su propagación en la expresión (21) afectaría considerablemente la precisión con que es medido el caudal Q. Si usamos una alícuota, en cambio, no interesa la calibración de actividad y solamente los errores de medición de volúmenes o masas en la dilución deben considerarse.

Es preciso aquí hacer notar que el orden de magnitud de A respecto de  $A_c$  para caudales del orden de  $20 \text{ m}^3/\text{seg}$  difiere entre cuatro y cinco cifras significativas.

La calibración estática hasta aquí desarrollada puede reemplazarse por

una calibración dinámica en caso de conocerse el caudal o gasto (Q) con suficiente precisión:

$$Q = F \frac{A}{N} \quad \therefore \quad F = Q \frac{N}{A}$$

La constante de proporcionalidad F, así determinada, puede usarse en la medición de otros caudales siempre que el detector, instrumental asociado, núcleo y geometría de medición no difieran.

### 3.2.2.2. Cálculo de la actividad necesaria.

El número de cuentas totales netas N registradas, depende de la actividad inyectada, del caudal y de la constante de calibración de acuerdo a (19)

$$N = F \frac{A}{Q} \tag{22}$$

La desviación standard relativa  $\frac{\sigma N}{N}$  está dada por:

$$\frac{\sigma N}{N} = \frac{1}{N} \sqrt{(N + N_F) + N_F} = \frac{1}{N} \sqrt{N + 2N_F}$$

$$100 \frac{\sigma N}{N} = \left( \sqrt{\frac{N}{N^2} + \frac{2 N_F}{N^2}} \right) 100 = p (\%) \tag{23}$$

Siendo p la precisión porcentual que obtendremos en la medición del caudal. Reemplazando (22) en (23):

$$\frac{\sigma N}{N} = \sqrt{\frac{Q}{F A} + 2 n_F t \frac{Q^2}{F^2 A^2}} = \frac{p}{100} \cdot \frac{p^2}{100^2} \frac{Q}{F A} + 2 n_F t \frac{Q^2}{F^2 A^2}$$

Multiplicando por A<sup>2</sup> e intercambiando términos:

$$\frac{p^2}{100^2} A^2 - \frac{Q A}{F} - 2 n_F t \frac{Q^2}{F^2} = 0$$

Resolviendo esta ecuación de segundo grado nos queda:

A : actividad a inyectar ( $\mu\text{c}$ );

Q : Caudal estimado ( $\text{m}^3/\text{seg}$ );

F : constante de calibración;

$n_F$ : contaje de fondo (ctas/seg)

p : precisión buscada; teniendo en cuenta el error estadístico (%);

t : tiempo de contaje mayor o igual al de pasaje de la "ola radiactiva" (seg).

La solución de esta ecuación está dada por:

$$\frac{F A}{Q} = \frac{\frac{Q}{F} \pm \sqrt{\frac{Q^2}{F^2} + 8 \frac{p^2}{100^2} n_F t} \cdot \frac{Q^2}{F^2}}{\frac{Q}{F} \cdot \frac{2 p^2}{100^2}} = \frac{\frac{Q}{F} \pm \frac{Q}{F} \sqrt{1 + \frac{8 p^2}{100^2} n_F t}}{\frac{2 p^2}{100^2} \cdot \frac{Q}{F}} =$$

$$\frac{100^2 \pm 100^2 \sqrt{\frac{100^2 + 8 p^2 n_F t}{100^2}}}{2 p^2} = \frac{100^2 \pm 100 \sqrt{100^2 + 8 p^2 n_F t}}{2 p^2}$$

Por último tendremos que la actividad a inyectar en una medición de caudales por el método de las cuentas totales será igual o mayor que  $A_{\min}$  ( $\mu\text{c}$ ) si se quiere obtener un error estadístico relativo menor que p (%):

$$A_{\min} (\mu\text{c}) \geq \frac{Q}{F} \frac{100^2 \pm 100 \sqrt{100^2 + 8 p^2 n_F t}}{2 p^2} \quad (24)$$

### 3.2.2.3. Formas de medición o variantes del método.

El método de las cuentas totales es indicado para medir gastos de fluidos diversos y aún sólidos. La detección de la actividad puede ser continúa (sonda sumergida, semisumergida o adosada a cañerías) o bien discontinúa, por extracción de mue

tras periódicas.

Cuando el tirante de agua o ancho de la sección de medición es inferior a  $7 \times 1/2$ , ó bien cuando el río arrastra piedras, cantos rodados u otro tipo de sedimentos que no hacen aconsejable introducir el detector en la sección del mismo, es conveniente extraer durante el lapso de medición un caudal  $q$  constante y hacerlo pasar por un recipiente ad-hoc, en el centro del cual se coloca el detector y de esta manera medir el caudal principal  $Q$ . En este caso, como es obvio, la constante de calibración debe determinarse en el mismo recipiente e idéntica geometría.

Cuando la medición se realiza extrayendo muestras periódicas debemos tener en cuenta que (fig. 12)

$$Q = \frac{A}{\int_{t(b)}^{t(a)} c(t) dt} = \frac{A}{c_m (t(a) - t(b))}$$

Este método nos permite medir la concentración  $c_m$  durante el lapso  $[t(a) - t(b)]$  o mayor y así mejorar la estadística del contaje. Aquí también debemos tener en cuenta que el factor  $F$  ha de determinarse con idéntica geometría. La frecuencia con que han de extraerse las muestras y el volumen será tal que resulten representativas de la dinámica del trazador en la sección de medición.

Guizerix et all (23) preconizan el uso de una variante de éste método de muestreo que consiste en recoger de la corriente principal, un caudal constante  $q$  y almacenarlo en un recipiente para después medir la concentración promedio:

$$\frac{Q}{q} = \frac{A}{a} \text{ y } \frac{a}{A_c} = \frac{N/t}{n_c} \quad \therefore \quad a = A_c \frac{N/t}{n_c}$$

$q$  : caudal constante derivado hacia el recipiente de medición ( $m^3/\text{seg}$ );

a : actividad total derivada de la corriente principal ( $\mu\text{c}$ ) y almacenada en el recipiente ;

$A_c$ : actividad usada en la calibración ( $\mu\text{c}$ );

$n_c$ : actividad medida en la calibración (ctas/seg);

t : tiempo de contaje de la actividad recogida en el río (seg).

El caudal se calcula a partir de:

$$Q = q \frac{A}{a} \quad \cdot \quad Q = \frac{A}{A_c} \frac{n_c}{N} q t$$

La actividad a inyectar (A), en este caso estará dada por la relación (4):

El valor de q se fija a priori en función del tiempo estimado de pasaje de la "ola radiactiva" o bien calculado de acuerdo a la expresión que antes expusiéramos.

El volumen del recipiente que utilizan generalmente quienes preconizan este método es de 18 litros y recogen agua hasta completar ese volumen.

$$q = \frac{18}{t_{(a)} - t_{(b)}} \left( \frac{1}{\text{seg}} \right)$$

El volumen de 18 litros ha sido fijado teniendo en cuenta problemas de transporte, portabilidad a los lugares de medición, etc. Sin embargo, el volumen óptimo para emisores gamma de alta energía es considerablemente mayor si queremos llegar a medir con "volumen infinito".

Estos métodos de muestreo, continuos o discontinuos tienen la ventaja de permitir un contaje total N tal que el error estadístico pueda reducirse a su mínima expresión. Por otra parte, la toma de muestras puede realizarse en un costado o bien del centro de la corriente principal permitiendo así reducir el error o compro-

bar la falta de homogeneidad de la concentración de trazador en función de las coordenadas del punto de extracción.

Este método es muy recomendable para medir caudales utilizando como trazador el tritio.

#### 3.2.2.4. Sistemas de inyección.

Cualquier dispositivo que permita volcar la solución trazadora preferentemente en el centro de la canalización, río o tubería en un lapso relativamente corto puede utilizarse.

En nuestros trabajos de campaña utilizamos generalmente un recipiente de cinco litros, el que, mediante un dispositivo de roldana y guía se desliza sobre una soga que está sostenida desde ámbas márgenes del río. Cuando el recipiente portador de la solución trazadora (1 a 3 litros aproximadamente) llega al centro del cauce, mediante un dispositivo de seguridad accionado por comando mecánico desde una de las márgenes, el recipiente vuelca todo su contenido.

#### 3.2.2.5. Corrientes divergentes.

La medición del caudal  $Q$  de una canalización, río o tubería puede realizarse en un afluente o subsidiario siempre que la distancia entre el punto de inyección y el punto de divergencia sea superior a la distancia mínima de buen mezclado.

(fig. 13)

Si el subsidiario lleva la fracción  $xQ$  del caudal principal  $Q$  también llevará la fracción  $xA$  de la actividad inyectada, por esa razón de (6):

$$N = \frac{x_A}{x_Q} \quad \cdot \quad N = \frac{A \cdot F}{Q}$$

Es decir, se puede medir en el afluente, el caudal del principal en caso de cumplirse la condición de mezclado antes de la divergencia. Esta ventaja del método puede ser útil en caso de cañerías principales inaccesibles o ríos con tramos de difícil acceso.

### 3.2.3. Método de inyección continua o dilución.

Constituye una variante de forma, mas que de fondo al método anterior.

Al comparar la concentración de trazador  $C$  que se inyecta con caudal  $q$  constante con la concentración  $C_2$  que se mide (por inmersión o muestreo) aguas abajo tenemos que (fig. 14):

$$Q C_0 + q C_1 = (Q + q) C_2$$

$Q$  : caudal a medir ( $m^3/seg$ );

$C_0$  : concentración del trazador que concebiblemente podría estar incorporado al curso del fluido ( $\mu c/m^3$ );

$q$  : caudal inyectado, constante ( $m^3/seg$ );

$C_1$  : concentración de trazador inyectada ( $\mu c/m^3$ );

$C_2$  : concentración de trazador medida ( $\mu c/m^3$ )

Generalmente es:  $C_0 = 0$  ;  $C_1 \gg C_2$  y  $q \ll Q$

$$qC_1 = QC_2 \quad \therefore \quad Q = q \frac{C_1}{C_2} \quad (25)$$

Igual que antes, si las concentraciones fueron medidas con el mismo instrumental de detección, nucleido, "geometría" y la respuesta del detector es lineal en el intervalo de concentraciones señalado tendríamos:

$$Q = q \frac{R_1}{R_2}$$

$R_1, R_2$  : respuesta del instrumental de medición en la medición de  $C_1$  y  $C_2$   
(ctas/seg).

Este método es también independiente de la velocidad y por consiguiente aplicable en los casos de secciones desconocidas.

El razonamiento expuesto es válido si se cumple que:

- Parte del trazador no se pierda por adsorción, precipitación, etc., entre el punto de inyección y medición.
- La concentración  $C_2$  en la sección de medición es constante. Es decir se ha alcanzado la meseta de la curva  $C = f(t)$ . (fig. 14)
- El fondo natural no varió durante la experiencia.
- El regimen es permanente.

### 3.2.3.1. Cálculo de la actividad a inyectar.

En este método la actividad mínima a inyectar, calculada en forma similar y análogas consideraciones que antes está dada por:

$$A_{\min} \geq q C_1 \left( \frac{\mu\text{c}}{\text{seg}} \right) = \frac{Q}{F} \frac{100^2 + 100 \sqrt{100^2 + 8 n_F p^2 t}}{2 p^2 t}$$

$q$  : caudal constante inyectado ( $\text{m}^3/\text{seg}$ );

$C_1$  : concentración inyectada  $\mu\text{c}/\text{m}^3$ ;

$t$  : tiempo de contaje. (Con integrador  $t = 2 RC$ );

$n_F$  : actividad del fondo natural (ctas/seg);

$p$  : precisión buscada.

### 3.2.4. Comparación entre los métodos descriptos.

El método denominado de los "dos picos" requiere el uso de dos cabezales de detección y además es preciso conocer la sección por donde escurre el fluido mientras que en los dos restantes métodos un sólo detector basta y no es preciso conocer la sección de medición.

Sin embargo en éstos últimos es preciso realizar calibraciones previas a las mediciones para comparar las concentraciones inyectadas y las que pasan por el lugar de medición.

Las sondas o detectores a usar en campaña para medir caudales por el método de dilución o de las cuentas totales no difiere considerablemente y se acondicionan de acuerdo a la variante adoptada (medición continua directa, indirecta, o por muestreo).

El instrumental electrónico asociado a los detectores cuando se usa el método de las cuentas totales es muy elemental; un escalímetro y una fuente de tensión bastan. Lo mismo podríamos decir del sistema de inyección del trazador, mientras que para inyectar una solución con caudal constante durante un cierto lapso (método de dilución) el sistema mecánico es mas complejo y difícil de operar con condiciones geográficas o meteorológicas desfavorables, como ocurre frecuentemente en hidrología.

En el método de dilución el error relativo en caso de ser  $q$  y  $Q$  constantes estará dado por:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \sqrt{\left(\frac{\Delta C_1}{C_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_2}{C_2}\right)^2} \quad (26)$$

Como podemos apreciar en la fig.14, la actividad que llega al detector antes

de alcanzar el nivel  $C_2$  y la que pasa durante el descenso de la curva no participan del contaje.

En el método de las cuentas totales con detector sumergido la desviación standard estará dada por (fig. 12)

$$\sigma_1 = \left( \int_{t(a)}^{t(b)} R(t) dt \right)^{1/2} \quad (27)$$

En cambio si tomamos muestras continuas o periódicas y después se almacenan, homogenizan y se cuenta la actividad tendremos una desviación standard

$$\sigma_2 = \left[ R_m (t(b) - t(a)) \right]^{1/2} \quad (28)$$

Suponiendo que el tiempo de contaje en (27) y (28) sea el mismo es dable observar que para obtener la misma desviación standard en ambos casos sería necesario recoger un volumen de agua muy grande (función del volumen sensible de detección del detector sumergido).

### 3.3.0. ESTUDIOS DE DIFUSION Y DISPERSION

La determinación de la velocidad de difusión y dispersión en mares, lagos, estuarios, etc. es estudiada frecuentemente con el objeto de conocer el destino de desechos industriales, municipales, aguas servidas o residuales.

Estos estudios suelen además realizarse en cañerías o canales que transportan dos o mas fluidos para determinar la o las interfases.

La distribución de concentraciones  $C_{(x,t)}$  en función de la distancia  $x$  (en cualquier dirección) al punto de inmersión instantánea de trazador A y al tiempo  $t$  necesario para recorrer ese trayecto sigue una ley (28) (29):

$$C(x,t) = \frac{A}{S \sqrt{4 D t}} \exp \left[ -(x - v_m t)^2 / 4 D t \right] e^{-\lambda t}$$

$C(x,t)$  : concentración en un punto distante  $x_{(m)}$  del lugar de inmersión, al tiempo  $t$  (seg);

$D$  : coeficiente de dispersión ( $m^2$ /seg) en este caso longitudinal;

$A$  : actividad inyectada ( $\mu c$ );

$\lambda$  : constante de decaimiento del nucleido utilizado ( $seg^{-1}$ );

$S$  : sección promedio ( $m^2$ ).

Estos coeficientes  $D$  pueden ser determinados con trazadores radiactivos por inyección puntual e instantánea en el lugar seleccionado y después detectado el paso del trazador aguas abajo, en distintos puntos.

Hull D. E. (11) determinó experimentalmente el coeficiente de difusión turbulenta  $D$  para distintos tramos del American River

$$10(m^3/seg < Q < 30(m^3/seg)$$

y algunos canales encontrando la relación:

$$D \simeq 2,5 (Q v_m)^{1/2} \quad (29) ; \quad D = \frac{W^2 v_m^3}{11,1 L}$$

$D$  : coeficiente de dispersión turbulenta ( $ft^2$ /seg);

$Q$  : caudal ( $ft^3$ /seg);

$v_m$  : velocidad media ( $ft$ /seg);

$W$  : ancho a mitad de altura (seg);

$L$  : distancia ( $ft$ ).

En la figura 15 hemos graficado la expresión (1). Cabe agregar que la velocidad media es definida en este trabajo como relación entre la distancia entre dos estaciones de observación y el tiempo comprendido entre el pasaje de los "picos de activi-

dad" de los puntos de observación.

A partir de estas expresiones sería, por ejemplo, posible estimar el tiempo de pasaje de la "ola radiactiva" en un punto del canal o río conociendo caudales y velocidades medias.

En la fig. 16a y 16b se representan distintos parámetros de dispersión longitudinal y transversal correspondientes a un estudio realizado en el río Danubio (53) utilizando la técnica de inyección instantánea con  $^{82}\text{Br}$  de trazador.

Puede apreciarse que la concentración máxima decrece, en función de la distancia al punto de inyección, de acuerdo a una función de tipo exponencial

Estudios de dispersión de nieve y sectores de glaciares se han realizado también utilizando estas técnicas.

En nuestro país se han realizado estudios de dispersión con el objeto de mejorar diseños de piletas recuperadoras de hidrocarburos. Trabajos similares podrían encararse para evaluar diseños y condiciones de trabajo en piletas o depósitos de decantación, plantas de purificación, etc.

En la bibliografía adjunta podrán encontrarse otros estudios de esta naturaleza, realizados con diversos fines en distintos medios superficiales (31) (32)

#### 3.4.0. TECNICAS DE APLICACION EN PERFORACIONES

#### Y TRANSPORTE DE FLUIDOS.

##### 3.4.1. Generalidades

El notable incremento apreciado en el uso de trazadores radiactivos (particularmente en los últimos años) se debe a la posibilidad que ofrecen los radioisótopos de resolver eficaz y racionalmente múltiples problemas industriales y geofísicos.

Es así como los trazadores radiactivos han reemplazado o desbordado a las técnicas convencionales al superar las limitaciones de las mismas, abriendo además nuevos campos en la investigación y control de procesos (33) (34).

El análisis global de una experiencia con trazadores radiactivos nos permite apreciar que las etapas que la conforman no difieren de las usuales con trazadores o técnicas convencionales.

- Primera etapa: marcación del producto, compuesto o elemento a seguir y controlar. En ella es preciso, generalmente, lograr identificación física, química y cinemática entre el trazador y el medio en estudio.

- Segunda etapa: inyección del trazador radiactivo o producto marcado. La misma puede ser continua o instantánea.

- Tercera etapa: medición y control (continuo o por muestreo) en la fase final y/o intermedias del proceso en estudio.

Las ventajas de los trazadores radiactivos en las etapas numeradas son las siguientes:

- La variedad y disponibilidad de radioisótopos permite superar la mayoría de los problemas derivados de la fidelidad necesaria en toda marcación. Los reactores nucleares destinados a producir radioisótopos (R.A.1 y R.A.3 en la Argentina) han contribuido a aumentar el número y la actividad específica de los nucleidos disponibles, disminuyendo también sus costos.

- La detección y medición de los radioisótopos se realizan sin contacto, en forma continua y con alta sensibilidad. No se alteran, en consecuencia, ni el proceso ni la composición de sus fases.

Este capítulo es un resumen de algunas de las aplicaciones mas conocidas de los trazadores radiactivos y otras técnicas nucleares en la prospección y transporte de líquidos en general.

En algunas de las aplicaciones aquí descritas hemos confrontado, al menos someramente, las técnicas convencionales con las nucleares para acentuar la necesidad de evaluar las ventajas y limitaciones de las mismas antes de optar por alguna de ellas.

### 3.4.2. Perforaciones

#### 3.4.2.1. Perfilaje de pozos.

La naturaleza, textura y composición de los estratos permeables e impermeables atravesados por los pozos puede ser conocida midiendo la radiactividad gamma natural de dichos estratos. Este método (en ciertos terrenos) es mas sensible que el de prospección eléctrica.

Bajas actividades indican la presencia de carbones, dolomitas  $(\text{Co}_3)_2$  MgCa., gres y areniscas, esquistos y muy altas actividades denotan altas leyes de uranio y potasio (35). Las arcillas y lutitas contienen generalmente, altas concentraciones de uranio y potasio siendo, por esta razón, perfectamente detectables con el perfilaje gamma natural.

Es bien sabido que los perfilajes eléctricos o sónicos sólo pueden efectuarse en perforaciones no entubadas. El perfilaje gamma natural puede ser ejecutado en perforaciones entubadas o sin entubar.

Sintetizando lo expuesto es conveniente recordar que el perfilaje gamma na-

tural es de gran utilidad para:

- Definición y correlación de estratos.
- Determinación de superficies de contacto o interfases.
- Localización de formaciones lutíticas o arcillosas con alta resolución.

En los trabajos de prospección se emplean sondas con detectores tipo G. M. de alta sensibilidad o bien cristales de centelleo asociados a fotomultiplicadores. Estos últimos permiten discriminar energías lográndose así una información más precisa sobre los elementos naturales presentes en los estratos.

La prospección eléctrica y la gamma natural no son excluyentes; complementando ambas se logra una información mas amplia.

En la prospección de petróleo o provisión de agua para importantes centros de consumo adquieren relevante papel los equipos nucleares, provistos de fuentes de neutrones para determinar el contenido de Hidrógeno proveniente del agua o el petróleo (sin discriminación) o bien analizar por activación neutrónica los distintos componentes del sub-suelo.

Análisis de algunos perfilajes:

En la fig. 18 se puede apreciar buena definición y correlación para el método eléctrico (potencial espontáneo) y gamma natural en una litología tipo arena-arcilla (36).

En la fig. 19 se aprecia la perfecta armonía que existe entre el perfilaje gamma natural con pozo entubado y sin entubar (36).

El perfilaje gamma natural ha sido también confrontado con el perfilaje neutrónico en la fig. 20. El resultado también es, en este caso, satisfactorio para ambos

perfilajes (35).

La fig. 21 permite observar que en esa litología no se identifica aceptablemente la interfase agua-petróleo (o petróleo-gas) mediante el uso del perfilaje gamma natural. La combinación de dos perfilajes gamma ( $n - n$  y  $n - \gamma$ ) identifica, en cambio, esas interfases. (37)

#### 3.4.2.2. Determinación de permeabilidad y porosidad.

Existe una relación empírica entre la permeabilidad y la porosidad de los estratos. Esta relación tiene un intervalo de validez limitado de acuerdo al tipo de formaciones geológicas.

El gradiente de resistividad (o su inversa, conductividad) de las formaciones puede ser relacionado con la permeabilidad de los estratos en ciertos casos (16)

El perfilaje neutrónico permite definir la porosidad en relación con el contenido de agua o hidrocarburos (sin discriminación) que llenan los espacios libres y poros intercomunicados de las formaciones geológicas. La señal o información recibida incluye además, sin discriminar, el agua de constitución de los elementos presentes (abundante sobre todo en las arcillas y las lutitas).

He aquí planteada, al menos someramente, la complejidad del problema y la necesidad de acudir a dos o mas técnicas para lograr una información confiable.

Por estas razones las investigaciones de porosidad y permeabilidad se suelen complementar inyectando agua marcada con un emisor gamma o beta en el pozo. Después de un exhaustivo lavado los estratos mas porosos quedan contaminados y pueden así ser localizados y definidos respecto a los menos porosos. En estas operaciones se suele emplear carbón activo saturado de radón, vidrio en polvo con  $^{46}\text{Sc}$

6 perlas plásticas marcadas con distintos emisores gamma ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{24}\text{Na}$ , etc.).

Con el fin de resaltar la necesidad de realizar en ciertas circunstancias experiencias simultáneas con distintas técnicas, acorde con las limitaciones propias de las mismas o las características particulares de los estratos atravesados, se exponen en la fig. 22 una serie de perfilajes realizados empleando los métodos mencionados.

#### 3.4.2.3. "Punzonamiento" de camisas y cemento.

Un método muy difundido para perforar o "punzar" la camisa y el cemento de los pozos es el uso de cañones o explosivos colocados en niveles preestablecidos en correspondencia con los horizontes o estratos a explotar, de acuerdo a los estudios previos del sub-suelo. El número de balas por unidad de longitud es proporcional a los caudales previstos en los distintos estratos. Marcando estas balas con emisores gamma de periodo de semidesintegración compatible con las necesidades, se logra localizar con precisión los niveles de punzado y verificar el resultado de estas operaciones.

El registro gráfico de la fig. 25 indica la posición exacta de las perforaciones triples logradas marcando las balas con  $^{192}\text{Ir}$ . (38).

En el sur de EEUU existen pozos con entubaciones múltiples. En ellos es preciso punzar camisas y cemento evitando perforar o destruir las cañerías adyacentes pues cada tubería realiza extracciones de distintos niveles u horizontes de producción. En estos casos las ristras o conjuntos de balas son orientados mediante el uso de detectores colimados colocados en el cañón. Las fuentes descienden independientemente por las tuberías adyacentes y son colocados al mismo nivel que el cañón. Las

balas se disparan luego en la dirección opuesta a la máxima o máximas señales.

#### 3.4.2.4. Control del cementado.

Después de haber cementado en torno y por debajo de las entubaciones es preciso controlar el nivel superior a que ha llegado el cemento y además conocer aproximadamente la distribución de masas de cemento en torno a la cañería. En este control compiten y en algunas ocasiones se complementan dos técnicas: control de cementación con radioisótopos y control de cementación con perfilaje térmico.

La técnica con radioisótopos consiste en incorporar al cemento pequeñas cantidades de minerales de uranio o minerales ricos en potasio (carnotita). Un simple detector gamma, operado desde la superficie permite conocer durante el fraguado o después del mismo la distribución aproximada del cemento en torno a la tubería y su nivel superior. Otros radioisótopos de periodo corto pueden competir con los ya mencionados ( $^{24}\text{Na}$ ,  $^{131}\text{I}$ , etc.).

El perfilaje por temperatura aprovecha el calor desarrollado durante el fraguado para localizar el nivel superior del cementado y la distribución aproximada del mismo a distintos niveles. Esta técnica solo es aplicable durante el fraguado (10 horas después de la colada con cementos comunes). El método radiactivo no tiene esta limitación y permite obtener una mejor información ya que, si se elige un trazador de energía adecuada, es posible definir mejor los espesores de cemento que rodean las cañerías. Generalmente se obtiene con ellos mayor sensibilidad y resolución. Sin embargo tienen el inconveniente de las contaminaciones residuales que podrían perjudicar otras mediciones posteriores.

En la fig. 24 se representan dos registros gráficos que permiten apreciar

la mayor resolución y sensibilidad del método radiactivo. Ambos perfilajes pertenecen al mismo pozo. (39)

El perfilaje ultrasónico permite verificar la adherencia cemento-entubación. Otras técnicas patentadas y empleadas con exclusividad por compañías dedicadas a la prospección de los recursos petrolíferos dan información sobre la impermeabilización lograda entre el cemento y los estratos.

### 3.4.3. Explotación.

#### 3.4.3.1. Producción y recuperación secundaria.

Las posibilidades de aplicar las técnicas nucleares en esta etapa de la explotación de recursos petrolíferos son amplias y diversos los trabajos que realizan ya en nuestro país y a nivel comercial, las empresas contratistas de servicios. En hidrología estas técnicas no están muy difundidas aún ya que el costo de las mismas incide mas, en algunos casos, sobre los niveles de rentabilidad de las mismas.

Control de los procesos de acidificación. Con el fin de aumentar la permeabilidad de los estratos que contienen petróleo se inyectan soluciones ácidas.

Marcando con un trazador radiactivo el ácido es posible reconocer el nivel o interfase a que se realiza el ataque. Las fig. 17 y 26 contribuyen a aclarar la técnica. (39)(40). La solución ácida, marcada generalmente con  $^{131}\text{I}$ , se inyecta a presión por la cañería central y el petróleo se bombea por el espacio anular de ambas cañerías.

Manteniendo una relación de presiones de bombeo adecuada se puede hacer desplazar la interfase hasta el estrato que se busca atacar. Un detector tipo G.M. colocado en el lugar mencionado indica la llegada del ácido marcado, en ese instante se incrementa la relación de presiones para atacar el estrato con máxima eficiencia

y en toda su extensión.

#### 3.4.3.2. Control de los procesos de inundación.

En algunas áreas productoras de petróleo y/o gas se realizan inyecciones de fluidos en gran escala (agua o gases) con el fin de mantener una presión artificial y contribuir así a obtener en los pozos de explotación niveles rentables de extracción.

La aplicación de este procedimiento de recuperación secundaria por inyección de fluido suele derivar en importantes beneficios que se traducen en incrementos de hasta un trescientos por ciento de la producción de los pozos reactivados.

La inyección de agua o gases se realiza a partir de pozos denominados de "inundación" o "testigos". Dos posibles distribuciones de pozos de inundación respecto a los pozos de producción están indicadas en la fig. 27.

Para marcar el agua se emplea generalmente  $^{131}\text{I}$ . Los gases tales como el metano, etano y propano pueden ser marcados con  $^3\text{H}$  o  $^{85}\text{Kr}$ .

La finalidad de la operación de inundación es, como ya se adelantó, aumentar la presión para desplazar los frentes de petróleo hacia los pozos de producción. La marcación de estos fluidos tiene por objeto:

- Determinar el instante de llegada del fluido marcado al pozo de producción.
- Determinar posibles fallas o canalizaciones preferenciales (fracturas geológicas, zonas de alta permeabilidad).
- Determinar el tiempo de tránsito entre los pozos de inundación y producción.

**Inyección y medición del trazador radiactivo:** En caso de poder mezclar adecuadamente el trazador radiactivo con grandes masas de agua o gases, el trazador se inyec

ta en forma continua. En la práctica, sin embargo, se realizan inyecciones de trazador periódicas. (dos o mas por día). (41) (42).

En experiencias realizadas en modelos reducidos, respetando las reglas de similitud, se ha demostrado que la respuesta o actividad detectada es aproximadamente igual si la inyección es continua o bien si se realizan dos o tres inyecciones diarias, debido a la gran dispersión longitudinal del trazador cuando la distancia entre pozos es considerable (dos a diez kilómetros).

La actividad a inyectar se puede calcular a partir de la fórmula:

$$A = A_0 f_1 f_2 f_3 \quad . \quad . \quad . \quad A_0 = \frac{A}{f_1 f_2 f_3} \quad (1)$$

A : actividad específica detectada;

A<sub>0</sub> : actividad específica del gas o líquido marcado;

f<sub>1</sub> : coeficiente de dilución cinemática;

f<sub>2</sub> : coeficiente que tiene en cuenta el período de semidesintegración;

f<sub>3</sub> : coeficiente de repartición en los distintos estratos.

La actividad específica detectada debe estar por encima del umbral de detección correspondiente al instrumental de medición empleado, y por debajo de los niveles máximos admisibles reglamentados en nuestro país por las Normas de Seguridad Radiológica y Nuclear. (43).

### 3.4.3.3. Localización de fracturas geológicas o estratos de alta permeabilidad.

El control del proceso de inundación con trazadores radiactivos se realiza siguiendo distintas técnicas, quedando estas condicionadas por la naturaleza del problema o particularidades geológicas de los estratos.

Veamos un problema tipo: Se desea inyectar agua a presión en el pozo de inundación de la fig. 17 y lograr que el frente de agua avance por los estratos I, II y III simultáneamente. Sin embargo se sospecha que el agua, debido a alguna fractura geológica o bien zona de alta permeabilidad escapa sin atacar los tres estratos.

Para verificar este ataque y solucionar el problema, en caso de encontrar la fractura, se introduce en la perforación una sonda provista de dos detectores tipo G.M. y un inyector de trazador radiactivo colocado en la parte superior. Fig. 28

Se procede a bombear agua y a distintos niveles se inyecta trazador radiactivo en la perforación. La inyección se realiza enviando desde la superficie una señal eléctrica. Esta señal acciona un electroimán que libera la válvula del inyector y deja salir rápidamente un volumen fijo de trazador. Estos inyectores están diseñados para ejecutar mas de 10 experiencias sucesivas sin necesidad de recarga o extracción de la sonda.

En la fig. 28 se representa las curvas o registros obtenidos a distintos niveles del pozo. Estos registros están copiados de los originales correspondientes a una experiencia realizada por una empresa argentina concesionaria de servicios vinculados a la prospección y recuperación secundaria de petróleo.

La primera medición nos permite calcular el caudal que pasa frente a los detectores cuando no existen pérdidas laterales, es decir, cuando el caudal que pasa por el inyector es igual al caudal que pasa por el primero y segundo detector.

Fig. 28, primera medición.

En la segunda medición se advierte que la separación entre picos es mayor que en el caso anterior. Luego existe una pérdida lateral. Estamos frente a una frac

tura geológica u horizonte de alta permeabilidad.

El caudal  $q$  que pasa frente a los detectores es igual a:

$$q = \frac{\Delta e}{\Delta t} \quad s \text{ (m}^3/\text{seg)}$$

$q$  : caudal bombeado (m<sup>3</sup>/seg);

$\Delta e$  : separación entre detectores: 2,50 m en este caso;

$\Delta t$  : tiempo transcurrido entre el pasaje del trazador frente al primero y segundo detector (seg);

$s$  : sección de la cañería: 0,03 m<sup>2</sup> en este caso.

Primera medición (fig. 28) niveles: 1222,5 m/1227 m

$$q_1 = \frac{\Delta e_1}{\Delta t_1} \quad s = \frac{2,5 \text{ m}}{14 \text{ seg}} \quad 0,03 \text{ m}^2 = 0,0053 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Segunda medición (fig. 28) niveles: 1238 m/1240,5 m

$$q_2 = \frac{\Delta e_2}{\Delta t_2} \quad s = \frac{2,5}{18 \text{ seg}} \quad 0,03 \text{ m}^2 = 0,0041 \text{ m}^3/\text{seg}$$

El caudal perdido entre los niveles 1238 m/1240,5 m (segunda medición)

será:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{100 \%}{x} = \frac{18 \text{ (seg)}}{14 \text{ (seg)}} \quad x = 100 \frac{14}{18} = 77 \%$$

$$q \text{ perdido} = 100 \% - 77 \% = 23 \%$$

En la tercera medición se puede comprobar que no pasa actividad frente al detector No. 2 (inferior). Podemos suponer entonces que el 77 % restante del agua inyectado se pierde entre los niveles 1240,5 m/1243 m. Con otras ediciones se puede circunscribir mejor la zona de fractura.

Conviene notar que, como referencia, es conveniente tomar el baricentro de la curva respuesta del detector para definir el instante de paso del nucleido frente al detector (el baricentro corresponde al momento que ha pasado el 50 % del líquido marcado). La velocidad media del fluido es prácticamente igual a la velocidad del baricentro.

$$\bar{v}_{\text{media}} = \bar{v}_{\text{(baricentro)}}$$

#### 3.4.4. Almacenamiento, procesos y transporte de fluidos.

##### 3.4.4.1. Identificación de componentes.

En las etapas de transporte, y distribución de fluidos puede ser preciso marcarlos para su posterior identificación con miras a reconocer el origen o comportamiento frente a otros fluidos de distinta procedencia o características físico-químicas.

Los trazadores radiactivos, a pesar de ser fácilmente detectables y medibles con alta sensibilidad han tenido escaso éxito en esta aplicación por razones de seguridad radiológica o bien por problemas de contaminación residual, manipulación o costos.

Los trazadores activables, exentos de estas limitaciones, tienen, en cambio, mayores posibilidades en este campo.

La técnica consiste en incorporar por ejemplo a un lubricante o combustible un elemento de alta sección eficaz frente a los neutrones térmicos o rápidos. El hidrocarburo es reconocido luego por el método de Análisis por Activación neutrónica. Con esta técnica es posible medir concentraciones inferiores a la parte por millón, en ciertos casos.

Entre los trazadores no-activos seleccionados hasta el presente para identificar aceites lubricantes (44) cabe mencionar al Dy, Hf e In

En la fig. 29 se expone el espectro gamma obtenido midiendo la actividad de un aceite sin marcar y un aceite marcado con Dy. Ambas muestras fueron irradiadas en un reactor nuclear con un flujo térmico de  $10^{12}$  n/cm<sup>2</sup> seg.

Según expresan los autores de este trabajo los resultados obtenidos son:

- Costo de marcación: 0,2 a 0,5 Francos Franceses/Tonelada.
- Concentración necesaria: 0,1 a 1 ppm.

#### 3.4.4.2. Tiempo de permanencia real.

Algunas consideraciones previas: El tiempo de permanencia real de uno o mas compuestos (sólidos, líquidos o gaseosos) en reactores, mezcladores, columnas de destilación, etc. es un índice de eficiencia del proceso y calidad del producto elaborado.

En los procesos continuos el tiempo de permanencia nominal se calcula en base a la relación:

$$T_n = \frac{V}{q} \text{ (min)}$$

T<sub>n</sub> : tiempo de permanencia nominal (min);

V : volumen efectivo del recipiente, reactor, etc. (m<sup>3</sup>);

q : caudal o gasto que circula (m<sup>3</sup>/min).

Este tiempo de permanencia nominal condensa una información global que puede diferir de la real. Es preciso tener en cuenta que todas las partículas no permanecen o "residen" el mismo tiempo. Una fracción sale del sistema antes

de haber completado la reacción o intercambio buscado. Otras interaccionan o cumplen el proceso por exceso.

Es luego importante conocer el tiempo de permanencia real de las distintas fracciones del total del producto procesado y calcular además el tiempo de permanencia promedio en las condiciones reales de operación.

**Selección del trazador radiactivo:** Las características físico-químicas del producto a marcar y la cinética del proceso son factores decisivos en la selección del radioisótopo y su forma química. Es aconsejable realizar pruebas de fijación antes de decidir u optar por un determinado nucleido. Las pruebas de fijación deben, por su parte, reproducir el proceso o bien contemplar aquellos parámetros críticos que podrían alterar el trazador o los vínculos del mismo con el "soporte" o "base".

Un buen trazador radiactivo debe cumplir los siguientes requisitos:

- **Fidelidad:** Debe seguir, durante el proceso al producto marcado sin desprenderse o ser adsorbido por las paredes del recipiente u otros elementos presentes en el sistema.

- **Concentración:** Inferior a los niveles máximos permisibles. Superior o igual a las mínimas concentraciones detectables o medibles en las condiciones reales de trabajo.

- **Periodo de semidesintegración:** Compatible con la duración de la experiencia. Lo mas corto posible para evitar interferencias entre dos experiencias sucesivas o contaminaciones residuales.

**Determinación del tiempo de permanencia real:** Para conocer la respuesta del sistema en estudio (función de transferencia) ante un estímulo exterior (inyección del

trazador) se adiciona en la entrada del sistema, reactor o mezclador una pequeña cantidad de producto marcado cuyo comportamiento se desea conocer. La inyección debe ser "instantánea" y "puntual". En la salida se coloca un detector.

La actividad medida ( $A_t$ ) en la salida será siempre proporcional a la concentración de trazador presente en el lugar de medición ( $C_t$ )

$$A_t = k C_t \quad (4)$$

$k$  : constante de proporcionalidad que depende de la geometría, eficiencia de medición, etc.

Esta actividad, medida en la salida y relacionada con el tiempo  $A = f(t)$  es lo que aquí denominamos función de transferencia.

La función de transferencia nos permite calcular el tiempo de permanencia promedio (real) y la distribución de tiempos de permanencia de los distintos porcentajes de material procesado respecto del total. Se denomina tiempo de permanencia promedio  $T_p$  a la relación:

$$T_p = \frac{k \int_0^{\infty} A(t) t e^{-0.7t/T_{1/2}} dt}{k \int_0^{\infty} A(t) e^{-0.7t/T_{1/2}} dt} \quad (\text{min}) \quad (5)$$

$A(t)$  : actividad medida en la salida (c./min);

$T_{1/2}$  : período de semidesintegración del nucleido empleado (min);

$t$  : tiempo transcurrido a partir de la inyección de trazador (min);

$k$  : constante de proporcionalidad.

En la fig. 31 está sintetizada la resolución gráfica de la expresión ante-

rior. La curva a) corresponde al registro gráfico obtenido midiendo la actividad en la salida del reactor, columna de destilación, etc. La curva b) es similar a la anterior pero corregida por decaimiento:

$$\left[ A_t e^{-0,7t/T_{1/2}} \right]$$

Por último, en c) han sido multiplicadas las ordenadas

$$\left[ A_{(t)} e^{-0,7t/T_{1/2}} \right]$$

por los respectivos tiempos (t).

El tiempo de permanencia promedio queda luego expresado por la relación de áreas encerradas por las curvas b) y c).

$$T_p = \frac{\text{Area B}}{\text{Area A}}$$

Integrando la función de transferencia se puede obtener también la distribución de tiempos de permanencia de las distintas fracciones de material procesado. fig. 25.

La curva anterior es un índice de calidad, de real valía, ya que permite conocer cuales son las fracciones de material "sub-expuesto" aceptable y sobre-expuesto.

#### 3.4.4.3. Separación de componentes de una mezcla.

Sin mencionar la instancia o etapa de aplicación mencionaremos, solamente, las amplias posibilidades que tienen los radioisótopos en el control de operaciones unitarias de separación de componentes de una mezcla. fig. 33.

#### 3.4.5.0. Transporte.

En este apartado trataremos interfases, localización de obstrucciones y localización de pérdidas o filtraciones.

#### 3.4.5.1 Localización y limitación de interfases.

En poliductos de uso intensivo es común bombear diferentes productos, uno detrás del otro. Cuando estos hidrocarburos llegan a destilería o depósitos de almacenaje es necesario separarlos y en algunos casos, derivar la interfase a depósitos que contienen hidrocarburos de segunda categoría o decantadores.

En estas operaciones surge un compromiso técnico-económico que exige un exhaustivo conocimiento de las interfases con distintos productos, presiones de bombeo y distancia al origen.

Conviene recordar que el movimiento turbulento asegura cortas interfases (fig. 27) mientras que en el movimiento laminar se produce una gran difusión longitudinal.

Marcando el frente de una de las fases o la cola de la otra con un trazador radiactivo es posible conocer: (35) (47)

- Instante del arribo de la interfase.
- Límites de la interfase en función de presiones de bombeo, productos y distancia al origen.

- Concentraciones relativas.

Como trazador se suelen emplear el  $^{140}\text{Ba}$  y el  $^{124}\text{Sb}$  en forma de alcoholilfenato de bario y trifetil-antimonio respectivamente.

Con el fin de evitar las contaminaciones residuales en los poliductos algu-

nos investigadores promueven el uso de trazadores inactivos. La técnica en este caso, consiste en marcar el fluido con un isótopo de alta sección eficaz frente a los neutrones (cadmio o boro). En el lugar de control de interfases o recepción de hidrocarburos se coloca una fuente de neutrones (polonio-berilio o americio-berilio) adosado a la cañería; en oposición a la misma se colocan dos detectores, uno de radiación gamma (cristal de INa) y otro de neutrones (tubo de  $\text{BF}_3$ ). Este instrumental, conjuntamente asociado a los detectores permite controlar en forma continua, las interfases marcadas.

Cuando el cadmio llega frente a los detectores la radiación gamma aumenta y los neutrones termalizados que arriban al respectivo detector disminuyen. Las figs. 35 y 36 ilustran respecto a este proceso. La figura mencionada en última instancia representa a las actividades medidas debidas a los neutrones y la radiación gamma frente a diversas concentraciones de cadmio ( $\text{SO}_4 \text{ Cd}$ ).

Para marcar interfases de hidrocarburos los autores de este trabajo, recomiendan emplear el Cd como naftenato (46).

El uso de calibradores nucleares gamma que controlan la densidad de los hidrocarburos al llegar a las válvulas derivadoras sustituye con múltiples ventajas a estas técnicas pues además de ser muy sensibles dan un control continuo y sin contacto, evitándose la marcación.

#### 3.4.5.2 Localización de obstrucciones.

En la habilitación y mantenimiento de poliductos, gasoductos y redes importantes de distribución de fluidos es necesario pasar por su interior rascadores

o "scrapers" para limpiar y evacuar las obstrucciones de las mismas.

Con el fin de localizar estos rascadores cuando quedan atascados se colocan, adosados a los mismos, fuentes radiactivas selladas, emisores gamma de alta energía.

Para operar rápida y cómodamente estas fuentes es conveniente construir un mecanismo automático que la deje al descubierto cuando el rascador es colocado en el interior de la cañería y quede convenientemente blindada en el exterior para ejecutar el montaje y desmontaje sin riesgos; conviene aquí recordar que los rascadores son impulsados por la presión del agua y esta presión puede ser aprovechada para accionar el mecanismo ya mencionado.

Los nucleidos mas empleados son:  $^{60}\text{Co}$  y el  $^{226}\text{Ra}$ .

Para calcular la actividad necesaria se utiliza la conocida expresión:

$$E = E_0 \left( \frac{d}{d + x} \right)^2 e^{-\mu x} B \quad (7)$$

E : exposición;

x : espesor o tapada sobre cañería;

$\mu$  : coeficiente de absorción;

B : factor de multiplicación empleado cuando  $\mu x \geq 1$ .

Se emplean detectores portátiles con cristales de INa (TI).

La actividad o exposición medida por el detector debe superar, en la zona crítica, por lo menos cinco veces a la actividad debida al fondo natural para evitar dudas por posibles variaciones del fondo natural. (Por ejemplo: los "adoquines" de la ciudad de Buenos Aires incrementan considerablemente el fon-

do natural cuando es acercado a ellos un detector).

De las curvas de la fig. 37 se puede extraer el factor de reducción **F** con y sin interposición de blindaje para calcular la actividad de  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{191}\text{Ir}$  y  $^{137}\text{Cs}$  necesaria para detectar y localizar rascadores. Estas curvas han sido calculadas para hormigón y tierra de dos densidades (o compactaciones) extremas.

Con estas curvas es posible calcular la actividad necesaria sin conocer la eficiencia del detector.

#### 3.4.5.3 Localización de pérdidas, filtraciones e interconexiones.

Las técnicas nucleares han resuelto ya, en nuestro país, numerosos problemas vinculados con este tema.

La extrema sensibilidad y la sencillez de la operación de localización de fugas han contribuido a universalizar e imponer estos métodos.

Los problemas de fugas en cañerías, conductos, depósitos impermeabilizados naturales o artificiales son de diversa índole. La acertada elección de la técnica de trazadores radiactivos a emplear, selección del nucleido y actividad son factores decisivos en el éxito de una experiencia de este tipo.

Las técnicas que se describen a continuación son aptas para localizar fugas de gases o líquidos.

#### 3.4.5.4 Técnica general de localización de fugas.

Se inyecta el trazador convenientemente diluido y se espera un tiempo prudencial hasta lograr que la mayor cantidad posible de trazador radiactivo pase por la pérdida y quede absorbido por el terreno.

Luego se desaloja el fluido marcado y se "lava" la cañería con el fin de hacer desaparecer todo rastro de trazador que pueda quedar adherido a los contornos internos del conducto, juntas, sifones, etc., para evitar, en la detección, la interferencia de estas contaminaciones y medir desde el exterior solamente la radiación proveniente del fluido marcado que salió por el orificio de la fuga. El "lavado" debe ser exhaustivo.

Cuando se trata de cañerías a presión, después de haber inyectado el nucleido conviene elevar la presión hasta un nivel límite. Esta operación puede repetirse varias veces con el fin de hacer fluir la mayor cantidad posible de trazador por la filtración.

En el caso de no existir planos de la distribución de cañerías o bien no estar estas convenientemente acotados es posible materializar su recorrido efectuando un control de la actividad del área en el momento que la cañería o conducto está lleno con el fluido marcado.

Esta última operación es factible si el radioisótopo se ha difundido o mezclado con todo el fluido de la cañería.

La actividad mínima necesaria para localizar la pérdida se puede calcular a partir de la fórmula expuesta en 3.4.5.2.

Es además necesario tener en cuenta que esa actividad mínima debe incrementarse, pues en 3.4.5.2. calcula como si fuesen fuentes puntuales y aquí el líquido se distribuye en un volumen que es función de parámetros generalmente desconocidos (compactación, fracturas, adsorción del trazador, etc.).

Los gases, en cambio, tienden a subir a la superficie en los terrenos poro-

sos o en caso de carpetas impermeables se difunden y emergen a través de fracturas localizadas que pueden alterar la precisión de la localización.

Para calcular la actividad mencionada es necesario conocer: espesor o tapada sobre la cañería o conducto, tipo de materiales que lo componen y el caudal (q) de la filtración.

En base al espesor, materiales y energía del nucleido se buscan en las tablas los coeficientes  $\mu$  y B. El caudal (q) se puede estimar, en ciertos casos, de acuerdo a la técnica expeditiva descrita en 3.4.5.4.

Técnica expeditiva para conocer aproximadamente el caudal que fluye por la pérdida: En cañerías a presión se puede estimar el volumen o masa perdida durante el lapso  $(t_2 - t_1)$  de la experiencia.

Después de haber marcado en forma homogénea el fluido de la cañería o conducto se eleva la presión hasta alcanzar un límite superior ( $p_2$ ). Se espera hasta que la presión descienda (si la única causa de pérdida de presión es la fuga) hasta el nivel inferior ( $p_1$ )(instante  $t_1$ ).

Cuando esta operación ha finalizado se eleva nuevamente la presión hasta alcanzar el valor  $p_2$  y se provoca rápidamente la depresión ( $p_2 - p_1$ ) abriendo un grifo accesible y midiendo el volumen o pesando la masa recuperada a través del grifo. El caudal q de la pérdida es entonces:

$$q \simeq \frac{\text{Vol. recuperado}}{t_2 - t_1} = \frac{M}{(t_2 - t_1) \delta}$$

#### 3.4.5.5 Técnica de las fuentes puntuales.

Se introducen en la cañería llena pequeñas fuentes radiactivas adosadas a

- La cañería debe estar suficientemente profunda para blindar gran parte de la radiación directa y evitar interferencias.

- Generalmente es aplicable solamente a conductos empleados para transportar gases.

### 3.4.5.7. Técnica de localización de fugas con inyección discreta.

Al efectuar inyecciones instantáneas de trazador en la corriente fluida la concentración en distintas secciones, aguas abajo, variará de acuerdo a las curvas de la fig. 39;  $c = f(t)$

Si bien el área encerrada por ambas curvas es la misma, pues el caudal es constante, es evidente que cuando la distancia al punto de inyección es muy gran de las posibilidades de detectarla disminuyen debido a que tienden a confundirse con el fondo natural. Esto ocurre cuando la dilución es muy grande.

Para lograr la detección de una pérdida de caudal ( $q$ ) (pequeña frente al caudal  $Q$  de la tubería) es necesario una actividad mínima ( $a_m$ ) al tiempo  $t$  tal que:

(49) (50)

$$a(t) = A(t) \frac{q}{Q} = A_0 e^{-\lambda t} \quad \frac{q}{Q} \geq a_m \quad (10)$$

Esta relación, en primera instancia, define el tiempo al cabo de la cual la detección no es más posible.

$$\theta = \frac{1}{\lambda} \log \frac{q}{Q} \frac{A_0}{a_m} \quad (11)$$

Al tiempo  $\theta$  la "ola de radiactividad" ha recorrido una distancia:

$$L = \frac{Q}{S} \theta \quad (12)$$

Existe por lo tanto un tiempo óptimo ( $t_{opt}$ ) (48) contando a partir del momento que el trazador llega al punto de salida. Si continuamos la inyección y detección mucho más allá del tiempo óptimo las probabilidades de localizar las fugas son menores.

La actividad  $A_{(t)}$  en el área de filtración está dada por el aporte de la fuga ( $dA_1$ ) y por el decaimiento del nucleido ( $dA_2$ ).

$$dA_1 = q a_0 e^{-\lambda t} dt$$

$$dA_2 = \lambda A_{(t)} dt$$

La solución de estas ecuaciones es:

$$A_{(t)} = q a_0 t e^{-\lambda t} \quad \text{fig. 38} \quad (9)$$

$a_0$  : actividad específica al tiempo  $t = 0$ ;

$\lambda$  : constante de semidesintegración;

$A_{(t)}$  : actividad en las inmediaciones de la pérdida al tiempo  $t$ ;

$Q$  : caudal que pasa por la cañería;

$q$  : caudal de la pérdida.

En la fig. 38 se representa  $A_{(t)}/A_{m\acute{a}x}$  y se dan los valores de  $t_{\acute{o}ptimo}$  para distintos nucleidos.

Este método permite operar sin interrumpir el servicio.

Las limitaciones de esta técnica son las siguientes:

- La actividad a emplear es muy superior a la de otras técnicas (problemas radiosanitarios).

- El caudal  $q$  debe ser significativo.

flotadores que tienden a desplazarse conjuntamente con el fluido, hacia el orificio de salida.

Las fuentes son recuperables y se suelen emplear pequeñas agujas de  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{191}\text{Ir}$ , ó  $^{226}\text{Ra}$ .

Las limitaciones del método son las mismas que las expuestas anteriormente. La actividad necesaria se puede estimar de la misma manera y en caso de fracasar la localización en el primer intento se pueden agregar más fuentes.

Esta técnica tiene la ventaja de no dejar contaminaciones residuales, siempre que puedan recuperarse las fuentes.

#### 3.4.5.6 Técnica de la localización de fugas con inyección continua.

Consiste en adicionar el trazador en la cañería mientras circula el fluido y buscar, aguas abajo, con detectores de alta sensibilidad, el escape del trazador radiactivo.

Este método es particularmente apto para cañerías que conduzcan gases.

Con inyección continua la concentración de trazador o actividad específica en una sección de la tubería, situada más allá de la distancia mínima de óptimo mezclado es constante.

En la sección de la filtración se bifurcan dos caudales: el caudal principal ( $Q$ ) y el caudal de la pérdida ( $q$ ).

La actividad que restará que restará en las inmediaciones del orificio de salida será:

$$A_{(t)} = 0 \text{ para } t = 0$$

$$A_{(t)} \longrightarrow 0 \text{ para } t \longrightarrow \infty \quad (8)$$

S : sección de la canalización.

Luego la máxima distancia explorable estará dada por:

$$L_{\text{máx}} = \frac{Q}{S \lambda} \log \frac{q}{Q} \frac{A_0}{a_m} \quad (13)$$

Este método en algunos casos sería aplicable a cañerías (especialmente transportadoras de gases) en las cuales no es posible interrumpir el servicio o bien sólo son tolerables interrupciones muy breves. En este último caso se interrumpiría el servicio solamente en el momento que la "ola radiactiva" ingresa a la red domiciliaria o industrial.

#### 3.4.5.8 Detección de fugas con detectores introducidos en la cañería.

Si después de haber lavado cuidadosamente la cañería para descontaminarla se introduce una pequeña sonda de detección en la misma pueden detectarse muy pequeñas fugas.

Han sido diseñadas con este fin (51) sondas de reducidas dimensiones en cuyo interior están los detectores, fuente de alta tensión, integrador transistorizado y registrador gráfico. Estas sondas son impulsadas dentro de la cañería aprovechando la presión del fluido.

La correlación entre la actividad registrada y la posición de la sonda respecto al eje longitudinal de la cañería puede ser establecida colocando fuentes puntuales de  $^{60}\text{Co}$  en la superficie a lo largo del eje longitudinal de la cañería.

Esta técnica de localización es de alta sensibilidad.

El diámetro de las cañerías debe ser considerable (más de 10 cm) y cualquier rebaba u obstrucción puede detener el avance de la sonda. El uso de esta téc-

nica requiere también lavado exhaustivo antes de la detección.

#### 3.4.6.0 Otras consideraciones sobre detección de pérdidas.

Si bien alguna de las técnicas aquí mencionadas parecerían ser demasiado sofisticadas es necesario tener presente que los problemas de fugas pueden ser de muy diversa índole y magnitud. La localización de las mismas adquiere también en muchos casos significativa importancia económica.

Es conveniente recordar que en los cálculos previos a la localización sólo se puede suponer que el trazador queda adsorbido en las inmediaciones del orificio de salida. Si se trata de gases, estos tenderán a salir a la superficie facilitando así la detección, siempre que se pueda controlar, rápidamente, la actividad sobre la red.

Las técnicas descritas en 3.4.5.6 y 3.4.5.7 sólo pueden emplearse en casos especiales y para tener éxito en la localización es necesario que la pérdida sea significativa.

#### 4.0.0. TECNICAS NUCLEARES EN AGUAS SUBTERRANEAS

De las aguas originadas en lluvias nieve, granizo, etc., parte se infiltra hasta encontrar los estratos impermeables, otra parte se evapora y una tercera escurre superficialmente, canalizada a través de ríos, canales u otro tipo de desagües.

Nos ocuparemos ahora de la fracción que, desde la superficie, comienza a descender y después de atravesar la zona de aereación llega a la de saturación

pasando a formar parte de las denominadas aguas subterráneas o acuíferos. Este balance genérico puede sintetizarse a través de la ecuación general:

$$I = P - E - R_s \quad (1) \quad R_n = P - E - R_s \quad (2)$$

I : Recarga o agua infiltrada que ingresa al acuífero;

P : precipitaciones;

E : Evapotranspiración;

R<sub>s</sub> : escurrimiento superficial;

R<sub>n</sub> : agua descargada por la napa.

Esta ecuación general, aplicable con ciertas variantes cuando se trata de cuencas o bien cuando se refiere a una sola napa de la cuenca agrupa términos algunas veces muy difíciles de calcular o estimar, aún en zonas donde se efectúan sistemáticos controles pluviométricos, de caudales superficiales y de evapotranspiración.

La cantidad de agua superficial que llega a los acuíferos, denominada recarga, está, como es lógico, directamente vinculada al volumen y distribución en el tiempo de las precipitaciones, las características topográficas del terreno (grandes pendientes favorecen la esorrentía superficial), la permeabilidad del medio o capa de aereación, la cantidad de cultivos, etc.

Esta recarga llega a los acuíferos por procesos de infiltración directa o percolación a partir de corrientes superficiales, lagos, pantanos, etc. Sólo cuando el suelo es muy permeable y el acuífero libre o napa freática está cerca de la superficie, la infiltración directa puede adquirir significación en la recarga; ejemplos de volúmenes significativos de recarga directa se encuentran en áreas con

suelos basálticos, suelos con calizas cavernosas o suelos de alta permeabilidad, de tipo aluvional.

En cambio, en acuíferos confinados o artesianos, la mayor parte de la recarga suele provenir de corrientes o cursos superficiales (denominados afluentes porque aportan agua a la napa). Sus áreas de recarga suelen concentrarse en la cabecera de los acuíferos artesianos, siendo, generalmente despreciables los aportes en el curso medio y superior del acuífero.

Más difícil de circunscribir o definir resulta el área de recarga de algunas napas freáticas donde el aporte puede provenir de todo el manto que cubre a la napa libre.

Las corrientes superficiales suelen además contribuir preponderantemente a la formación de las aguas subterráneas cuando su cauce está enclavado en conos de deyección de origen aluvional o terrenos formados por gravas gruesas.

La época de mayor infiltración y percolación anual está estrechamente vinculada al régimen anual de precipitaciones y al clima determinante de la evapotranspiración que reduce los volúmenes de infiltración.

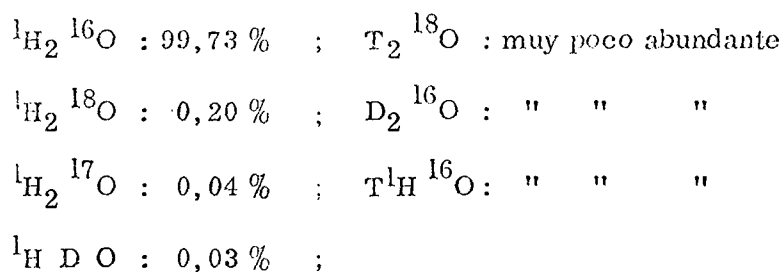
En la zona de saturación el movimiento del agua es por lo general extremadamente lento y suelen pasar muchos años (y algunas veces siglos) para que una molécula de agua de recarga llegue a la descarga, ya sea el mar, un curso superficial efluente u otra forma de surgencia. Sólo en contados acuíferos (los de terrenos calcáreos o rocas fisuradas, por ejemplo) la descarga puede responder con relativa rapidez a las variaciones de infiltración en la recarga.

En el capítulo 3.0.0 se describen las técnicas nucleares que, utilizando

radioisótopos artificiales, son usadas para determinar las características físicas "puntuales" de las napas freáticas o artesianas. La determinación de estos parámetros solo en acuíferos muy homogéneos, con regímenes de precipitaciones y evapotranspiración bien conocidos permitirá calcular otros valores muy necesarios para el aprovechamiento racional y económico de una napa, tales como el tiempo de tránsito entre recarga y descarga, volumen de agua almacenada y posibles interconexiones entre napas.

Más, como la información obtenida en reducidas áreas no puede ser generalmente extendida a todo acuífero, sin riesgo a cometer groseros errores, se suele acudir a los trazadores naturales isotópicos o radioisotópicos que, por interesar mayores volúmenes en los acuíferos, suministran, en algunos casos, información más confiable y representativa.

El agua natural está formada, aproximadamente por los siguientes porcentajes moleculares:



El tritio (T), isótopo radiactivo del hidrógeno, el deuterio (D), isótopo no radiactivo del mismo elemento y el oxígeno-18 ( $^{18}\text{O}$ ) son excelentes trazadores del agua por estar incorporados por naturaleza, a su composición molecular y sirven para evaluar, en ciertas circunstancias, los parámetros antes mencionados.

El tritio formado en la alta atmósfera por acción de la radiación cósmica sobre el nitrógeno (y otros procesos, en menor cuantía) se incorpora a las precipi

taciones de lluvia, nieve o granizo. En la atmósfera ha alcanzado ya un estado de equilibrio, pues el tritio que se forma constantemente es igual al que se pierde por decaimiento natural, según ley bien conocida.

Este estado de equilibrio (solo alterado por agentes exteriores artificiales tales como las explosiones nucleares) deja de existir cuando las aguas se infiltran y aíslan del ciclo hidrológico donde la producción o incorporación de tritio es nula y solo rige el decaimiento, reduciéndose entonces las concentraciones en función del tiempo transcurrido desde el aislamiento, según la ley mencionada.

Este es el mecanismo simple en el que se basan los cálculos de tiempos de tránsito de las aguas subterráneas y otras determinaciones de edad, de frecuente empleo en geología e hidrología.

El uso del carbono-14 como trazador "cronológico" se basa en el mismo principio; sin embargo, su ciclo en las aguas subterráneas es más complejo siendo preciso afectar a los resultados de correcciones que pueden complicar o hacer más imprecisas las determinaciones.

Con concentraciones de tritio en la recarga relativamente altas, es posible estimar edades de agua comprendidas entre, aproximadamente, 10 y 50 años. Para edades mayores (3000 - 50000 años, aproximadamente) es preciso recurrir al carbono-14.

Si bien no es el propósito de este trabajo tratar el ciclo del tritio natural en aguas subterráneas haremos algunas consideraciones respecto a las diversas interpretaciones sobre la circulación del mismo (u otro trazador) después de su aislamiento de la superficie, en distintos tipos de acuíferos.

La evaluación de tiempos de tránsito se realiza midiendo la concentración de tritio (u otro trazador) en la recarga y en la descarga, surgencia o pozo.

Las muestras superficiales de la recarga definen la función de entrada y deben ser tomadas siguiendo indicaciones que dependen de las características hidrometeorológicas de la cuenca.

Con vistas a la interpretación de los resultados de las concentraciones medidas en las descargas han sido propuestos distintos modelos de circulación. (56) (57).

Flujo pistón ("Piston flow"): Se presume que el agua de una recarga sigue a la de la anterior sin mezclarse. Es como si los tiempos de residencia de todas las moléculas marcadas (n) fuese el mismo.

En este caso la concentración media en la descarga  $C_{(n)}$  quedaría vinculada con la concentración en la recarga  $C_{(t - T)}$  por una expresión del tipo:

$$C_{(m)} = \frac{V}{V'} \cdot C_{(t - T)} e^{-\lambda t}$$

n : número de moléculas marcadas que ingresan y egresan del sistema;

$C_{(t - T)}$  : función de entrada;

t : tiempo;

T : tiempo de residencia.

Para una recarga constante o bien un ciclo de infiltración anual conocido es fácil aquí calcular el tiempo de tránsito medio T.

Sin embargo este modelo no es muy aplicable a acuíferos confinados o libres ya que en la mayoría de los casos, con grandes recorridos y largos tiempos de tránsito ocurre una dispersión longitudinal que mezcla las distintas recar-

gas anuales.

Flujo disperso: Este modelo suele aplicarse a acuíferos confinados y se supone que las distintas recargas anuales se mezclan. En base a consideraciones teóricas derivadas de experiencias en modelos reducidos se puede predecir que la dispersión longitudinal del trazador natural que ingresó en el sistema durante un determinado lapso sigue una ley normal (Gauss, por ejemplo); lo mismo podríamos decir de las  $n$  moléculas marcadas de una muestra, recogida en la descarga: han permanecido durante distintos lapsos agrupados, según una ley normal, en torno al tiempo medio ( $T$ )

Este modelo se resuelve en la misma forma que el anterior si las concentraciones y volúmenes recargados son constantes pues se ha demostrado (6) (56) que en las condiciones normales que suelen imperar en los acuíferos confinados el error solo es significativo cuando las velocidades son extremadamente bajas y los coeficientes de dispersión muy elevados.

En este caso las concentraciones medias medidas en un punto dado de la descarga  $C_{(m)}$  al tiempo  $t$  y para tiempos de permanencia  $T$  de las  $n$  moléculas que ingresaron y egresaron del acuífero están definidas por una expresión del tipo:

$$C_{(m)} = \int_0^t C_{(t-T)} e^{-\lambda T} F_R(T) dT$$

$C_{(t-T)}$  : Respuesta impulsional del sistema a un tiempo  $t$ ; debido a una inyección instantánea hecha al tiempo  $T$ . Es también la distribución del tiempo de residencia resultante de una inyección instantánea al tiem-

po T. Esta función puede ser obtenida por la operación de deconvolución a partir de  $C_m(t)$   $F_R(T)$

$F_R(T)$  : función de distribución de edades para un determinado volumen de dispersión.

Flujo de "buen mezclado": Este tipo de modelo es difícil de encontrar en la naturaleza.

Flujos con procesos de estratificación: Este modelo se reproduce con frecuencia en ciertos acuíferos libres o freáticos en los que las edades de las muestras respecto a la profundidad siguen una ley logarítmica; mayor profundidad mayor edad en cualquier parte del acuífero.

Cuando la infiltración y percolación se produce mas o menos uniformemente todo a lo largo del acuífero, el proceso de estratificación mencionado es muy probable que ocurra e, interpretamos que este modelo se reproduce con bastante frecuencia en áreas de llanura.

Vogel define una edad característica ( $t_{1/2}$ ) que corresponde a las muestras tomadas a la mitad de altura del acuífero.

$$t_{1/2} = \frac{\alpha b}{w} \ln 2$$

y una edad promedio (T):

$$T = \frac{\alpha b}{w}$$

$\alpha$  : porosidad;

$b$  : altura del acuífero (m);

$w$  : recarga (m/año)

Resta agregar que este modelo puede aplicarse a acuíferos homogé-

neos, sin estratificaciones de distinta permeabilidad y altura (b) uniforme.

#### 4.1.0 DEFINICIONES Y ALGUNAS REFERENCIAS RESPECTO A PARAMETROS FUNDAMENTALES EN AGUAS SUBTERRANEAS.

##### 4.1.1. Porosidad, rendimiento específico y retención específica.

En una determinada masa de rocas, estratos o acuíferos se denomina porosidad a la relación entre, el volumen de poros o vacíos comunicados al volumen total de la formación. Los métodos de medición, gravimétricos o volumétricos relacionan muestras secas con muestras saturadas y la porosidad se determina en base a las expresiones siguientes, de acuerdo al método empleado:

$$p = 100 \frac{A}{V} = 100 \frac{V - v}{V} = 100 \frac{S - a}{S} = 100 (b - a)$$

p : porosidad %;

A : volumen de agua necesario para saturar la muestra (cm<sup>3</sup>);

V : volumen de la muestra (cm<sup>3</sup>);

v : volumen de sólido en la muestra (cm<sup>3</sup>);

S : peso específico medio de sólidos de la muestra (g/cm<sup>3</sup>);

a : densidad relativa de la muestra seca;

b : densidad relativa de la muestra saturada.

Una porosidad elevada no es sinónimo de un acuífero rico ya que en algunos casos (arcilla por ejemplo), el agua puede quedar retenida en sus pequeños pero abundantes poros.

Por esta razón se ha generalizado el uso del denominado rendimiento específico o porosidad eficaz del acuífero que es la relación entre el volumen

de agua que fluye libremente del material o "agua drenable" (con gradiente unitario) y el volumen total de la formación.

También se define como porosidad eficaz a la cantidad de agua perdida por un prisma del acuífero (base =  $1 \text{ m}^2$ ; h = altura del acuífero) cuando se vacía por gravedad, durante un lapso infinito, dicho prisma.

Algunos autores emplean también el término retención específica que es el complemento del anterior respecto a la porosidad.

La tabla IX (68) indica algunos valores típicos de porosidad rendimiento específico y permeabilidad en diversos tipos de formaciones litológicas.

La porosidad, definida hasta aquí, es susceptible de ser medida en laboratorio con todas las limitaciones propias de los métodos de muestreo y la escasa representabilidad de una o pocas muestras. Otra permeabilidad, la denominada secundaria y que representa en una formación rocosa la relación entre el volumen libre de fracturas, diaclasas, acanaladuras de disolución, etc., al volumen total, no es susceptible de ser evaluada en laboratorio dada la heterogeneidad del medio.

Al margen de los métodos de laboratorio no existen otras técnicas, salvo aquellas que usan trazadores, que permitan determinar en áreas relativamente extensas porosidades eficaces de acuíferos.

#### 4.1.2 Ley de Darcy; velocidad y permeabilidad.

La ley de Darcy utilizada corrientemente en medios porosos y permeables donde imperan bajas velocidades, es expresada por:

$$v_a = \frac{Q}{S} = K \frac{h_1 - h_2}{L}$$

$v_a$  : velocidad aparente (m/día);

$h_1 - h_2$  : diferencia de nivel o presión entre dos secciones (m);

$L$  : distancia entre las secciones mencionadas (m);

$Q$  : caudal ( $m^3/día$ );

$S$  : Sección total del medio atravesado por el fluido ( $m^2$ );

$K$  : permeabilidad o coeficiente de permeabilidad (m/día).

El coeficiente de permeabilidad es la facultad que tiene la roca o medio poroso para transmitir agua; tiene las dimensiones de una velocidad y depende de las propiedades intrínsecas del medio y de las características del líquido que circula, es decir su densidad y viscosidad (54).

$$K = C d^2 \frac{\gamma}{\mu}; \quad K = k \frac{\gamma}{\mu}$$

$K$  : Coeficiente de permeabilidad ;

$k$  : coeficiente de permeabilidad del medio, definido con independencia de las características físicas del fluido;

$\gamma$  : peso específico del fluido;

$u$  : viscosidad cinemática del fluido  $\left(\frac{\gamma}{\mu}\right)_{10^\circ C} = 0,76; \left(\frac{\gamma}{\mu}\right)_{20^\circ C} = 0,99$

$C$  : constante del medio poroso;

$d$  : diámetro medio de las partículas que componen el medio poroso.

La velocidad  $v_a$  es la denominada velocidad aparente o velocidad de filtración del agua a través de la sección  $S$ , normal a la dirección del flujo

(54). La velocidad medida con trazadores es una velocidad media ( $v_m$ ) referida, no a la sección S, sino a la sección que dejan libres los poros o espacios intercomunicados: p S; siendo p la porosidad del terreno.

Si queremos aproximarnos mas a la velocidad real debemos agregar que como toda el agua del medio no participa del movimiento correspondería hablar de velocidades eficaces cuando, la porosidad utilizada sea la porosidad eficaz (1)

$$v_e = \frac{v_a}{p_e} = \frac{K}{p_e} \frac{h_1 - h_2}{L}$$

$v_e$  : velocidad efectiva;

$p_e$  : porosidad eficaz.

La velocidad efectiva ( $v_e$ ) difiere de la real ya que el recorrido de los filetes líquidos es siempre superior a la distancia (L) utilizada en la expresión anterior, que es la longitud existente entre los puntos de observación. En medios porosos el agua recorre trayectorias, algunas veces tortuosas, y en el caso de circulación por grietas, fisuras, etc. es difícil predecir el trayecto.

Los límites de aplicación de la fórmula de Darcy son:

- Circulación en medios porosos.
- Regimen laminar con límite inferior muy bajo (no se han encontrado experimentalmente, indicios de este límite) y superior comprendido entre números de Reynolds 1 y 10; algunos autores, para ciertos medios porosos, extienden este límite a números de Reynolds comprendidos entre 1-700.

La expresión de Darcy se usa también para determinar la permeabilidad en ensayos de bombeo donde la velocidad de los filetes líquidos puede so-

brepasar los límites mencionados, particularmente en el entorno mas próximo al pozo.

Respecto a la circulación con regímenes turbulentos podemos agregar que la velocidad y el gradiente son frecuentemente relacionados por expresiones del tipo:

$$v^n = \beta^n \frac{h_1 - h_2}{L}$$

$\beta$  : coeficiente de pérdida de carga total, por unidad de longitud;

$n$  : variable que generalmente está comprendida entre 1,7 y 2.

La permeabilidad puede determinarse en laboratorio con permeámetros de carga fija o variable y también utilizando fórmulas empíricas basadas en determinaciones granulométricas, porosidad, etc. Las fórmulas mas difundidas son las de Terzaghi, Hazen, Slichter, etc. (54)

Resultados mas confiables y representativos se logran en ensayos de bombeo con los métodos de equilibrio (nivel freático o superficie del cono de presión constante) o métodos de variación en los que se mide el abatimiento en función del tiempo y el caudal (generalmente constante) durante el bombeo.

Las determinaciones de permeabilidad así hallados pueden resultar representativas de todo el acuífero si éste es homogéneo.

Con trazadores suelen hacerse determinaciones con o sin bombeo, cuya representabilidad, función de la longitud o mejor dicho del volumen interesado por el trazador, puede alcanzar valores medios mas acordes con las características reales del acuífero.

#### 4.1.3. Transmisibilidad.

Es el producto de la permeabilidad  $K$ , antes definida, por el espesor medio del acuífero:

$$T = K b$$

$T$  : Transmisibilidad o coeficiente de transmisibilidad ( $m^2/día$ );

$K$  : permeabilidad ( $m/día$ );

$b$  : espesor medio del acuífero ( $m$ ).

Este concepto, introducido por Theis, es aplicable en la mayoría de los acuíferos en los que la circulación de los filetes líquidos es sensiblemente paralela al nivel freático o estático. Es decir, esta es una transmisibilidad horizontal.

En general la transmisibilidad se determina con los métodos antes mencionados, a partir de los valores de permeabilidad, suponiendo el acuífero homogéneo en toda su altura o espesor. Con trazadores se ha intentado evaluar transmisibilidades parciales en acuíferos con marcadas diferencias litológicas.

#### 4.1.4 Coefficiente de almacenamiento. (54)

En acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento  $S$  es igual a la porosidad eficaz. En otras palabras, el volumen de agua extraíble por bombeo de una unidad de volumen de acuífero saturado. La determinación de porosidad eficaz a partir de experiencias con trazadores mas adelante transcripta, constituye un avance significativo en la solución de diversos problemas hidrológicos.

Cuando se trata de acuíferos confinados es preciso afectar al coeficiente de almacenamiento de diversas correcciones debido a los efectos mecánicos de compresión del terreno y de compresión propia del agua. Se define entonces al coeficiente de almacenamiento por el "volumen de agua extraíble de una columna vertical del terreno que tenga como base la unidad del área y como altura la altura media  $b$  del acuífero, debido a la disminución de una unidad de carga hidráulica. Es un factor adimensional con el mismo valor numérico, por lo tanto, en todos los sistemas de unidades".

$$S = p \gamma b \beta \left( 1 + \frac{\alpha}{p \beta} \right)$$

$p$  : porosidad;

$\gamma$  : peso específico;

$b$  : espesor medio del acuífero;

$\beta$  : coeficiente de compresibilidad del agua; es decir, aumento del volumen lateral por unidad de masa de agua al comprimir la masa de agua verticalmente;

$\alpha$  : coeficiente de compresibilidad vertical de los sólidos del acuífero.

#### 4.1.5. Tiempo de renovación.

Es el tiempo necesario para completar, con la recarga, el volumen del reservorio o el tiempo necesario para que el volumen descargado por el mismo iguale a su volumen:

$$T = \frac{V}{Q}$$

$T$  : tiempo de renovación o residencia nominal (Turnover time) (años);

---

V : volumen de agua almacenada en el acuífero ( $m^3$ );

Q : recarga por unidad de tiempo o descarga por unidad de tiempo ( $m^3/año$ )

#### 4.2.0 DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS DE LOS ACUI- FEROS: DIRECCION, VELOCIDAD, PERMEABILIDAD, POROSIDAD, TRANSMISIBILIDAD Y COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO.

##### 4.2.1. Métodos en los que se necesita un solo pozo.

###### 4.2.1.1 Método de dilución puntual

Existen numerosas técnicas e instrumentos aptos para medir la velocidad y dirección del flujo de las aguas subterráneas utilizando una sola perforación; mencionaremos solo las mas difundidas.

En esencia todas ellas consisten en inyectar en un determinado nivel del acuífero una actividad o concentración conocida de trazador radiactivo y medir su decrecimiento debido a la dilución producida por el agua que penetra al pozo y/o recipiente poroso donde se inyectó el trazador. Fig. 40, 41, 42.

Si suponemos que durante la medición el regimen es permanente o estacionario, que no existen componentes verticales de velocidad y que la concentración en el instante inicial (en el recipiente o recinto donde se inyectó el trazador) es homogénea, tendremos:

$$Q = v_f S \quad (1); \quad C(t) = \frac{A(t)}{V} \quad (2)$$

Q : caudal que pasa por el recinto donde se inyectó el trazador ( $m^3/seg$ );

$v_f$  : velocidad de filtración debida a la componente horizontal ( $m/seg$ );

$S$  : sección vertical del recinto donde se encuentra el trazador ( $m^2$ );

$C(t)$  : concentración del trazador ( $\mu C/m^3$ ) al instante  $t$ ;

$V$  : volumen libre del recinto ( $m^3$ );

$A(t)$  : actividad inyectada ( $\mu C$ ) o residual al instante  $t$ .

Como la cantidad de agua que entra al pozo por unidad de tiempo es igual a la que sale, si el regimen es permanente, tendremos que el intervalo  $dt$  variará la actividad en el recinto donde se inyectó el trazador, en  $dA$ , tal que:

$$dA = Q_0 dt - QC(t)dt \quad \therefore \quad dA = -QC(t)dt \quad (3)$$

$Q_0 dt$  : actividad que entra al recinto o recipiente poroso;

$QC(t)dt$  : actividad que sale del recinto o recipiente poroso.

Reemplazando (1) y (2) en (3) e integrando:

$$dA = -v_f S \frac{A(t)}{V} dt ; \quad \int_0^t \frac{dA}{A} = \int_0^t -v_f \frac{S}{V} dt$$

$$\ln \frac{A}{A_0} = -v_f \frac{S}{V} t \quad \therefore \quad v_f = -\frac{V}{S} \ln \frac{A}{A_0} \quad (4)$$

En la mayoría de los equipos conocidos, en virtud de ser cilíndrico el recinto donde se inyecta el trazador la relación del volumen  $V$  a la sección  $S$  está dado por:

$$\frac{V}{S} = \frac{\pi d^2 h}{4 d h} = \frac{\pi}{4} d \quad (5)$$

Reemplazando luego (5) en (4) tendremos:

$$v_f = \frac{-\pi d}{4 t} \ln \frac{A}{A_0} \quad (6) \quad \frac{A}{A_0} = e^{-\frac{4 v_f t}{\pi d}} \quad (7)$$

Como podemos apreciar hasta aquí, la velocidad  $v_f$  es la velocidad de las partículas de agua que atraviesan la perforación y la sección  $S$  de referencia es la real, distinta de la efectiva, pues la perforación introduce dos tipos de perturbaciones: una debida a la perforación propiamente dicha que al desalojar la roca o sedimentos "desvía" filetes líquidos (fig. 43) y otra la perturbación producida por las perforaciones de la cañería y la empaquetadura que la rodea cuya permeabilidad es distinta a la del terreno.

El factor  $f$  de corrección a introducir en la fórmula debido a las distorsiones mencionadas puede extraerse de las curvas de las figs. 45 y 46. Estos gráficos corresponden al equipo mencionado en la bibliografía (58):

$$f = f_1 f_2 \quad v_f = \frac{\pi d}{4 f_1 f_2} \frac{l}{t} \ln \frac{A}{A_0}$$

$f_1$  : factor de corrección debido a la distorsión hidrodinámica producido por la perforación. Figs. 44 y 45

$f_2$  : factor de corrección debido a las perforaciones del filtro (relación: superficie perforada/superficie total).

Como podemos apreciar, en el diagrama de OGILVI el factor  $f_1$  depende no solo de la empaquetadura sino de su permeabilidad respecto a la del terreno.

Los esquemas de los equipos antes mencionados están representados en las figs. 41 y 42. Es preciso que la actividad inyectada inicialmente se mezcle rápidamente en el recinto o tubo permeable y además es necesario, para obtener resultados confiables, corregir la curva obtenida, descontando la actividad o concentración residual.

Como trazador se usa generalmente el  $^{131}\text{I}$ ,  $^{82}\text{Br}$ ,  $^{198}\text{Au}$  y en al-

gunos casos el  $^{24}\text{Na}$ . El detector del equipo descrito es un tubo tipo G.M. colocado en el centro del recinto donde se inyecta el trazador. Cabe agregar que otros equipos utilizan un cristal de  $\text{INa (Tl)}$ , colimado, que permite medir solamente la actividad presente en el recinto sin "ver" la actividad que está en las inmediaciones de la perforación. Pueden estar dotados además de un agitador, fig. 41, que permite lograr una rápida homogeneización del nucleido; cuando este es inyectado.

En diques, construcciones subterráneas, etc. es necesario conocer la componente vertical de velocidad, importante en mecánica de suelos y estudios de filtraciones.

El esquema de la fig. 47 representa uno de estos equipos operando en una perforación. La velocidad vertical o caudal por el entubamiento puede calcularse por el método de los "dos picos" o bien por el método de las cuentas totales ya expuesto (58):

$$Q = \frac{\Delta I}{\Delta t} S \quad ; \quad Q = F \frac{A}{N}$$

Estos equipos a igual que los anteriores permiten ejecutar numerosas inyecciones de trazador, desde la superficie, sin necesidad de extraerlos de la perforación.

Por último mencionaremos, solamente, el instrumental destinado a medir la dirección de las aguas (fig. 48 y 49). Después de haberse inyectado el trazador en el pozo, se introduce la sonda que, colimada convenientemente (el colimador gira) permite conocer la orientación del nucleido que se ha disperso en torno a la perforación.

#### 4.2.1.2 Método de dilución a lo largo de toda la columna piezométrica.

Una variante de la técnica antes descrita se utiliza en España (61) y consiste en inyectar la solución trazadora en toda la columna piezométrica buscando la uniformidad de marcado con el desplazamiento vertical del inyector; luego, introduciendo una sonda prevista de uno o mas tubos tipo G. M. se determina la concentración en distintos niveles de la perforación.

Respecto a las técnicas hasta aquí mencionadas algunos autores hacen conocer ciertas limitaciones:

- En acuíferos heterogéneos los resultados obtenidos son representativos de la componente horizontal de velocidad si el número de mediciones y su distribución en el espacio es compatible con el área y características geofísicas del mismo. Se necesitan en general muchas mediciones.

- En embalses, por ejemplo, donde la componente vertical de velocidad puede ser importante, las técnicas de taponamiento para eliminar dicha componente son complejas y difíciles de materializar en grandes profundidades.

- La operación de estos equipos a profundidades superiores a los 200 m plantea también problemas de índole práctica.

- La variante descrita en último término, que solo requiere marcar uniformemente toda la columna piezométrica con el trazador y después medir con la sonda a lo largo de la misma, simplifica las operaciones y reduce el costo de los equipos. Estimamos que solo en acuíferos homogéneos puede obtenerse resultado satisfactorios.

#### 4.2.1.3 Método de inyección y bombeo (Single-well pulse technique).

El trazador es introducido en la perforación buscando una homogeneización completa del mismo, en toda la columna piezométrica. Después se inyecta, con caudal constante un cierto volumen de agua para que el trazador se aleje de las inmediaciones de la perforación; una vez finalizada la operación de inyección de agua se espera un tiempo prudencial, compatible con la velocidad estimada del agua, función del gradiente natural y la permeabilidad del acuífero en estudio. La velocidad de avance de la "nube radiactiva", en condiciones naturales como la expresada, está dada por:

$$v = \frac{r}{\tau} \quad (1)$$

v : velocidad del agua (m/día);

r : distancia entre la perforación y un punto, no conocido, es decir el baricentro de la "nube radiactiva" en el instante que finaliza el lapso;

$\tau$  : tiempo transcurrido entre el fin de la inyección y el principio del bombeo de recuperación.

Si se comienza a bombear (una vez finalizado el tiempo de espera) para recuperar el trazador inyectado, con un caudal  $Q$  ( $m^3/seg$ ) constante, el volumen (V) recuperado al cabo de un lapso t (seg) estará dado por:

$$V = r^2 h \cdot p = Q \cdot t \quad \therefore \quad T = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{\pi h p}} \quad (2)$$

r : distancia recorrida por el trazador en el acuífero (m);

h : altura del acuífero (m);

p : porosidad (%)

Reemplazando, luego (2) en (1):

$$v = \frac{\sqrt{Qt/\pi hp}}{\tau} \quad (3)$$

Realizando varias experiencias en análogas condiciones pero con distintos tiempos de espera la velocidad puede calcularse en base a la pendiente de la curva de la fig. 51.

El volumen de agua no marcada a inyectar en la perforación, tras el indicador radiactivo, solo cumple la función de alejar el trazador de las inmediaciones de la perforación para eliminar los errores aleatorios introducidos por la perturbación hidrodinámica intrínsecamente asociada a toda perforación (cañería, filtros, empaque, etc.)

El tiempo de espera debe ser siempre grande respecto a los lapsos de inyección y bombeo  $t'$  y  $t$ , pues, si durante la inyección el desplazamiento del trazador es del mismo orden de magnitud del desplazamiento producido durante la espera (producido por el gradiente y permeabilidad natural del medio), los resultados diferirán considerablemente de los reales.

Durante el bombeo de recuperación del trazador, parte del agua puede derivarse a un recipiente similar al de la fig. 52 b y así obtener  $A = f(t)$  tal como está indicado en la fig. 51 a.

Estas curvas pueden ser corregidas en caso de que la actividad inyectada en las distintas corridas no sea la misma. Cabe agregar que las curvas antes mencionadas permiten deducir la cantidad de trazador recuperado en cada experiencia.

Este método tiene una ventaja importante respecto a los otros

métodos en los que se utiliza una sola perforación: el entorno donde actúa el trazador es relativamente grande comparado con el entorno de influencia de la perforación y puede regularse en función del tiempo de espera  $\tau$

Por otra parte se recupera gran parte de la actividad inyectada (el porcentaje recuperado depende de la "calidad" del trazador y de las características fisicoquímicas del acuífero) reduciéndose así considerablemente la contaminación residual de las aguas.

#### 4.2.2. Métodos en los que se utilizan dos o mas perforaciones.

##### 4.2.2.1 Determinación de velocidades.

La dirección de las aguas subterráneas puede medirse inyectando el trazador en una perforación y detectando su paso en otra u otras perforaciones testigos o de observación, que estén situadas en torno a la de inyección.

La misma técnica es utilizada para conocer el tiempo de tránsito  $\Delta_t$  entre dos perforaciones y deducir la velocidad promedio  $v_m$ , distinta de la aparente y de la efectiva.

Aquí, igual que en medición de caudales y otras disciplinas es aconsejable adoptar como tiempo de tránsito del trazador al que media entre la inyección y el pasaje del 50 % del trazador por la perforación testigo, vale decir, el baricentro de la curva concentración-tiempo (o concentración-espacio recorrido).

Lo mismo puede decirse cuando se inyecta el trazador en un pozo y se registra su pasaje por otros dos situados aguas abajo:

$$v_e = \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{q}{pe}$$

$$v_m = \left( \frac{\Delta l}{\Delta t} \right) = \Delta l \left( \frac{1}{\Delta t} \right) \quad ; \text{ pues } \Delta l = \text{cte}$$

$$v_g = \Delta l \left( \frac{1}{\Delta t_m} \right) \left( \frac{1}{\Delta t_m} \right)$$

Como ya fué expuesto, lo que realmente se mide en el acuífero es:

$$\left( \frac{1}{\Delta t_m} \right) \text{ distinto de } \left( \frac{1}{\Delta t} \right)_m$$

$v_m$  : velocidad media del agua (cm/día);

$\Delta l$  : distancia ( $\Delta l = \text{cte}$ ) entre pozos de observación (cm);

$\Delta t$  : tiempo transcurrido entre la inyección y la detección (días);

$q$  : caudal;

$p_e$  : porosidad efectiva;

$v_g$  : velocidad del centro de gravedad de la "nube radiactiva" (cm/día).

La relación que liga a la velocidad del centro de gravedad y la velocidad media es mayor que la unidad.

$$\lambda = \frac{v_g}{v_m}$$

El error cometido, sin embargo, al suponer que la velocidad del centro de gravedad es igual a la velocidad media es casi siempre despreciable y solo ha de tenerse en cuenta cuando la dispersión longitudinal es muy grande.

Con movimiento laminar  $1 < R < 10$  ( ó  $1 < R < 700$  ?) similar al que se verifica en la mayoría de los acuíferos libres o confinados en los que la circulación se realiza por los intersticios o los poros de los sedimentos, arenas y gravas, la inyección del trazador en una perforación provoca una dispersión longitudinal similar a la dibujada en la fig. 53.

Los filetes líquidos recorren trayectorias algunas veces tortuosas que contribuyen al mezclado longitudinal, transversal y vertical. El cono de dispersión así formado puede ser interrumpido por superficies y estratos o pantallas impermeables como ocurre generalmente con los subalveos, en medios aluvionales, que suelen estar encauzados entre flancos impermeables. Fig. 53 b y c.

El cono de dispersión formado alcanza en medios arenosos un ángulo del orden de  $6^{\circ}$

En aguas subterráneas el límite de validez de las fórmulas utilizadas alcanza hasta el límite inferior del movimiento laminar; entre éste y el superior el movimiento es mixto; el movimiento turbulento en acuíferos ocurre con poca frecuencia. Ejemplos de este tipo de movimiento lo tenemos en subalveos de grano grueso, en fracturas, acanaladuras, etc. de rocas ígneas o sedimentarias muy consolidadas o en sedimentos flojos aluviales en los que el gradiente hidráulico es grande. También en roca de origen calcáreo el movimiento suele ser mixto o turbulento cuando la circulación se realiza por fisuras, juntas, diaclasas o acanaladuras producidas por disolución, ataque químico o fractura geológicas.

En los casos mencionados en último término la velocidad hallada con trazadores radiactivos, colorantes u otro tipo de indicadores no puede correlacionarse con la permeabilidad del medio a través de la fórmula de Darcy.

Cuando el movimiento es laminar y se inyectó en el acuífero un nucleído es conveniente tener idea, a menos aproximada, del orden de magnitud de la velocidad para poder seleccionar el trazador en función de su perfo-

do de semidesintegración (al cabo de 6 a 8 períodos la actividad residual es muy baja, 1,56 % a 0,78 %). Es por ello que en la tabla VII hemos indicado la velocidad del agua en distintos perfiles litológicos para dos valores de la pendiente hidráulica (1).

#### 4.2.2.2 Determinación de la transmisibilidad en acuíferos de distinta permeabilidad (64)

En acuíferos estratificados donde la permeabilidad presenta discontinuidades acentuadas es posible y en ciertos casos aconsejable determinar la transmisibilidad individual de las estratificaciones cuando existen intercomunicaciones entre las mismas.

Para describir una de las mas difundidas experiencias sobre este tema nos referiremos a la fig. 50 c en la que están representados dos acuíferos confinados.

Si inyectamos el trazador en la perforación I con filtros que interesan sólo al acuífero superior, y se comienza a bombear desde el "pozo de bombeo" tendremos:

$$Q_1 \cdot t = \pi r_1^2 b_1 p_1 \quad (1)$$

$$Q \cdot t = (Vp)_I \quad (2)$$

$$\frac{Q_1 \cdot t}{Q \cdot t} = \frac{\pi r_1^2 \cdot b_1 \cdot p_1}{(Vp)_I} \quad \therefore \quad (Vp)_I = \pi \cdot r_1^2 \cdot b_1 \cdot p_1 \frac{Q}{Q_1} \quad (3)$$

$Q_1$  : fracción del caudal bombeado que corresponde al acuífero superior;

$Q$  : caudal total bombeado en la corrida I;

$t$  : tiempo de bombeo;

$b_1$  : espesor del acuífero superior;

$p_1$  : porosidad del acuífero superior;

$r$  : distancia entre el pozo 1 y el pozo de bombeo.

Realizando una segunda corrida pero inyectando ahora el trazador en el acuífero inferior (perforación 2) y siguiendo el razonamiento anterior tendremos:

$$(Vp)_{II} = \pi \cdot r_2^2 \cdot b_2 \cdot p_2 \frac{Q}{Q_2} \quad (4)$$

Como la superficie piezométrica es la misma, las descargas parciales  $Q_1$  y  $Q_2$  son directamente proporcionales a las transmisibilidades parciales ( $T_1$  y  $T_2$ )

Reemplazando luego en (3) y (4):

$$(Vp)_I = \pi \cdot r_1^2 \cdot b_1 \cdot p_1 \frac{T}{T_1} \quad (5)$$

$$(Vp)_{II} = \pi \cdot r_2^2 \cdot b_2 \cdot p_2 \frac{T}{T_2} \quad (6)$$

y generalizando para varias napas superpuestas:

$$(Vp)_i = \pi \cdot r_i^2 \cdot b_i \cdot p_i \frac{T}{T_i} \quad (7)$$

Dividiendo ahora las expresiones (5) y (6):

$$\frac{(Vp)_I}{(Vp)_{II}} = \frac{r_1^2 \cdot b_1 \cdot p_1 \cdot T_2}{r_2^2 \cdot b_2 \cdot p_2 \cdot T_1} \quad \cdot \quad \frac{T_2}{T} = \frac{(Vp)_I \cdot r_2^2 \cdot b_2 \cdot p_2}{(Vp)_{II} \cdot r_1^2 \cdot b_1 \cdot p_1}$$

En virtud de ser la transmisibilidad total igual a la suma de las parciales:

$$\frac{T}{T_1} = \frac{T_1 + T_2}{T_1}$$

$$\frac{T}{T_1} = \frac{(Vp)_I r_2^2 b_2 p_2 + (Vp)_{II} r_1^2 b_1 p_1}{(Vp)_{II} r_1^2 b_1 p_1}$$

En el acuífero superior se verifica que:

$$T_1 = \frac{T}{\left[ \frac{(Vp)_I r_2^2 b_2 p_2}{(Vp)_{II} r_1^2 b_1 p_1} \right] + 1} \quad (8)$$

y en el acuífero inferior:

$$T_2 = \frac{T}{\left[ \frac{(Vp)_{II} r_1^2 b_1 p_1}{(Vp)_I r_2^2 b_2 p_2} \right] + 1} \quad (9)$$

Los volúmenes  $(Vp)_I$  y  $(Vp)_{II}$  pueden ser obtenidos durante la experiencia al igual que la transmisibilidad total  $T$  (ensayo de bombeo por métodos clásicos); los espesores  $b_1$  y  $b_2$  se sacan del perfil litológico y la porosidad  $p_1$  y  $p_2$  de ensayo de laboratorio. Los autores del trabajo mencionado llegan en este caso a eliminar la porosidad de las expresiones (7) y (8) ya que, el error introducido al suponerlas iguales, no afecta a la precisión que es dable esperar en este tipo de experiencias.

Este razonamiento es, además, solo válido si las perforaciones de inyección interesan solo a los acuíferos o estratificaciones respectivas y además las conclusiones pueden hacerse extensivas a mas de dos estratificacio-

nes de distinta permeabilidad.

Conocidas las transmisibilidades parciales pueden obtenerse las permeabilidades parciales.

En la fig. 54 se representan las curvas obtenidas en dos corridas realizadas en un acuífero con cuatro estratificaciones de permeabilidad bien diferenciable; los dos picos obtenidos en cada corrida denotan precisamente la diferencia de velocidad de las aguas en cada estratificación.

Describiremos (64) los resultados de esta experiencia en base a los esquemas y curvas de la fig. 54.

En algunos test previos utilizando métodos convencionales se determinó:

$K = 25 \text{ m/día}$ ;  $b = 10 \text{ m}$ ;  $T = 250 \cdot \text{m}^2/\text{día}$ ; coeficiente de almacenamiento: 13 %  
Gradiente: 1 - 1,5 ‰

Con los datos obtenidos en la experiencia descrita puede hallarse (ver fig. 54):

$$T_1 = \frac{T}{\left[ \frac{(Vp)_I r_2^2 b_2}{(Vp)_{II} r_1^2 b_1} \right] + 1} = \frac{250}{\left[ \frac{5200}{1950} \frac{15}{15} \frac{6,8}{3,5} \right] + 1} = 40,5 \text{ m}^2/\text{día}$$

$$T_2 = T - T_1 = 250 - 40,5 = 209,5 \text{ m}^2/\text{día}$$

$$K_1 = \frac{T_1}{b_1} = \frac{40,5}{3,5} = 11,6 \text{ m/día}$$

$$K_2 = \frac{T_2}{b_2} = \frac{209,5}{6,8} = 30,8 \text{ m/día}$$

$T_1 ; K_1$  : Transmisibilidad y permeabilidad del acuífero superior.

$T_2 ; K_2$  : Transmisibilidad y permeabilidad del acuífero inferior.

Usando los volúmenes correspondientes a cada uno de los picos (en vez del promedio de ambos, como se hizo hasta aquí) el autor determinó las permeabilidades parciales de las cuatro estratificaciones del perfil litológico mencionado.

Las perforaciones de observación 15 y 15 a de la fig. 54 se utilizan para extraer muestras periódicas y comprobar la actividad presente, en función de tiempo. Se pudo comprobar que los filetes líquidos marcados, prácticamente seguían líneas horizontales o, al menos, no hubo significativa cantidad de trazador, que, inyectado en el acuífero superior (perforación 13 a) se dirigió al acuífero inferior, y viceversa.

El trazador utilizado, que como ya lo expresamos antes tiene excelente comportamiento en las aguas subterráneas, fué el  $^{60}\text{Co}$  en forma de  $\text{K}_3^{60}\text{Co}(\text{CN})_6$  con un agregado de portador del orden de  $5 \text{ mg/m}^3$  agua.

$V_p$  : Volumen de agua extraída desde la inyección hasta que, por la salida del pozo de bombeo, pasó el 50 % de la actividad recuperada ( $\text{m}^3$ );

$r_3$  : distancia entre el pozo 3 y el pozo de bombeo (m);

$h_3$  : espesor del acuífero (m);

$p$  : porosidad (%).

La expresión anterior es válida para acuíferos confinados (fig. 50) Para acuíferos libres es preciso descontar el cono de abatimiento que en caso de no existir perforaciones de observación intermedias podría despreciarse siempre que el caudal bombeado sea pequeño o la distancia  $r_3$  grande.

Cabe agregar que aquí también conviene que las perforaciones interesen a todo el acuífero.

#### 4.2.2.3 Determinación de la porosidad.

Los métodos de laboratorio usados con frecuencia para determinar la porosidad de los acuíferos sólo "son representativos de una porción infinitesimal de la zona que se estudia". Cabe agregar que "se han utilizado una serie de aparatos para tomar muestras del terreno sin perturbar. Siempre existe, sin embargo, una gran modificación de las condiciones del terreno al obtener la muestra". (54)

Las técnicas nucleares son en este caso, particularmente sencillas y expeditivas: se inyecta el trazador en, por ejemplo, la perforación 3 (fig. 50 a) y se comienza a extraer agua desde la perforación de bombeo midiendo el caudal  $Q$  o el volumen de agua recogida  $V_a$ .

La porosidad ( $p_e$ ) hallada por éste método es aproximadamente igual a la porosidad eficaz que, por otra parte, es la que mas interesa al hidrólogo.

$$p_e (\%) = \frac{V_a}{V_t} 100 \simeq \frac{Q \cdot t}{\pi \cdot r_3^2 h_3} 100 \quad (1)$$

$p_e$  : porosidad eficaz (%);

$V_a$  : volumen de agua recogida ( $m^3$ );

$V_t$  : volumen del cilindro que tiene por centro el pozo de bombeo y radio la distancia entre éste y el pozo de inyección ( $r_3$ );

$h_3$  : altura del acuífero (m);

$Q$  : caudal de bombeo ( $m^3$ /seg);

$t$  : tiempo transcurrido entre el instante de inyección y el instante que llega el 50 % del trazador a la superficie (seg);

$r_3$  : Radio o distancia entre el pozo de bombeo y el pozo de inyección.

El tiempo  $t$  es determinado en base al lapso transcurrido entre el instante de inyección del trazador y el momento que ha salido el 50 % del mismo de la cañería de extracción o bombeo (el baricentro de la curva concentración-tiempo). Generalmente se obtiene esta curva en base a detectores colocados adosados en la cañería de bombeo.

La validez de la expresión (1) está limitada a los acuíferos confinados, ya que en los libres es necesario corregir descontando el volumen del cono de abatimiento, particularmente en aquellos casos que la distancia  $r_3$  es reducida.

La velocidad radial de los filetes líquidos que convergen al pozo durante el bombeo es generalmente muy grande respecto a la velocidad que tendrían esos filetes en condiciones naturales; si esto no ocurriese, la fórmula (1) tendría que ser también corregida.

Es conveniente que la distancia entre perforaciones ( $r_3$ ) sea superior al espesor del acuífero ( $h_3$ ) o en el caso de napas libres, a la altura comprendida entre la capa impermeable y el nivel del estrato saturado.

Los esquemas de las fig. 50 a y 50 b permiten apreciar las características de dos experiencias de este tipo los que sintetizamos a continuación.

(32), (6) y (66)

Experiencia 1:

Tipo de estratos: Formación dolomítica.

Trazador y actividad:  $^{58}\text{Co}$   $[\text{K}_3\text{Co}(\text{CN})_6]$ ; 110 me

Portador: 10 lts al 5 % de la misma solución.

Distancia entre perforaciones:  $r = 250$  m

Tiempo de tránsito (Inyección hasta pasaje 50 % de la actividad)  $t \approx 2$  meses.

Porosidad efectiva:  $p_e = 3\% \pm 0,45\%$  (calculada)

Principal inconveniente y fuente de error: determinación del espesor del acuífero.

Experiencia 2:

Tipo de acuífero: arena de tamaño mediano.

Trazador y actividad: T; (HTO); 1 c

$^{131}\text{I}$ ; (INa); 28,5 mc

Distancia entre perforaciones: 18,3 m

Espesor del acuífero: 6,1 m

Caudal de bombeo: 135,5 m<sup>3</sup>/h

Porosidad efectiva:  $p_e$  32 % (calculada)

En ambos casos el trazador introducido en el piezómetro de inyección fué desalojado del mismo introduciendo agua para eliminar los efectos o perturbaciones hidrodinámicas producidas por la perforación, filtro, etc.

4.2.2.4 Todo acuífero o subalveo vincula el área de recarga o alimenta-

ción con la zona de alumbramiento, surgencia o extracción. Si se modifica el escurrimiento natural de la recarga es preciso prever las alteraciones lógicas que se produzcan en la extracción o surgencia.

Las obras hidráulicas (diques, embalses, pozos de extracción, sistemas de inundación para recarga artificial, etc.) alteran las naturales condiciones de escurrimiento y drenaje de las aguas superficiales y subterráneas; para mantener el equilibrio hidrológico es preciso, si se quiere conservar indefinidamente estos acuíferos como fuentes de abastecimiento adecuar el balance de las aguas que entran (recarga) y salen (extracción) a las posibilidades y necesidades de la cuenca sin dejar de contemplar los aspectos económicos, legales y técnicos afectados por cualquier alteración de los regímenes en escurrimiento.

Antes de planificar en áreas a recargar estas obras de ingeniería es necesario buscar, por lo tanto, respuesta a dos preguntas (fig. 55):

- Las aguas superficiales (ríos, escurrimientos, etc.) del área de posible recarga que se quiere explotar, están vinculados o interconectados con surgencias, alumbramientos, etc. de la misma cuenca o subcuenca que ya son explotados con fines de riego, abastecimiento de agua potable, etc.

- Si es afirmativa la respuesta a la pregunta anterior; cuál es la extracción límite en la recarga que no afecta el normal aprovechamiento y uso de las aguas en el área de la descarga ?

La decisión de emplear radioisótopos artificiales naturales (T) o isótopos estables (D y/o  $^{16}\text{O}$ ), debe estar precedido por estudios previos.

Por lo general la solución de problemas de esta naturaleza es compleja y los resultados obtenidos, después de haber empleado una determinada técnica no siempre son concluyentes.

Es porque frecuentemente se apela a mas de una técnica, para alcanzar resultados mas completos o bien aproximarse a la certeza, cuando, por ejemplo, la incógnita es la planteada en la primera pregunta anterior.

Solo los trazadores radiactivos podrían dar respuesta afirmativa o negativa concluyentes en caso de ser inyectados en una zona de infiltración. (fig. 55). (El río Aguas Negras en este caso) y detectada su presencia en las surgencias. Más, antes de realizar esta experiencia es preciso estimar por lo menos el lapso o tiempo de tránsito.

Aquí, como ocurre frecuentemente la distancia comprendida entre la zona de infiltración y la de alumbramiento es relativamente grande (10-20 km) y el gradiente no muy pronunciado, razón por la cual el tiempo de tránsito puede ser de varios años y deberían ser descartados los radioisótopos artificiales; y sería preciso acudir a los naturales o bien a los isótopos estables.

Tampoco pueden deshecharse las soluciones que pueden ofrecer las técnicas hidrogeológicas convencionales aunque, en este caso, seguramente el costo del estudio sería elevado, por la necesidad de realizar varias perforaciones en ambos extremos y puntos intermedios del área de estudio, con el fin de conocer y correlacionar estratos.

Las técnicas nucleares podrían contribuir, en este último caso, a la determinación de los parámetros físicos del acuífero de acuerdo a lo ya expuesto.

Utilizando tritio como trazador se han realizado estudios de interconexión y medición de caudales de aguas subterráneas que circulan por grietas, fisuras, diaclasas, etc. en estratos calcáreos y terrenos de formación "karstica" (71) (72).

El tritio, como agua tritada fué mezclado en el acuífero y, su presencia fué detectada y medida aguas abajo, en alumbramientos o surgencias distantes, en línea recta del origen, mas de treinta kilómetros. En esta experiencia realizada en Grecia, pudo determinarse así tiempo de tránsito, volumen almacenado y caudal.

Las actividades inyectadas estaban comprendidas entre 400 y 100 c, y los caudales del orden de los 20 m<sup>3</sup>/seg. Las figs. 56 y 57 permiten apreciar las curvas obtenidas en la descarga midiendo la actividad de tritio en las fuentes o alumbramientos.

En base al trabajo realizado, en Grecia, aquí mencionado, Clayton y Welv (71) establecieron ecuaciones para correlacionar la dispersión longitudinal (en medio turbulento) del trazador en función de las distintas recorridas Figs. 58 y 59. La ecuación hallada en este caso para vincular velocidades y tiempo de tránsito fue la siguiente:

$$V^{6,5} = \frac{6,92 \cdot 10^4 \cdot h \cdot T \cdot Q^{3/2}}{t_4}$$

V : velocidad (definida respecto al pico concentración-tiempo) en (cm/seg);

h : diferencia de altura entre inyección y surgencias (cm);

Q : caudal calculado (cm<sup>3</sup>/seg);

t y T : ver figs. 58 y 59.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Schoeller, 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., Orlob, 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'hydraulique 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 of 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 ( $^{131}\text{I}$ ) 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  $^{32}\text{P}$ .

- 15.- Gómez, H. "Radiografía industrial con radioisótopos" Reseña teórico-práctica, publicación interna EN-6/13, CNEA, Buenos Aires, feb. 1969.
- 16.- Evans, R. The atomic Nucleus. Nc. 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 lever tritium measurement with the liquid scintillation spectrometer. P. Rep. No. 1 oct. 1, 1959. Sanit Eng. Res. Lab. Univ. of Calif. Berkely.
- 21.- Balloffet, Gotelli, Meoli, Hidráulica, Ediar Soc. Anon. Editores, seg. ed. (1952)
- 22.- Alquier, Courtois et all., La notion de "Bon Melange" dans l'emploi des traceurs - IAEA/SM/129/26 - Vienna 1970 Col. sur l'emploi des isotopes en hydrology.
- 23.- Guizerix, J., et all. Les mesures de débits effectuées en France a l'aide de traceurs radioactifs por la methode d'integration.
- 24.- Masao Kato et all. A study in River engineering on the Rad. in Hydrology. Proc. of a Symp. Tokyo, 5-9 March 1962.
- 25.- Timblin, et all. Use of rad. for open Channel flow measurements. Proc. of a Sim. Tokyo 5-9 march 1962.
- 26.- Hull D.E. et all., Flow measurements by the total - count method - Repr. from 2nd UN Genova Conference.
- 27.- Hull, D.E., The total count technique; a new principle in flow measurement Int. J. Appl. Radiat. Isotops 4 (1958).
- 28.- Chesselet, et all. Determination par detection nucleaire des coefficients de diffusion. Rad. in Hydrology - Proc. of a symp. Tokyo, 5-9 march, 1963.
- 29.- Findeis, A., Vestal, M., Johnston, W., Hych dilution on-stream isotopic tracer techniques - Conf. on the use of rad. in the physical sciences and

- industry - Ricc/205 - Copenhagen, 1960.
- 30.- Hull, D.E., Dispersion and persistence of tracer in River flow measurement Int. Journal of Appl. Rad. isotopes, 1962, Vol. 13.
  - 31.- Berg, O., and Somer, E. Determination of the distribution of sewage concentration in large natural waters from planned sewage outlets.
  - 32.- Int. Atomic Energy Agency - Guidebook on nuclear techniques in Hydrology Technical Reports series No. 91.
  - 33.- Castagnet, A.C., Gómez, H.R. Técnicas y equipos nucleares para la medición y control del petróleo, del gas y la petroquímica. Inst. Arg. del Petróleo.
  - 34.- C.N.E.A., Aplicación de Radioisótopos en la Industria Argentina (Encuesta Internacional).
  - 35.- Documento Schlumberger No. 8 Introducción al método de perfilaje de pozos (Schlumberger), 1958.
  - 36.- Kokesh, F.P., Gamma Ray logging, The Oil and Gas Journal, 26-7-51
  - 37.- Dewan J.T., Stone, O.L., Morris, R.L., Results of Chlorine Cogging in cased holes PN 1561-G; Society of Petroleum Engineers of AIME.
  - 38.- Cambell, H.F. OE/65-3, Welex, A Division of Halliburton Comp. 1965.
  - 39.- Alekseev and Srebrodolsky, Rad. tracers in Geophysics. Proc. of Symposium, Praga, 21-25 Nov. 1966.
  - 40.- Watkins, J.W., Dunning, H.N., Los isot. rad. en la invest. de la prod. de petróleo. Acta: C.E.A.
  - 41.- Gondovin, M et Comier, J.J. Etude du champ petrolifere D'HASSI MESSAOUD por inyeccion de Methane, Ethane, propane et butane trities, Proc. of a Symposium Prague, 21-25 Nov. 1966, 161.
  - 42.- Hull, D.E. Rad. tracers to merk interfaces and measure intermiscing in pipe lines. Ind. Chem. No. 11 (1952)
  - 43.- C.N.E.A. Norma de Seguridad Radiológica y Nuclear.
  - 44.- Bondy Ch., Vidal, J.P., Robin, G. La méthode des tracers actives es ses Appl. récentes a la verrerie et an pétrole, Suppl. and bulletin d'information 1967 No.66.

- 45.- Beswick, C.K. Routine industrial uses of radioactive tracers. (SM-84/2) Proc. of a Symposium, Prague, 21-25 Nov. 1966, 21
- 46.- Comanescu, P. Sandru et Tropa, A., Dev. Rec. de l'utilisation des traceurs rad. dans l'industrie Roumaine du petrole Proc. of a Symp. Prague, 21-25 nov. 1966.
- 47.- Weber, Rad. tracer success full in prod. pipe line appl. Oil and gas Journal; 10 nov. 1952.
- 48.- Teilier, C. et all. Quelques appl. des rad. a per. courte dans l'ind. gaziers Francais. Conf. Vienna 5-9 nov. 1962.
- 49.- Williams, M. Nuclear Eng. and Sc. Conf. 4-7 april 1960 paper No. 48.
- 50.- Joly, J. Rad. and Geology, London Arch Constable and Co, Ltda.
- 51.- Plata Bedmar, X curso de apl. de los rad. en ind., Conferencia No. 19 y 20.
- 52.- Kohl, J. and oll. Rad. Appl. Eng. Van Vostrand Nuclear Sc. Series.
- 53.- Tosovac, T. et all. Study of the dispersion ability and some other characteristics of the Danube by nuclear techniques SM 129/30 Symp. on the use of isotopes in Hydrology - Vienna 1970.
- 54.- Benites, A. Captación de aguas subterráneas (Editorial Dosset SA. Madrid)
- 55.- Manual de aguas subterráneas (Univ. Central de Venezuela.
- 56.- Payne Bryen. Principles of the use of environmental tritium. (Inter Reg. training course on the appl. of isotopes techniques in Hydrology (Sao Pablo-Brazil-1969).
- 57.- Sauzey G. Theoretical and mathematical approach or eriticism of concepts used in tracer techniques.
- 58.- Halevy, E. Mosertt, et all. Borehole Dilution Techniques: A critical review Isotopes in Hydrology (Proc. Symp. Vienna, 1966).
- 59.- Silva, C., et all. Estudio del flujo y dirección de aguas subterráneas en el salar de Bellavista (Univ. de Concepción o Inst. Central de Químicos. Chile 67)
- 60.- Guizerix J. et all. Appareil pour la mesure des vitesses relatives des eaux souterraines pour la méthode de dilution ponctuelle (Rad. in Hydrology. Proc. of a symp., Tokyo, 1963).

- 61.- Baonza, E. y otros. Aplicación de la técnica del pozo único mediante el mercado de toda la columna piezométrica. (IAEA TSM/129/42 Simposio sobre el empleo de isótopos en hidrología. Viena 1970).
- 62.- Danel P., La mesure des débits des eaux souterraines (Paris-Unesco Actes colloque Ankara vol. 2, págs. 104-112)
- 63.- Mandel S., Hydrogeological field work with radioactive tracers in Israel up to may 1960 (Proc. IASH Conf., Helsinki, 1960).
- 64.- Working group on isotopes in hydrology (Grenoble, october, 1965; STI/REP/104, august 1966).
- 65.- Universidad Central de Venezuela. Manual de Aguas Subterráneas.
- 66.- Wiebenga, W.A. et all. Rad. as ground water tracers (I. Geophys Res.72, 967)
- 67.- Gómez, H.R. Determinación de posibles interconexiones entre aguas superficiales y alumbramientos o surgencias de la misma subcuenca (Informe preliminar, CNEA).
- 68.- Linsley, Kohler, Paulhus. Hidrología para ingenieros (Mc. Graw Hill. Book Company).
- 69.- Dapples, E.C. Geología básica en ciencia e ingeniería (Editorial Omega S.A. Barcelona).
- 70.- Geological survey U.S. Dec. of the Interior. Métodos para la recopilación e interpretación de datos sobre aguas subterráneas (Doc. 1544)
- 71.- Clayton C. and Webb J.W. The use of turbulent dispersion to study the movement of underground Streams )Int. Journal of Appl. Rad. and Isotopes 1965 Vol 16 págs.171-176).
- 72.- Burdon, D.J. et all. The use of tritium in tracing karst Groundwater in Greece (Proc. of a Symp., Tokyo, march 1963). -

## Radioisotopos usados en Hidrología

Radioisotopo	Formo química mas usual	Periodo de semi-desintegración	Concentración max. permisible en agua x		Tipo de radiación Princip. componentes		Algunas referencias con respecto a su comportamiento xxxx
			$\mu\text{C}/\text{cm}^3$		Beta	Gomma	
			xx	xxx	MeV	MeV	
<sup>3</sup> H	HTO	12,3 a	0,1	$3 \cdot 10^{-3}$	0,018		I II
<sup>14</sup> C		5760 a	0,2	$8 \cdot 10^{-4}$	0,159		
<sup>24</sup> Na		15 h	$6 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	1,40	2,75 1,57	III IV
<sup>32</sup> P		14,2 d	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	1,71		IV
<sup>35</sup> S		89 d	$2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-5}$	0,167		IV
<sup>36</sup> Cl		$3 \cdot 10^5$ a	$2 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-5}$	0,71		II
<sup>45</sup> Ca	Ca EDTA	165 d	$3 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-6}$	0,26		III IV V
<sup>46</sup> Sc		84 d	$10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-5}$	0,36	1,12 0,89	IV V
<sup>51</sup> Cr	Cr EDTA	27,8 d	0,05	$2 \cdot 10^{-3}$		0,32	II IV V
<sup>58</sup> Co	Co EDTA K <sub>3</sub> Co(CN) <sub>6</sub>	72 d	$4 \cdot 10^{-3}$	$10^{-4}$	0,47	0,81	V
<sup>59</sup> Fe	Fe EDTA	45 d	$2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-5}$	0,27 0,46	1,10 1,59	IV V
<sup>60</sup> Co	Co EDTA K <sub>3</sub> Co(CN) <sub>6</sub>	5,2 a	$10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	0,31	1,17 1,33	II IV V
<sup>65</sup> Zn	Zn EDTA	245 d	$3 \cdot 10^{-3}$	$10^{-4}$		1,12	IV V
<sup>82</sup> Br	Br-NH <sub>4</sub> :BrNa	36 h	$8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0,45	0,55 1,47	II
<sup>86</sup> Rb		19 d	$2 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-5}$	0,68 1,76	1,08	IV
<sup>89</sup> Sr		51 d	$3 \cdot 10^{-4}$	$10^{-5}$	1,46		IV
<sup>90</sup> Y		89 a			0,54		IV
<sup>90</sup> Y		64 h			2,26		IV
<sup>106</sup> Rw-Rh							II IV V
<sup>110</sup> Ag		253 d	$9 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	0,88 0,66		
<sup>114</sup> In			$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$			II IV V
<sup>124</sup> Sb		60 d	$7 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	0,61 0,22	1,70 0,72	IV V
<sup>131</sup> I	I Na	8 d	$6 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-6}$	0,61	0,36 0,64	II
<sup>140</sup> Ba-La		12,8 d 40 h	$8 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	1,38 etc.	1,60 etc.	IV
<sup>143</sup> Pr			$10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$			IV
<sup>147</sup> Pm		2,6 a	$8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0,22		IV
<sup>170</sup> Tm		127 d	$10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	0,97	0,084	IV
<sup>192</sup> Ir	Ir EDTA	74 d	$10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-5}$	0,67 0,54	0,32 0,46	IV
<sup>198</sup> 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 II ACTIVIDAD RESIDUAL EN FUNCION DEL No. DE PERIODO TRANSCURRIDO

No. DE PERIODOS TRANSCURRIDOS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% ACTIVIDAD RESIDUAL	100	50	25	12,5	6,25	3,12	1,56	0,78	0,39	0,20	0,10

TABLA III ESPESORES MEDIOS EN AGUA

ENERGIA	ESPESOR DE SEMIRREDUCCION	ESPESOR PROMEDIO
	$X_{1/2} = \frac{0,693}{\mu_{01}}$	$X'_{1/2} = \frac{1}{\mu_{01}}$
	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  
Sin Enriquecimiento (2) (5)

RADIOISOTOPO	$^3\text{H}$	$^{51}\text{Cr}$	$^{131}\text{I}$	$^{82}\text{Br}$
C.M.M. ( $\mu\text{C}/\text{m}^3$ ) precisión : 1 %; probabilidad: 64 %	50	30	4	1
	c. líquido "Packard"	Detector utilizado		
		Cristal de INa (Tl): 4,5 x 5 cm		
	2 h	Tiempo de contaje		
		1.000 seg	1.000 seg	1.000 seg
		Detector en el centro del cilindro de:		
		18 l	18 l	18 l
		$^{131}\text{I}$	$^{82}\text{Br}$	
C.M.M. ( $\mu\text{C}/\text{m}^3$ ) precisión : 1 % probabilidad: 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 - 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 solventes orgánicos	Reducida ~ 10 g/l

Tabla VI

Trazadores convencionales usados en Hidrología (19)

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

TABLA VII

Velocidad efectiva de circulación de las aguas en distintos tipos de acuíferos (2). -

	Pendiente hidráulica	
	1	5/1000
Arcilla	$3 \cdot 10^{-5}$ a $10^{-7}$ m/día o sea 10 a 0,1 mm/año	0,05 a 0,0005 mm/año
Arcilla-limo-arena	1 m/día	5 m/día
Arena de dunas	20 - 48 m/día	0,10 a 0,22 m/día
Arena fina	0,25 - 75 m/día	0,00125 a 0,375 m/día
Arena gruesa	2,5 - 500 m/día	0,0125 - 2,50 m/día
Gravilla-grava	2,5 - 2.500 m/día	0,0125 - 12,5 m/día
Aluviones	250 - 1.250 m/día	1,5 - 6,25 m/día

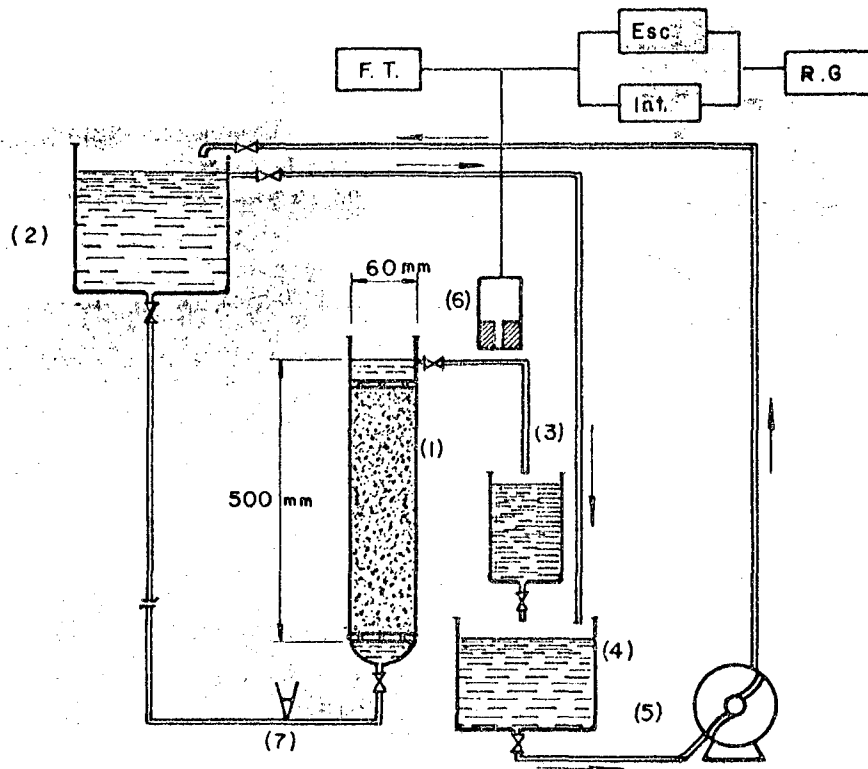
**TABLA VIII**

Permeabilidad m/día	$10^4$	$10^3$	$10^2$	$10^1$	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
Permeabilidad cm/seg	$10^2$	$10^1$	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$
Tipo de terreno	Grava limpia		Arena limpia mezcla Grava arena			Arena fina, arena arcillosa mezcla arena, limo y arcilla, arcilla estratiforme				Arcillas no meteorizadas	
Calificación	Buenos acuíferos					Acuíferos pobres				Impermeables	
Capacidad de drenaje	Drenan bien						Drenan mal		No drenan		
Uso en Presas	Partes permeables de la presa						Uso en pantallas impermeables				

Gráfico auxiliar utilizado para realizar estimaciones aproximadas de la permeabilidad en acuíferos. -

TABLA IX

MATERIAL	Porosidad %	Rendimiento específico %	Permeabilidad cm/seg
Arcilla	45	3	$0,5 \times 10^{-4}$
Arena	35	25	$400 \times 10^{-4}$
Grava	25	22	$2.500 \times 10^{-4}$
Grava y arena	20	16	$950 \times 10^{-4}$
Arenisca	15	8	$330 \times 10^{-4}$
Calizas densas y esquistos	5	2	$0,5 \times 10^{-4}$
Cuarcita y granito	1	0,5	$0,5 \times 10^{-4}$



- (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 de caudal variable
- (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.

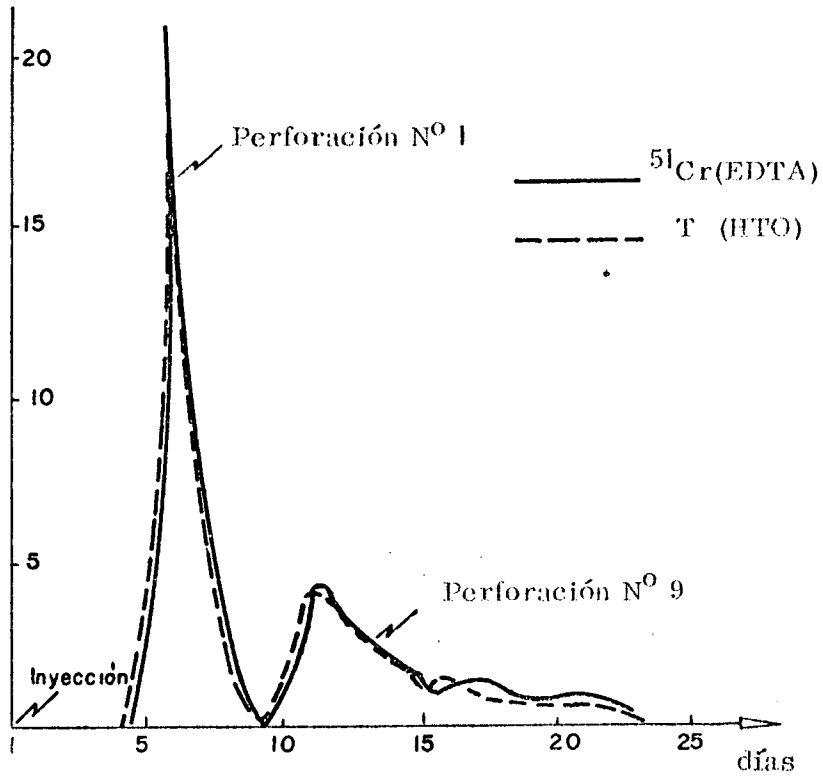


Fig. 2 - Comportamiento del  $^{51}\text{Cr}(\text{EDTA})$  en acuíferos de origen glacio-fluvial. Distancia inyección-detección 2,5m para la perforación N° 1 y 11 m para la perforación N° 9 (12)

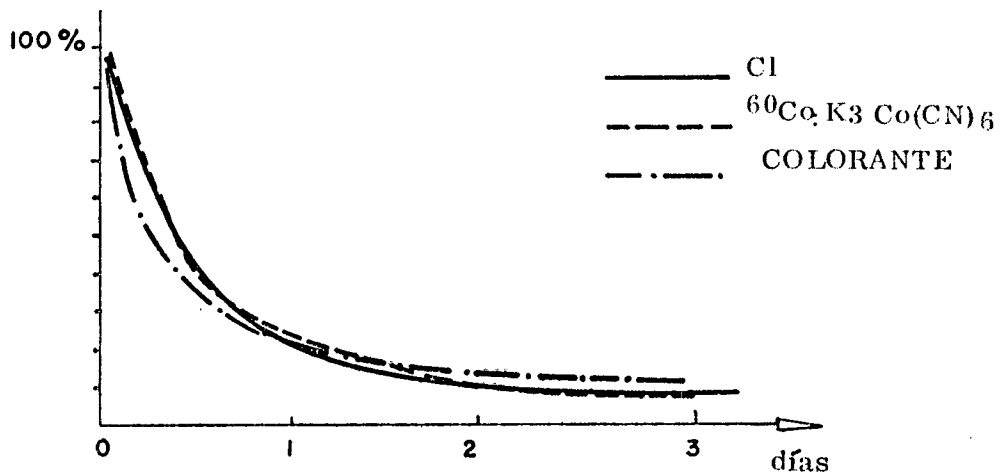


Fig. 3 - Comportamiento del  $^{60}\text{Co}$  frente al Cl y un colorante en formación arenosa. Método del pozo único (9)

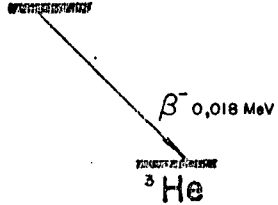
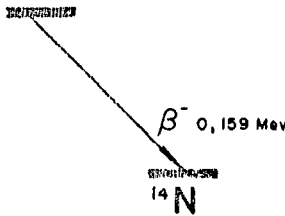
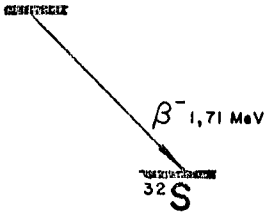
${}^3\text{H} ; T_{1/2} = 12,62 \text{ a}$	 <p> <math>E_{\text{max}} = 18 \text{ kev}</math>  <math>E_{\text{med}} = 5,5 \text{ kev}</math> </p>	<p>Recorrido para <math>E_{\text{max}}</math></p> <p>En aire: 4,5 mm En agua: 6 <math>\mu</math></p>	<p>Origen Natural:</p> <p><math>{}^{14}\text{N} (n, \alpha) {}^3\text{H}</math></p> <p>Producción Artificial:</p> <p><math>{}^6\text{Li} (n, \alpha) {}^3\text{H}</math></p> <p>Forma <math>{}^3\text{H}_2\text{O}</math></p> <p>Unidad:</p> <p><math>1 \text{ UT} = \frac{1 \text{ atomo } {}^3\text{H}}{10^{18} \text{ atomos H}} =</math>  <math>7,1 \cdot 10^{-3} \text{ des/min cm}^3 \text{ (agua)}</math></p>
${}^{14}\text{C} ; T_{1/2} = 5760 \text{ a}$	 <p> <math>E_{\text{max}} = 159 \text{ kev}</math>  <math>E_{\text{med}} = 50 \text{ kev}</math> </p>	<p>Recorrido para <math>E_{\text{max}}</math></p> <p>En aire: 19,3 cm En agua: 250 <math>\mu</math></p>	<p>Origen Natural:</p> <p><math>{}^{14}\text{N} (n, p) {}^{14}\text{C}</math></p> <p>Producción Artificial:</p> <p><math>{}^{14}\text{N} (n, p) {}^{14}\text{C}</math></p>
${}^{32}\text{P} ; T_{1/2} = 14,3 \text{ d}$	 <p> <math>E_{\text{max}} = 1,71 \text{ Mev}</math>  <math>E_{\text{med}} = 700 \text{ kev}</math> </p>	<p>Recorrido para <math>E_{\text{max}}</math></p> <p>En aire: 603 cm En agua: 8 mm</p>	<p>Proceso de Producción:</p> <p><math>{}^{31}\text{P} (n, \gamma) {}^{32}\text{P} ; \sigma = 0,19 \text{ borne}</math></p> <p>Actividad Producida con:</p> <p><math>(10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{seg})</math></p> <p>en:</p> <p>1 semana 25 mc/g de P</p>

Figura 4

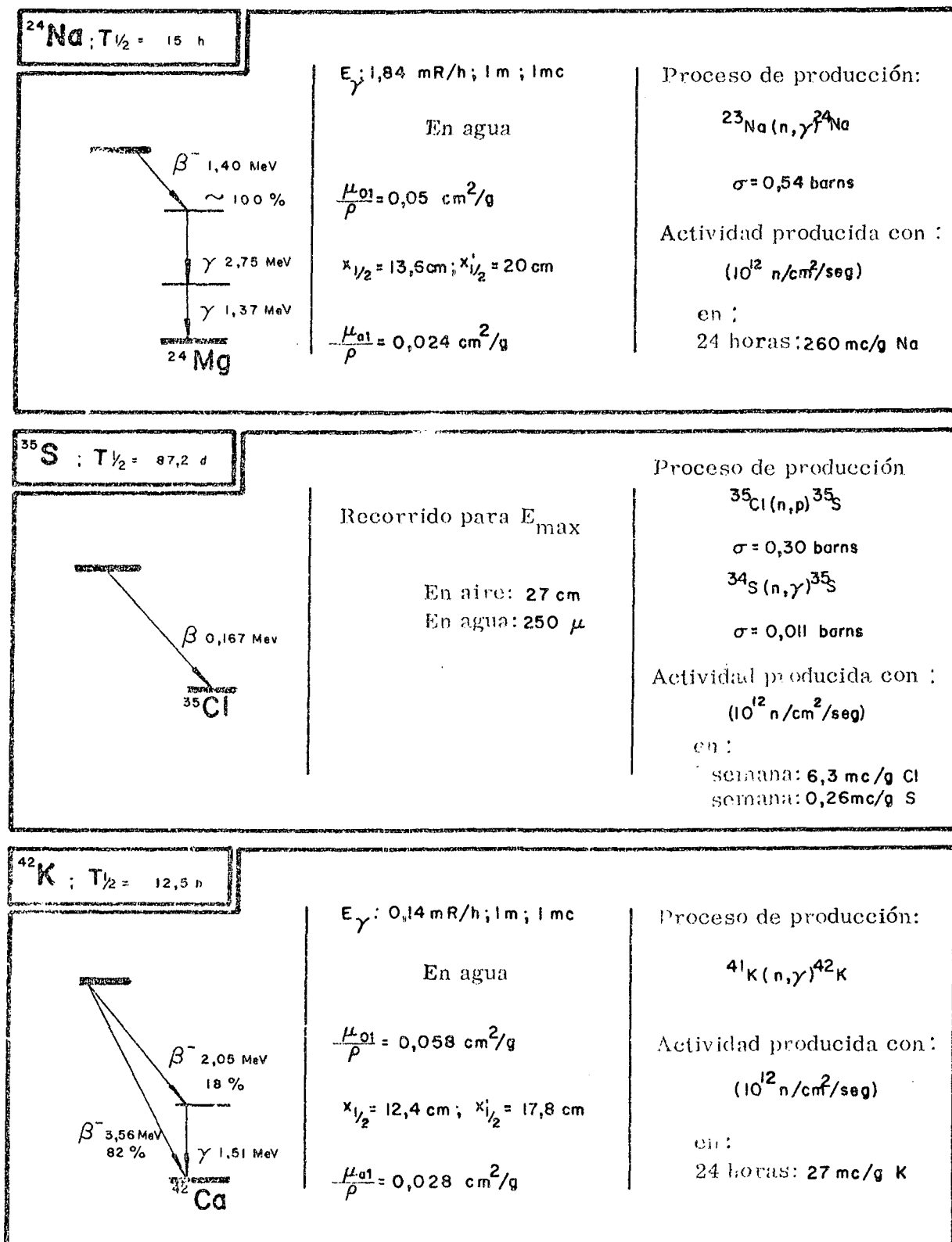


Figura 4

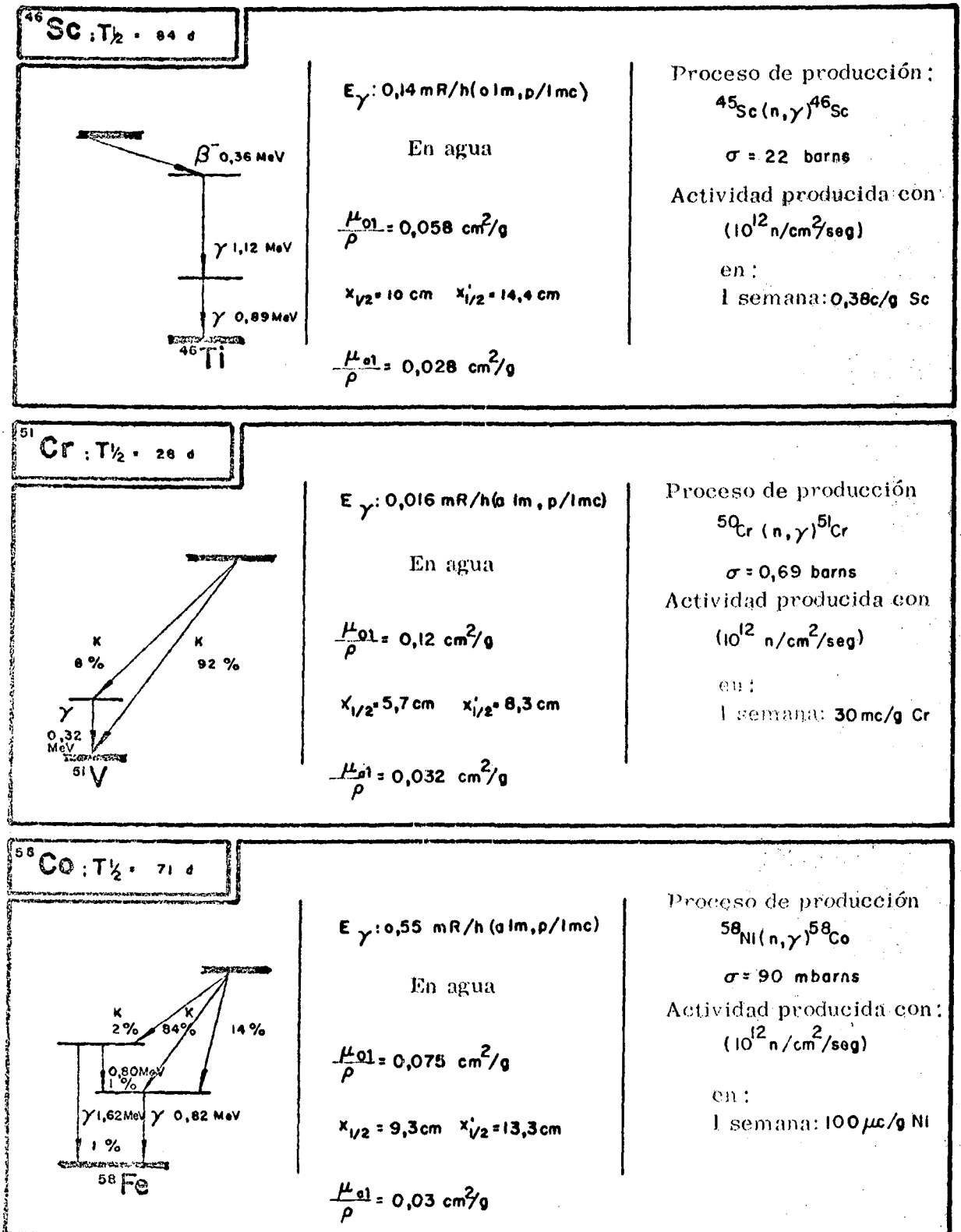


Figura 4

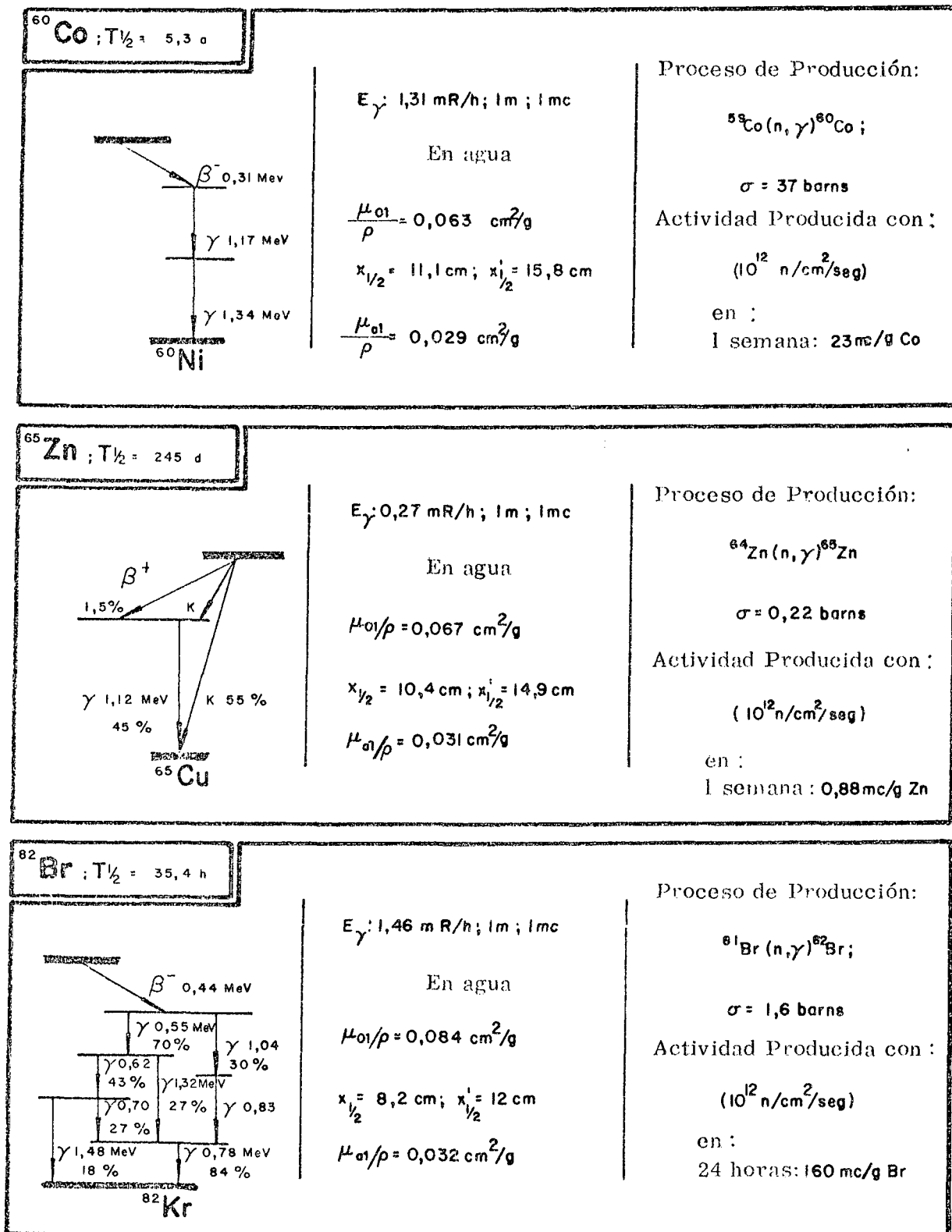


Figura 4

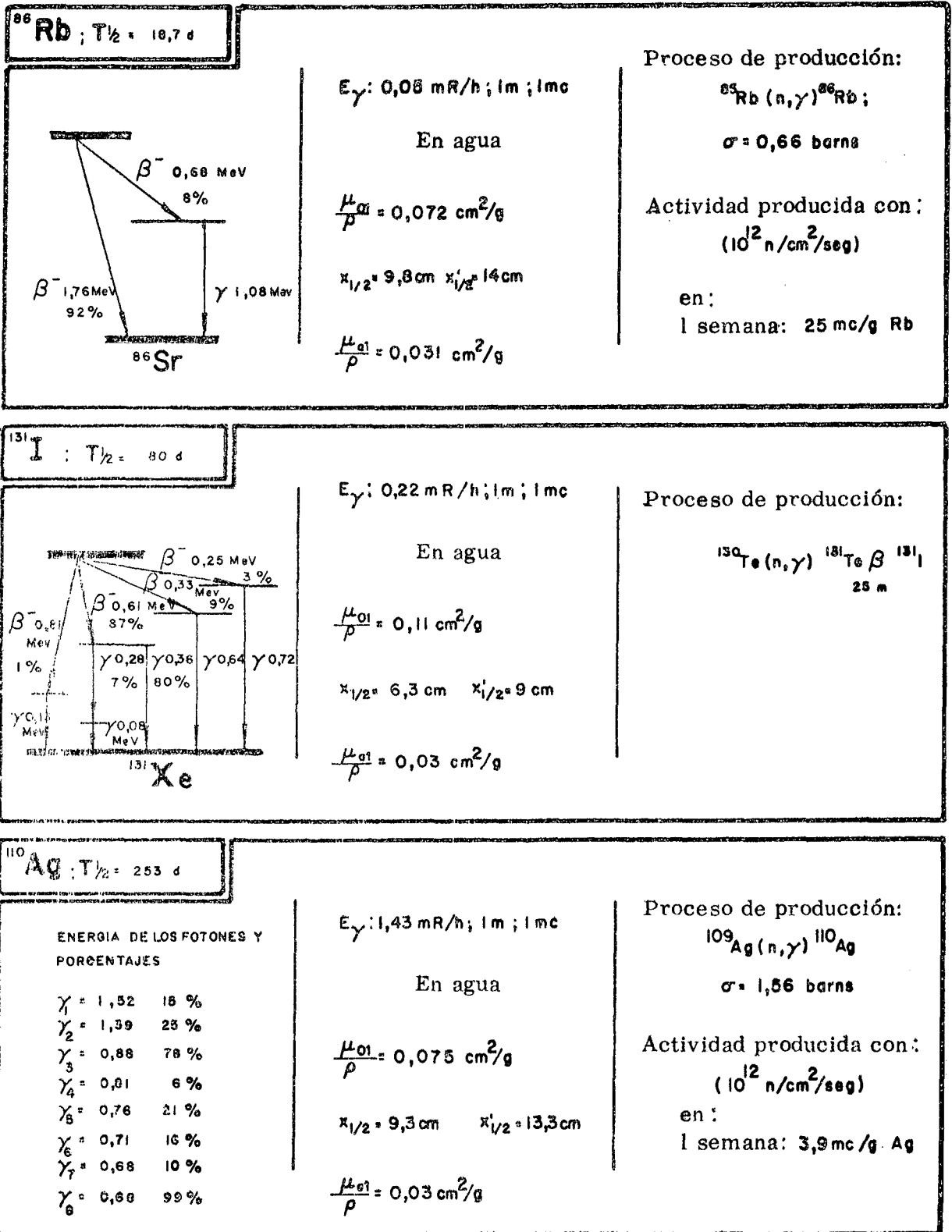
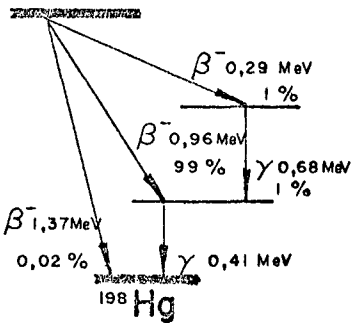


Figura 4

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;"> <math>^{192}\text{Ir}; T_{1/2} = 74 \text{ d}</math> </div> <p style="text-align: center; margin: 0;">ENERGIA DE LOS FOTONES Y PORCENTAJES</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td><math>\gamma_1 = 0,61</math></td><td style="text-align: right;">7 %</td></tr> <tr><td><math>\gamma_2 = 0,60</math></td><td style="text-align: right;">12 %</td></tr> <tr><td><math>\gamma_3 = 0,46</math></td><td style="text-align: right;">57 %</td></tr> <tr><td><math>\gamma_4 = 0,32</math></td><td style="text-align: right;">85 %</td></tr> <tr><td><math>\gamma_5 = 0,31</math></td><td style="text-align: right;">30 %</td></tr> <tr><td><math>\gamma_6 = 0,30</math></td><td style="text-align: right;">25 %</td></tr> <tr><td><math>\gamma_7 = 0,20</math></td><td style="text-align: right;">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><math>E_\gamma = 0,48 \text{ mR/h; lm; lmc}</math></p> <p><math>\frac{\mu_0}{\rho} = 0,105 \text{ cm}^2/\text{g}</math></p> <p><math>x_{1/2} = 6,6 \text{ cm}; x'_{1/2} = 9,6 \text{ cm}</math></p> <p><math>\frac{\mu_a}{\rho} = 0,033 \text{ cm}^2/\text{g}</math></p>	<p>Proceso de producción:</p> <p style="text-align: center;"><math>^{191}\text{Ir}(n,\gamma)^{192}\text{Ir};</math></p> <p style="text-align: center;"><math>\sigma = 370 \text{ barns}</math></p> <p>Actividad producida con:</p> <p style="text-align: center;"><math>(10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{seg})</math></p> <p>en:</p> <p style="text-align: center;">1 semana: 1,7mc/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 %															

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 5px;"> <math>^{198}\text{Au}; T_{1/2} = 65 \text{ h}</math> </div> 	<p><math>E_\gamma = 0,23 \text{ mR/h; lm; lmc}</math></p> <p><math>\frac{\mu_0}{\rho} = 0,103 \text{ cm}^2/\text{g}</math></p> <p><math>x_{1/2} = 6,6 \text{ cm}; x'_{1/2} = 9,8 \text{ cm}</math></p> <p><math>\frac{\mu_a}{\rho} = 0,033 \text{ cm}^2/\text{g}</math></p>	<p>Proceso de Producción:</p> <p style="text-align: center;"><math>^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au};</math></p> <p style="text-align: center;"><math>\sigma = 98 \text{ barns}</math></p> <p>Actividad producida con:</p> <p style="text-align: center;"><math>(10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{seg})</math></p> <p>en:</p> <p style="text-align: center;">1 semana: 6,2mc/g Au</p>
--	---	--

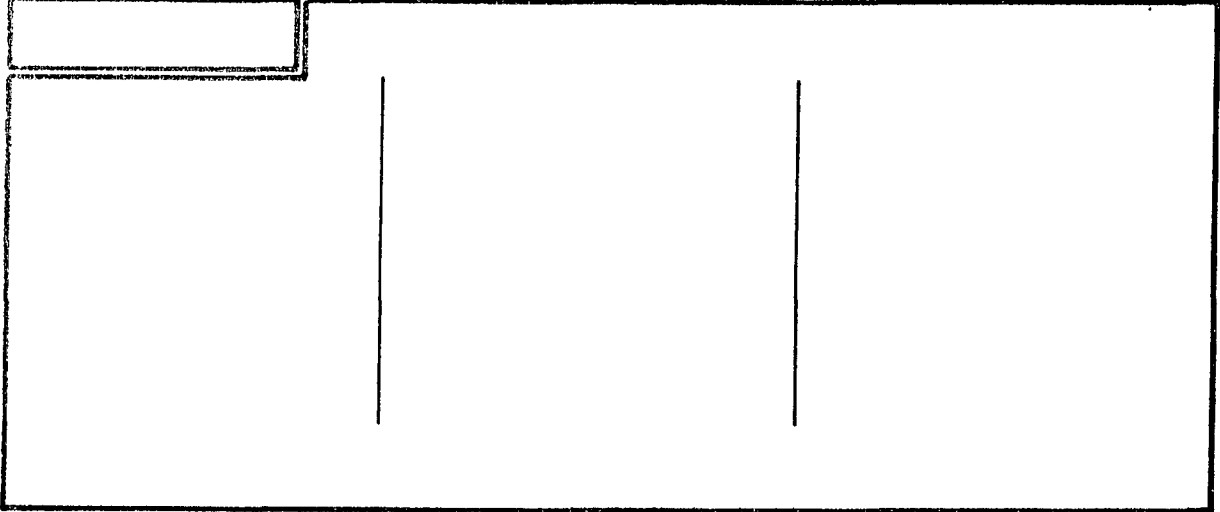


Figura 4

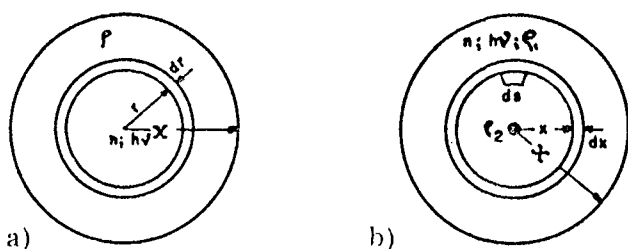


Fig. 5 - a)Fuente puntual, medio homogéneo e isotrópico  
 b)Fuente homogéneamente distribuida en medio homogéneo e isotrópico

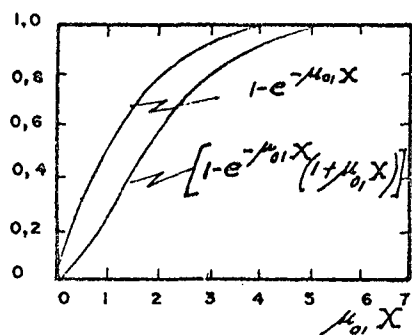


Fig. 6 - Porcentaje de radiación primaria y secundaria que llega a un punto situado en medio homogéneo e isotrópico en función de los espesores promedio ( $x'$ )

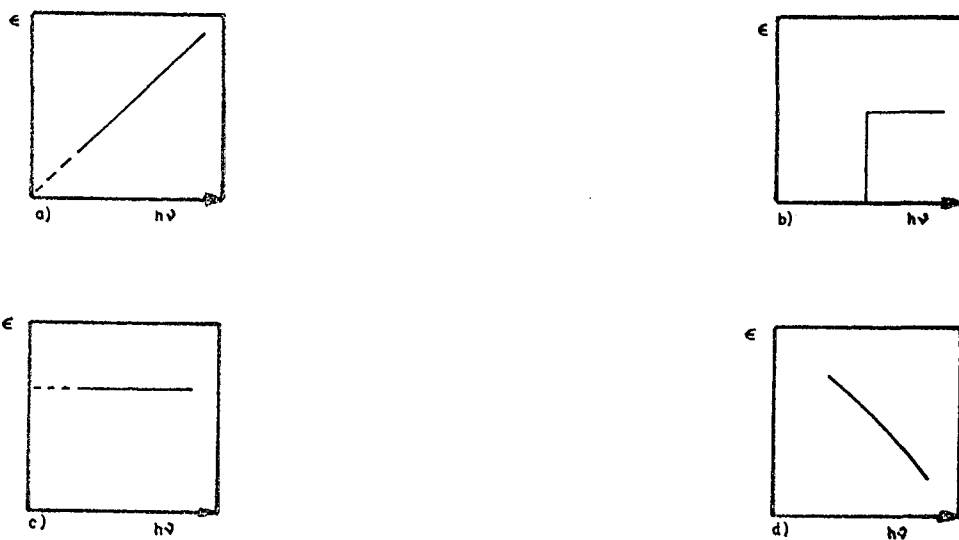


Fig. 7 - Eficiencia de detección en función de la energía de los fotones ( $h \nu$ )

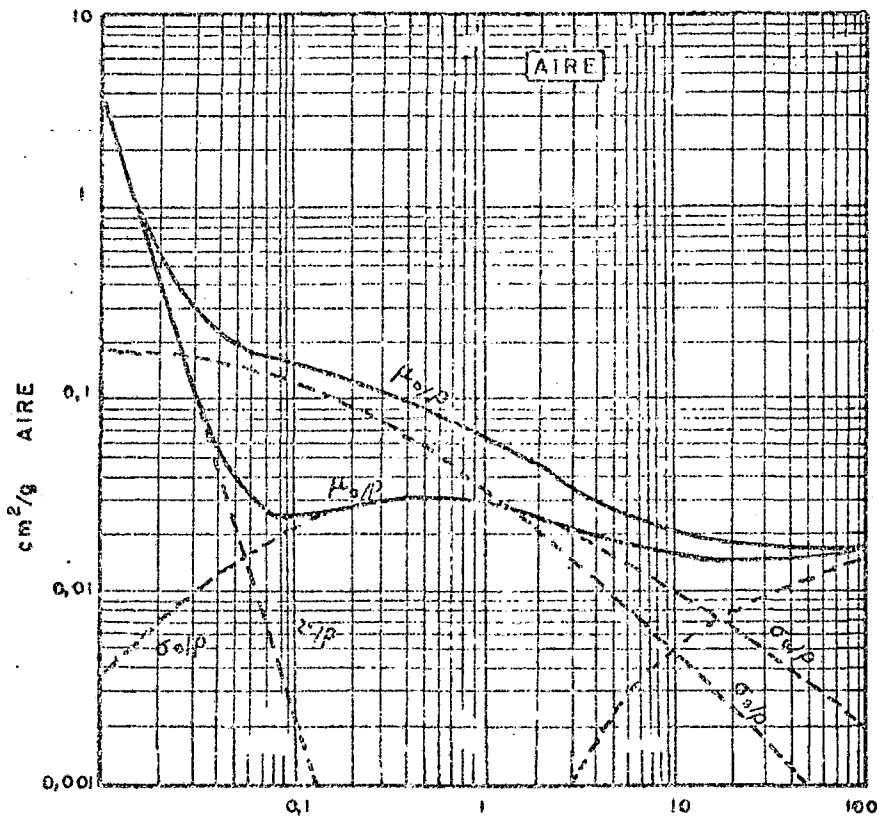
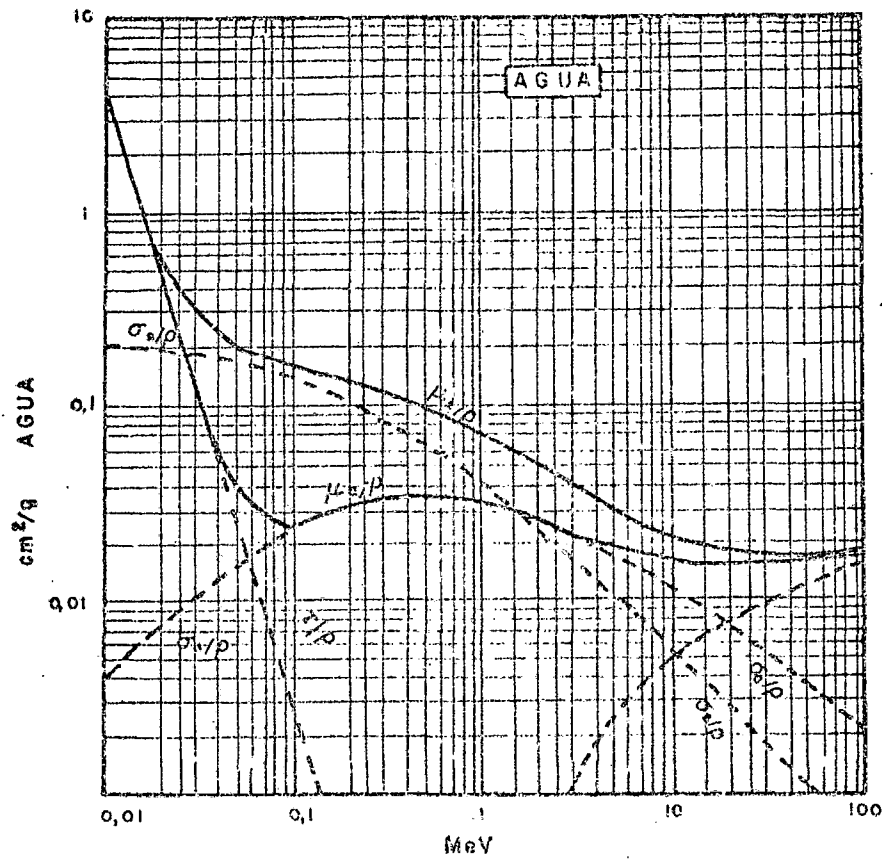


Fig. 8 - Coeficientes máxicos de atenuación y absorción en agua y aire.

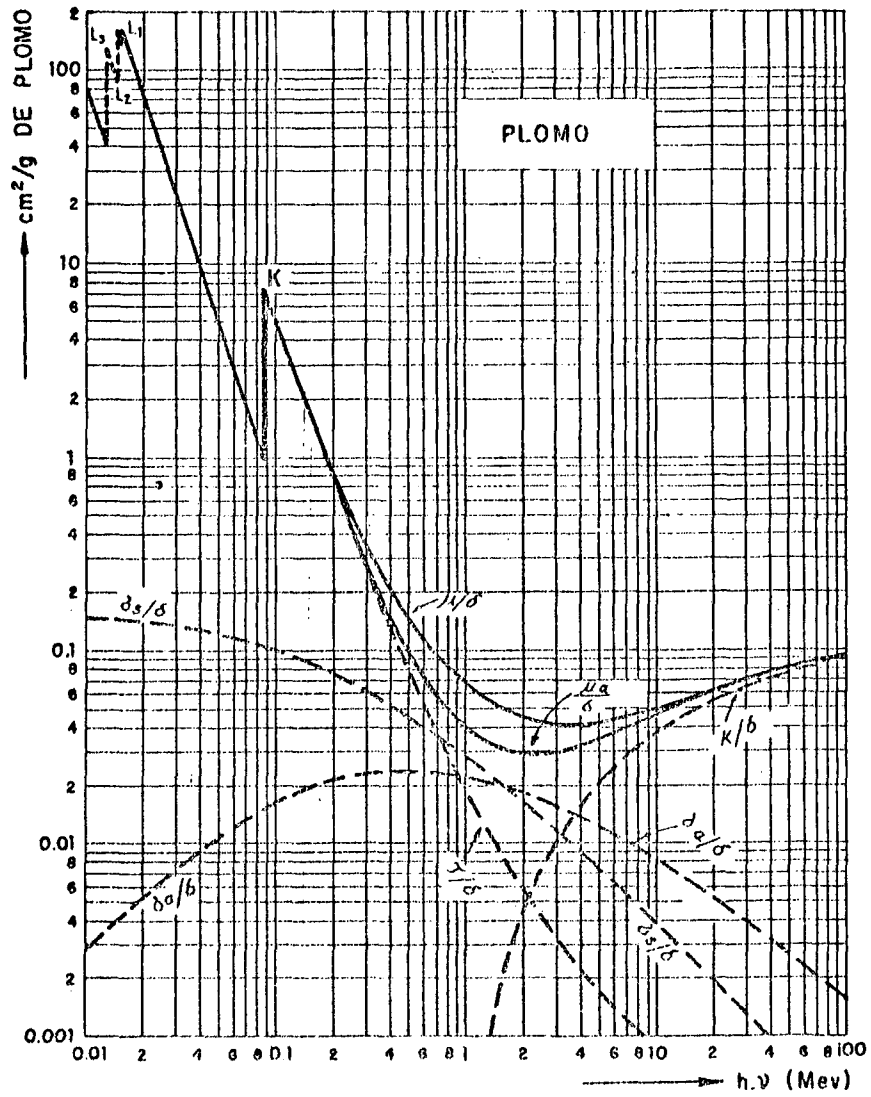


Fig. 8 - Coeficientes de atenuación másicos en plomo.

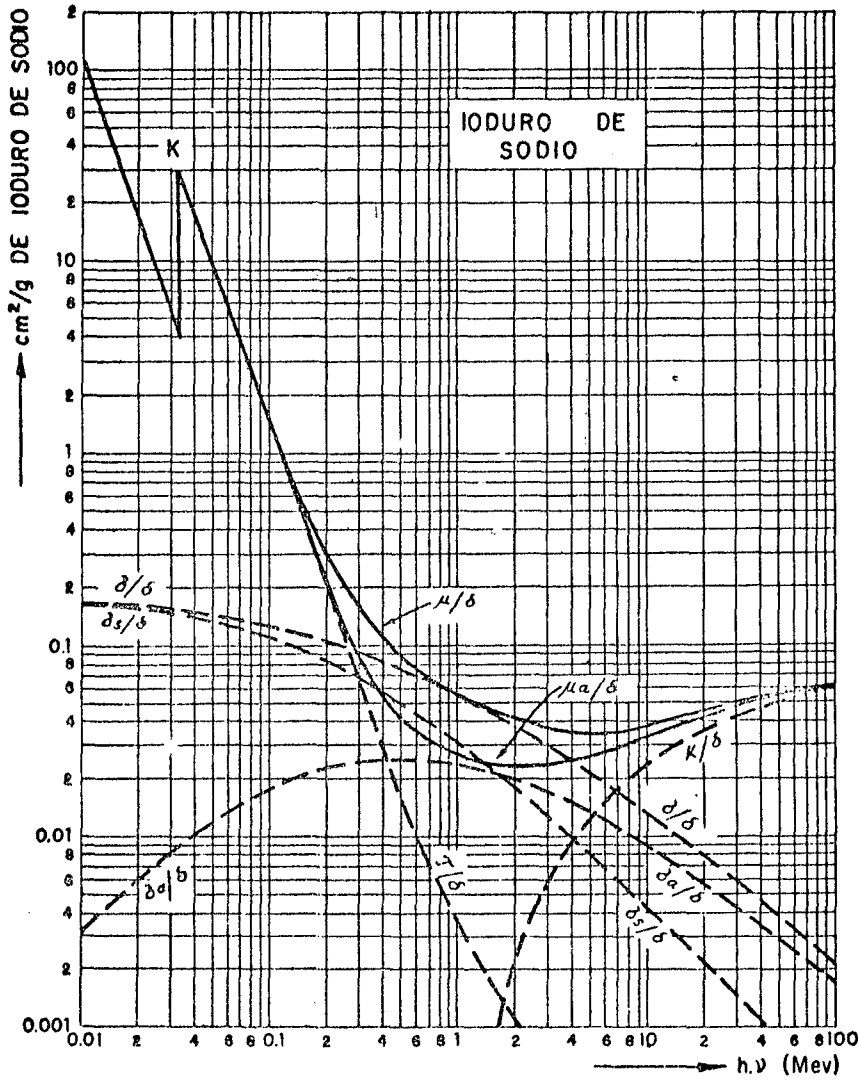


Fig. 8 - Coeficientes de atenuación másicos en ioduro de sodio.

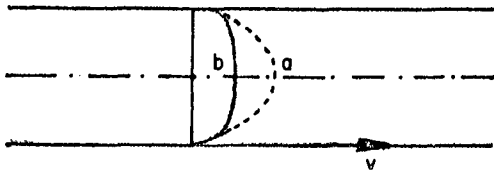


Fig. 9 - Distribución de velocidades con caudal constante.  
a) Reg. laminar; b) reg. turbulento

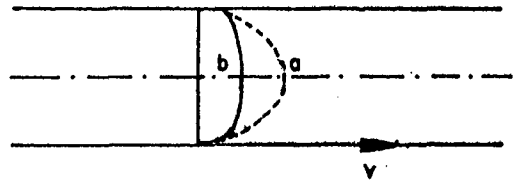


Fig. 10 - Distribución de velocidades con caudal constante  
a) con superficie lisa  
b) con superficie rugosa

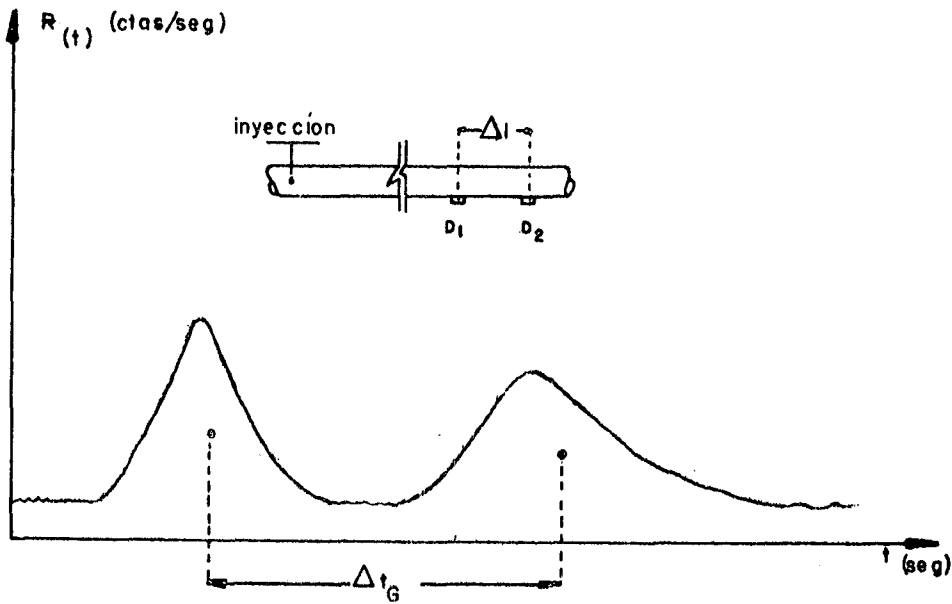


Fig. 11 - Método de los "dos picos".

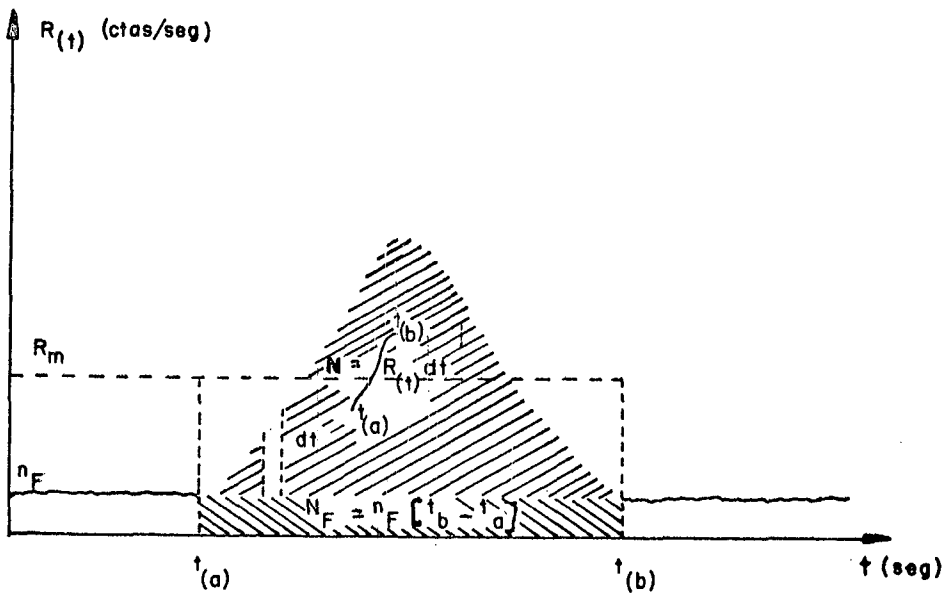


Fig. 12 - Método de las cuantas totales

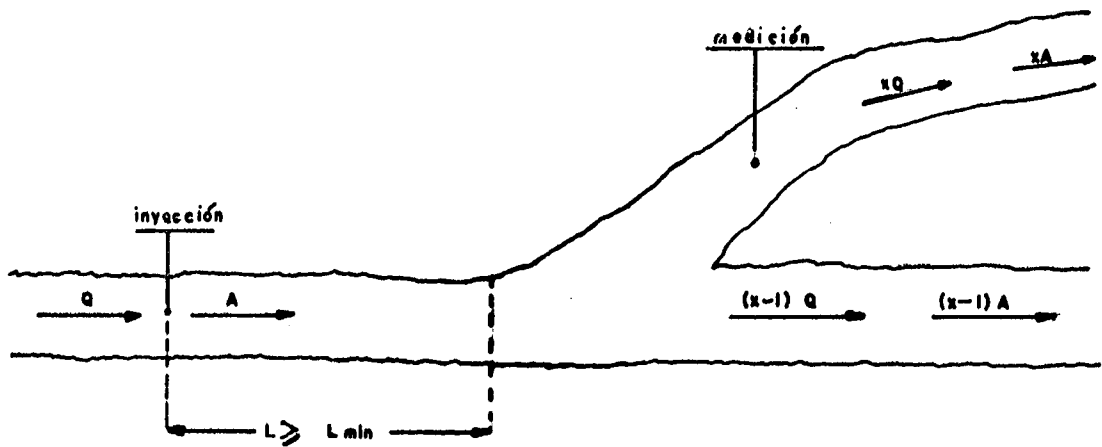


Fig 13 - Posibilidades de medición con corrientes divergentes

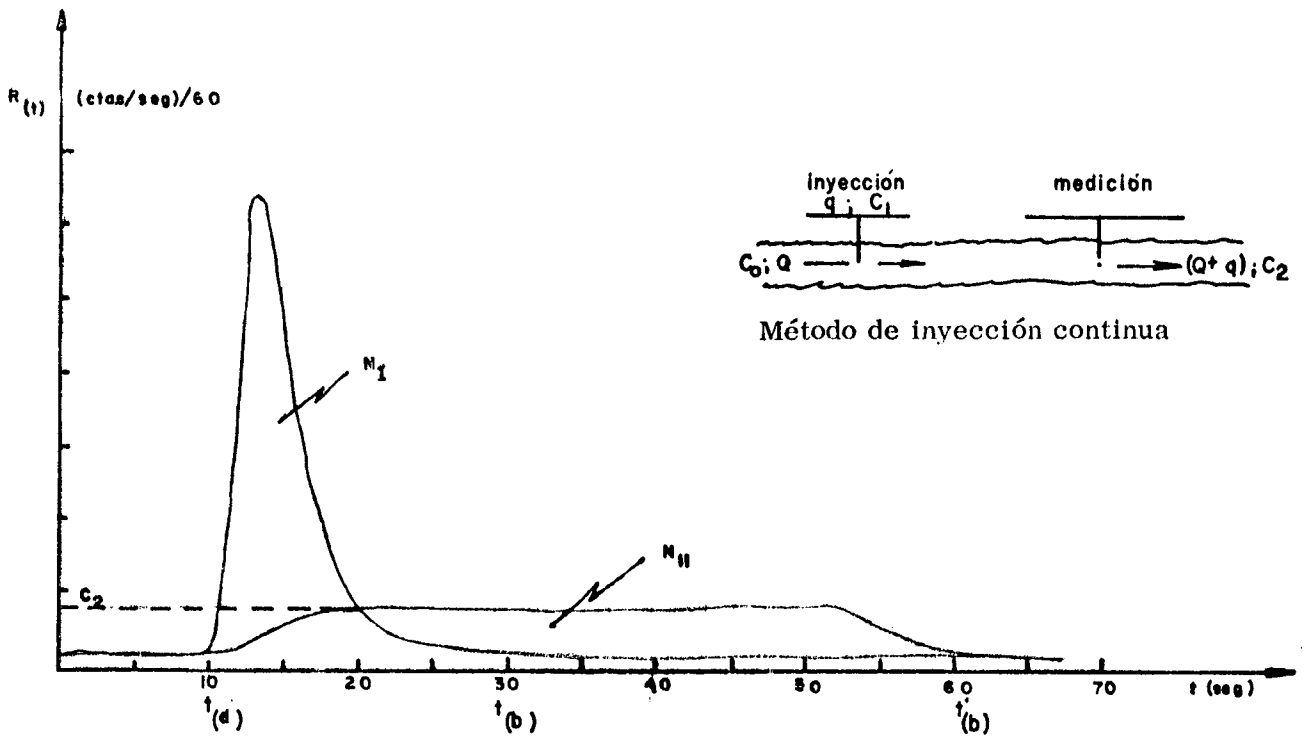


Fig.14 - Métodos de las cuentas totales y método de inyección continua. La actividad inyectada, caudal, distancia inyección-medición y la geometría de medición son las mismas en ambos casos.

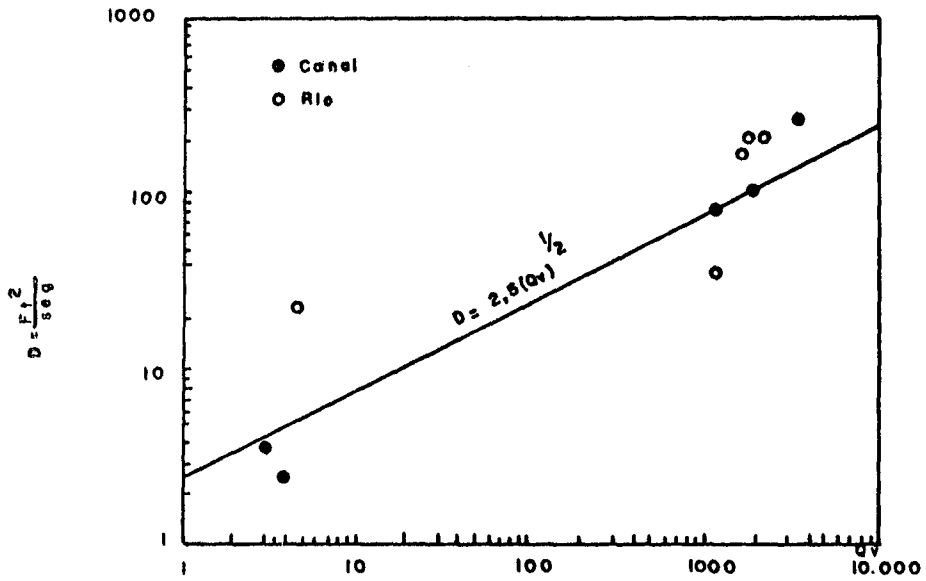


Fig.15 - Coeficiente de dispersión longitudinal en ríos y canales (II)

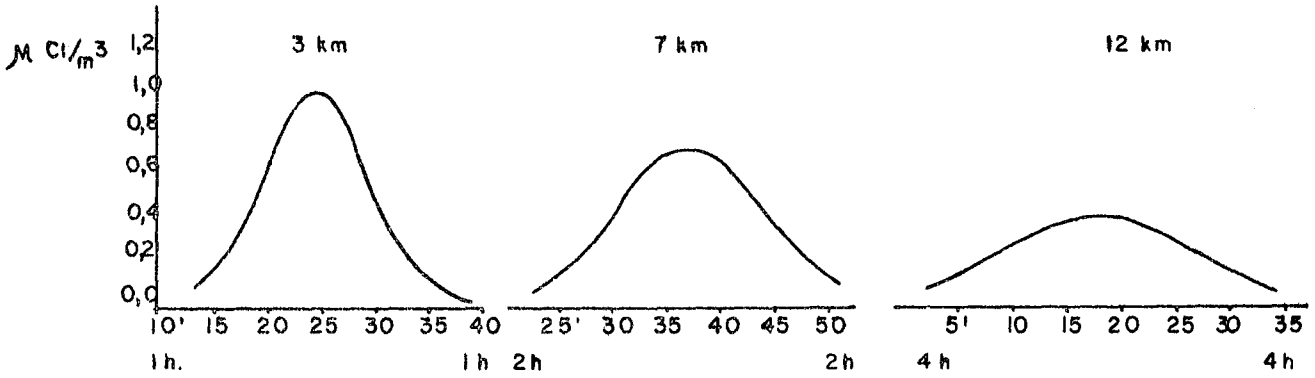


Fig. 16a Distribución, en el tiempo y el espacio del trazador radiactivo en el Río Danubio. (14).

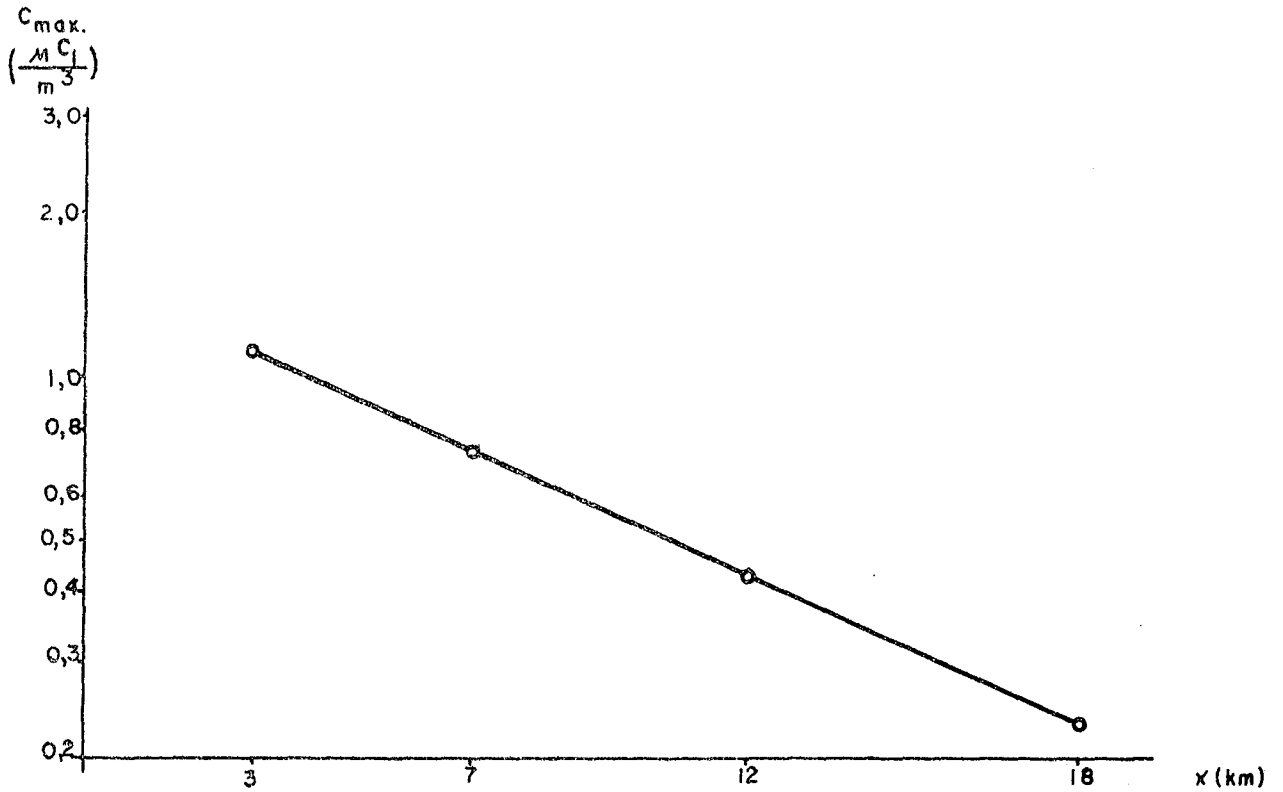


Fig. 16b - Concentración máxima en función de la distancia al punto de inyección. Río Danubio. (14).

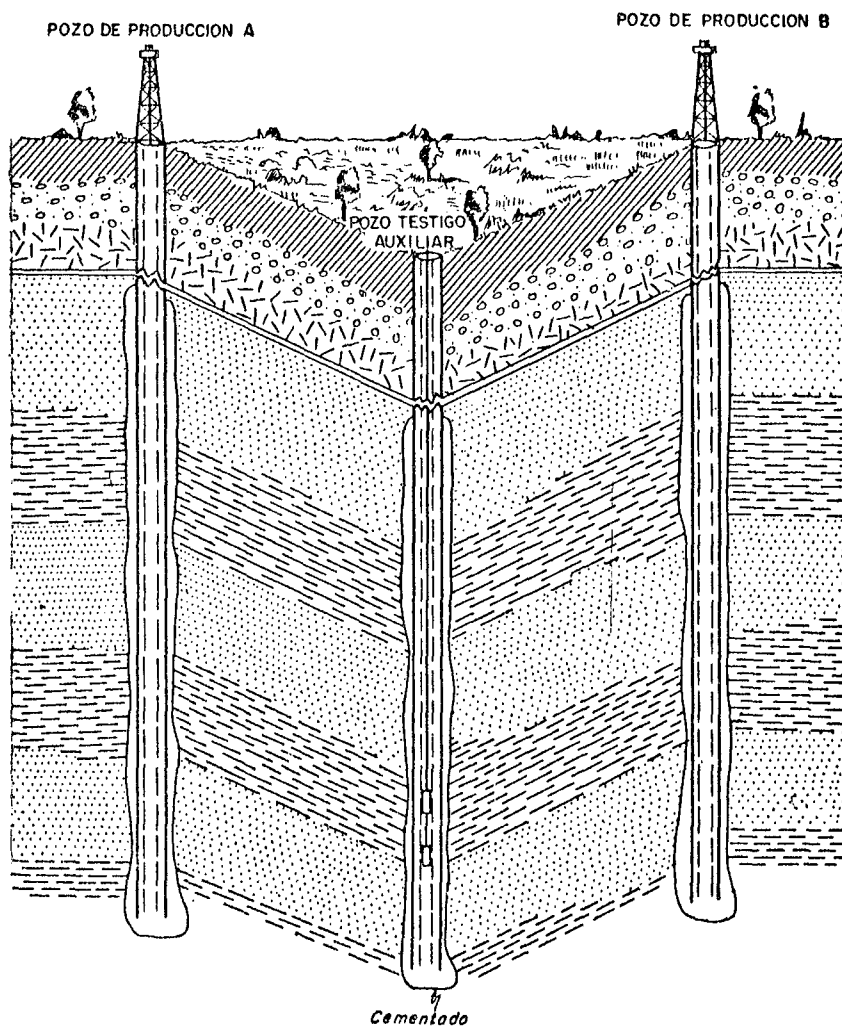


Fig.17 ESQUEMA REPRESENTATIVO DE LA DISPOSICION DE POZOS DE PRODUCCION Y AUXILIARES..

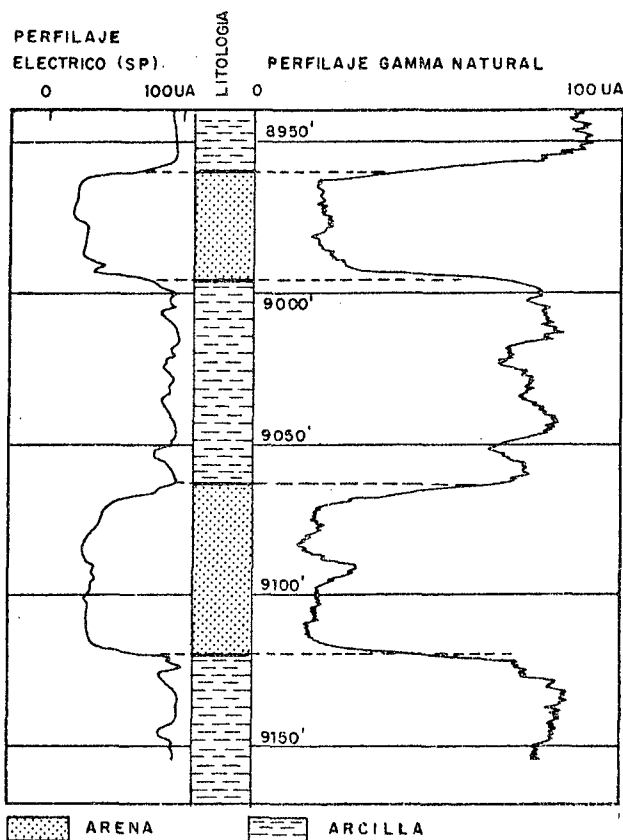


FIG.18 PERFILAJE DE POZOS. COMPARACION ENTRE UN PERF. ELECTRICO (SP) Y GAMMA NATURAL EN SERIES ARENA-ARCILLA. VELOCIDAD PERF. 220m/hora CTE. DE TIEMPO : 7 seg.

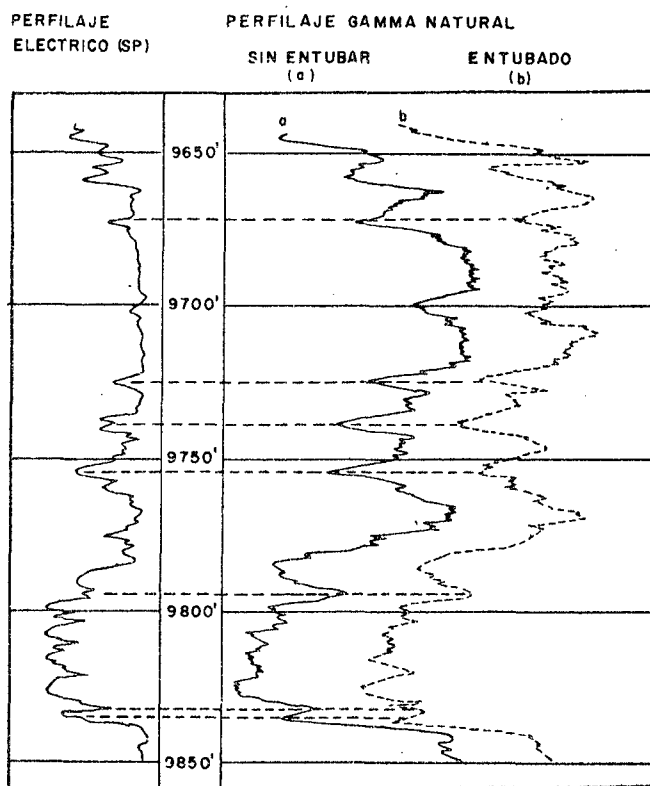


FIG.19 PERFILAJE DE POZOS. COMPARACION ENTRE UN PERF. ELECTRICO (SP) Y GAMMA NATURAL EN SERIES ARENA-ARCILLA. VELOCIDAD PERF. : 220 m/hora CTE. DE TIEMPO : 7 seg.

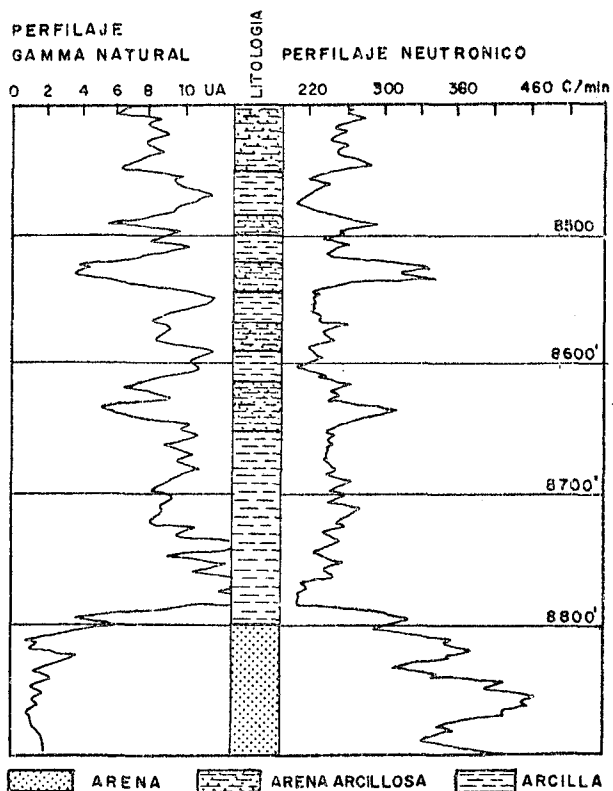


FIG.20 -PERFILAJE DE POZOS..PERFILAJE NEUTRONICO Y PERFILAJE GAMMA NATURAL...

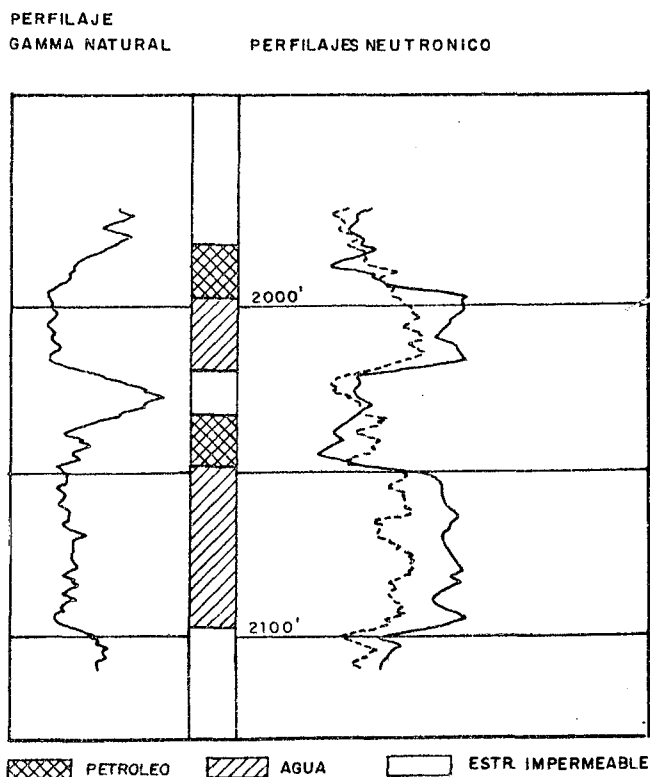


FIG.21 PERFILAJE DE POZOS.COMPARACION ENTRE PERFILAJE GAMMA NATURAL Y DOS TIPOS DE PERF. NEUTRONICOS...

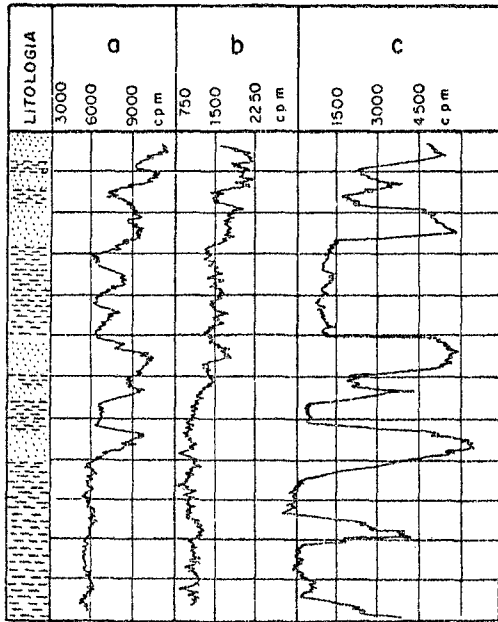


FIG. 22 - PERMEABILIDAD Y POROSIDAD..  
Perfilaje neutronico (a). Perfilaje gamma natural(b)  
Perfilaje empleando un trazador radiactivo (c)

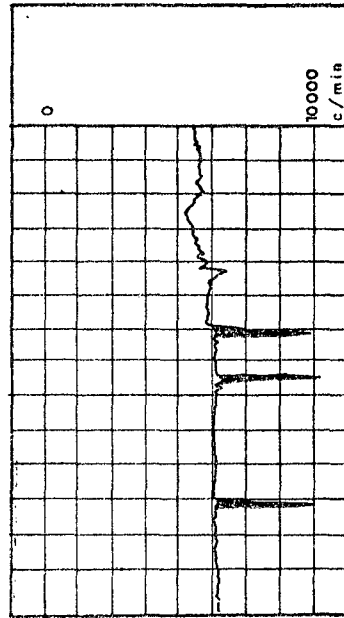


FIG. 23 - PUNZONADO DE CAMISAS O TUBERIAS  
Empleando un trazador incorporado a las cargas  
explosivos..

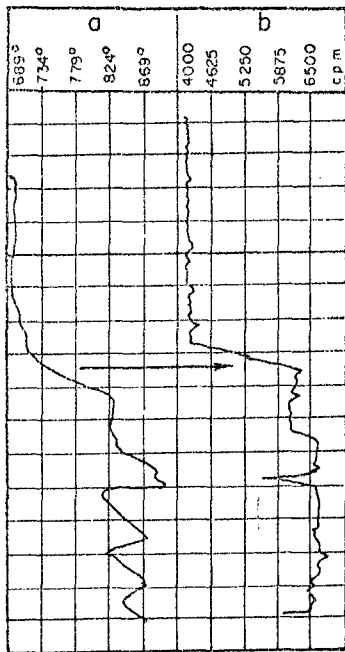


FIG. 24 - CONTROL DEL CEMENTADO  
Perfilaje térmico (a) y Perfilaje gamma (b) con  
trazador radiactivo incorporado al cemento..

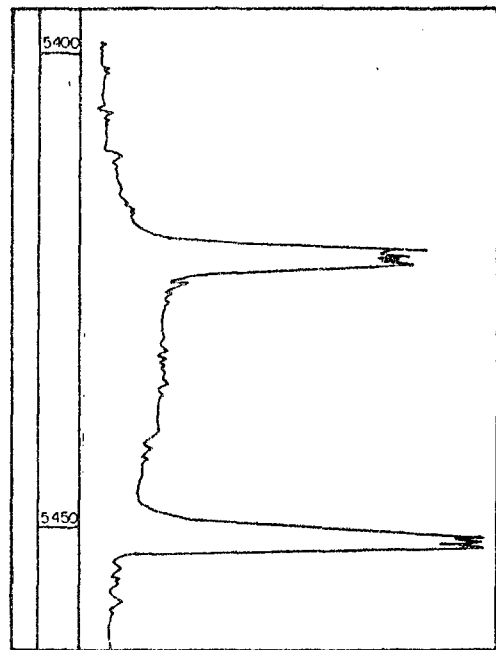


FIG. 25 - PUNZONADO DE CAMISAS Y CEMENTO  
Perforaciones realizadas marcando las cargas  
explosivas con <sup>131</sup>I

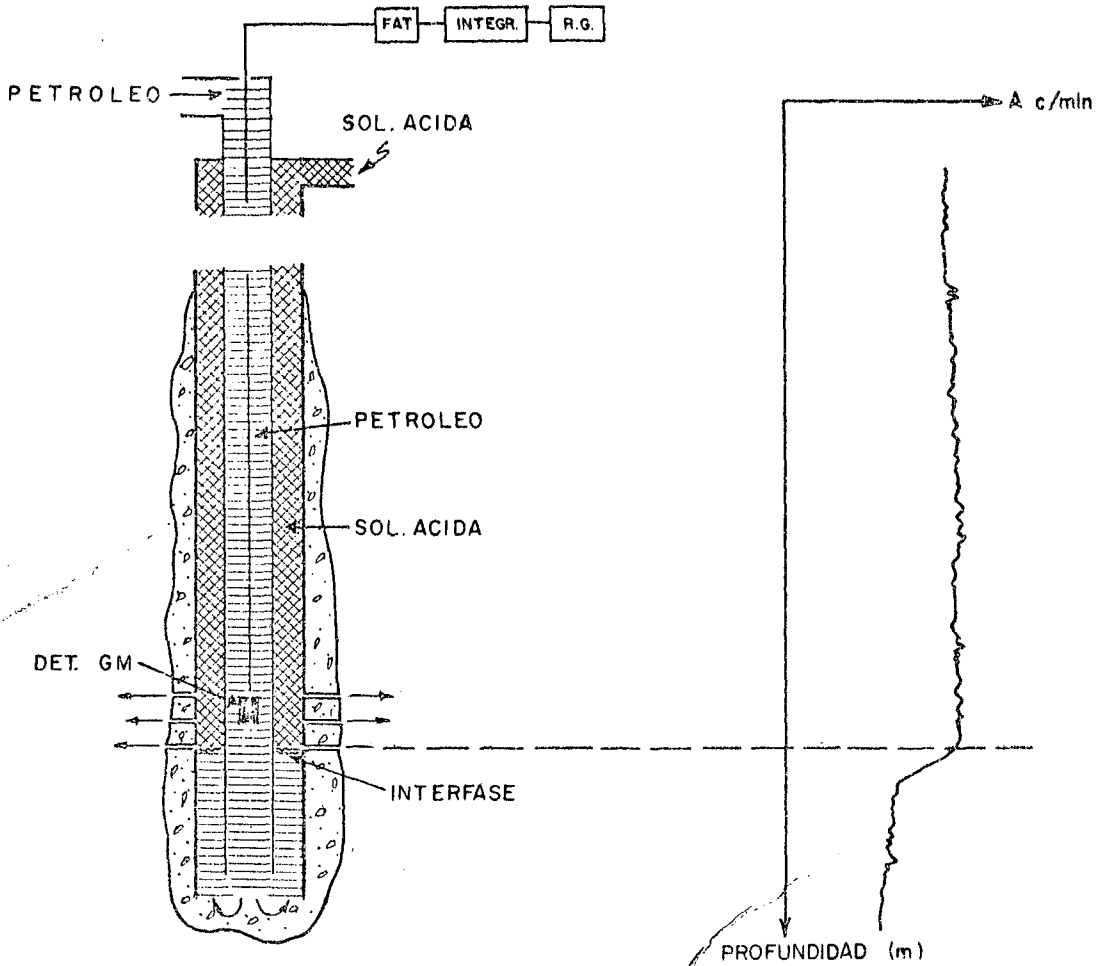


FIG: 26 - CONTROL DEL PROCESO DE ACIDIFICACION CON TRAZADORES RADIOACTIVOS

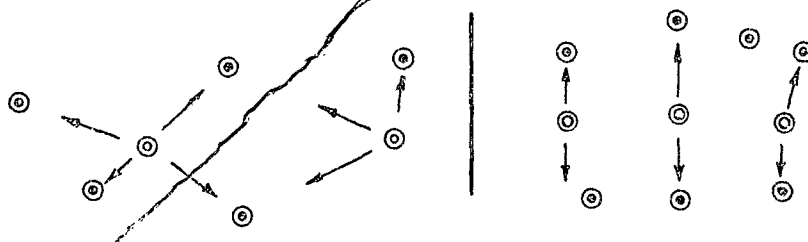


FIG: 27 - DOS POSIBLES DISTRIBUCIONES DE POZOS TESTIGOS O DE MONITOREO (⊙) CON RESPECTO A LOS POZOS DE PRODUCCION (⊙).--

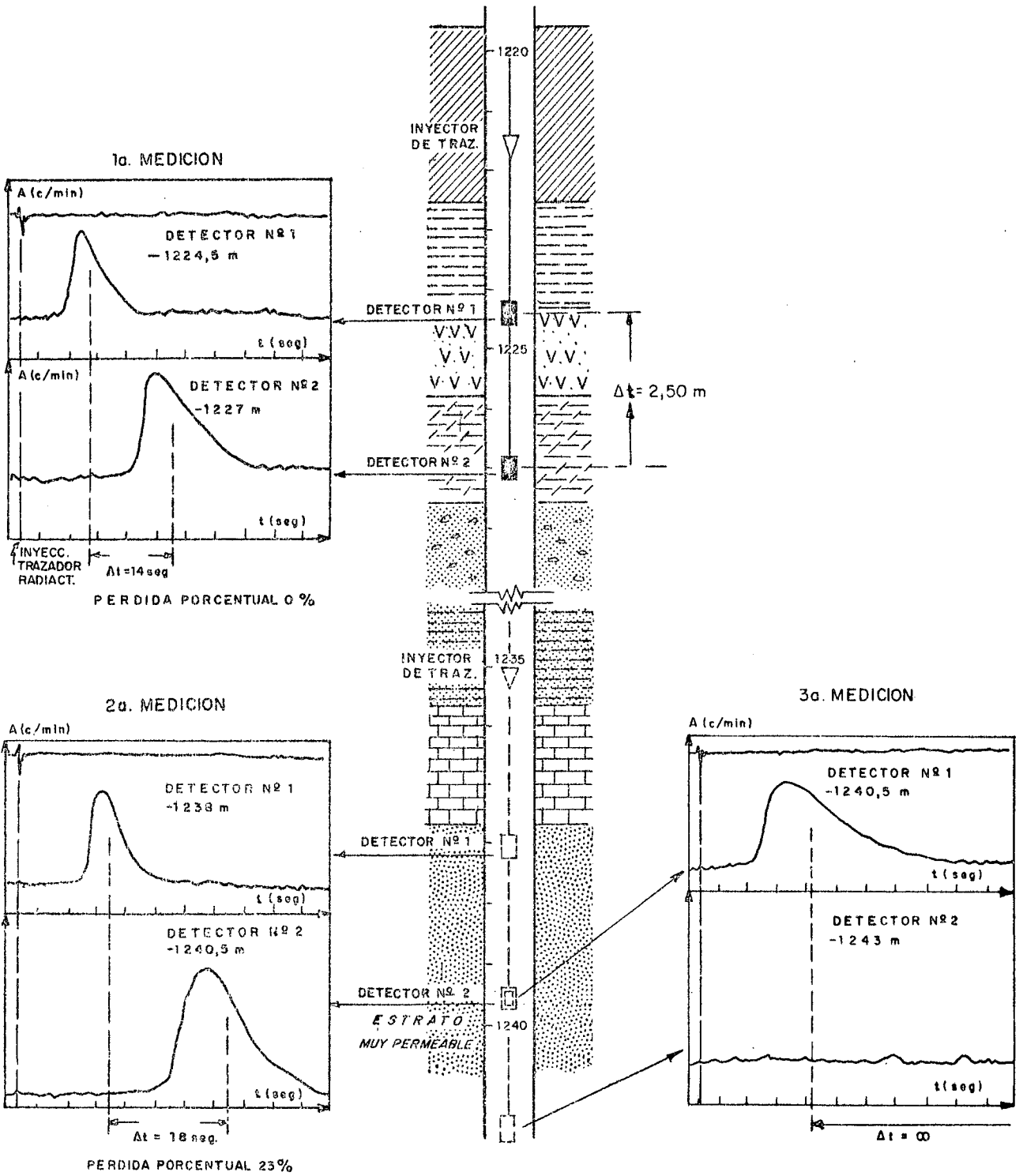


FIG- 28 -CONTROL DE LOS PROCESOS DE INUNDACION.- MEDICIONES REALIZADAS PARA LOCALIZAR FRACTURAS Y ZONAS DE ALTA PERMEABILIDAD..

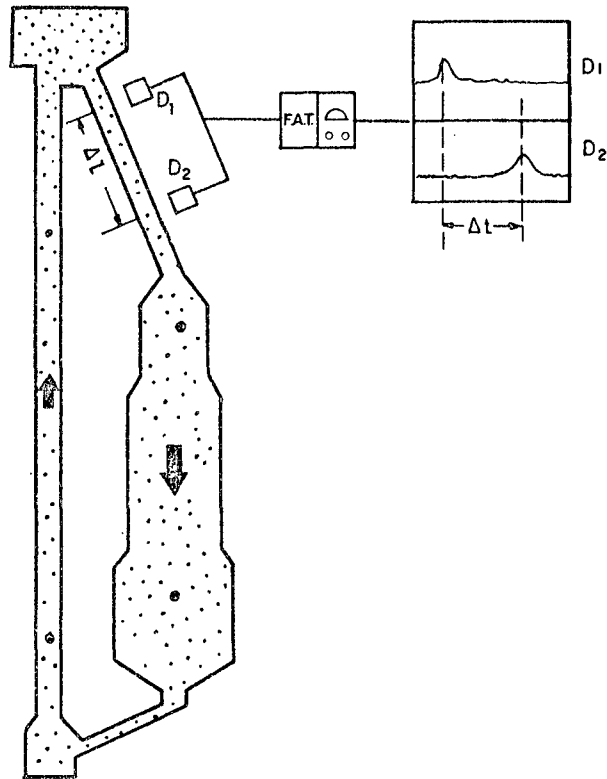


FIG-29 - CIRCULACION DE CATALIZADORES

Determinación de la velocidad de circulación de catalizadores en una instalación de craqueo térmico.

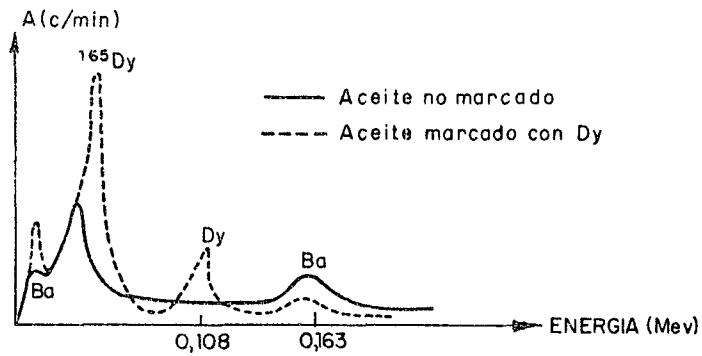


FIG-30 IDENTIFICACION DE HIDROCARBUROS

Espectro gamma de un aceite marcado con Dy y espectro gamma del mismo aceite sin marcar.

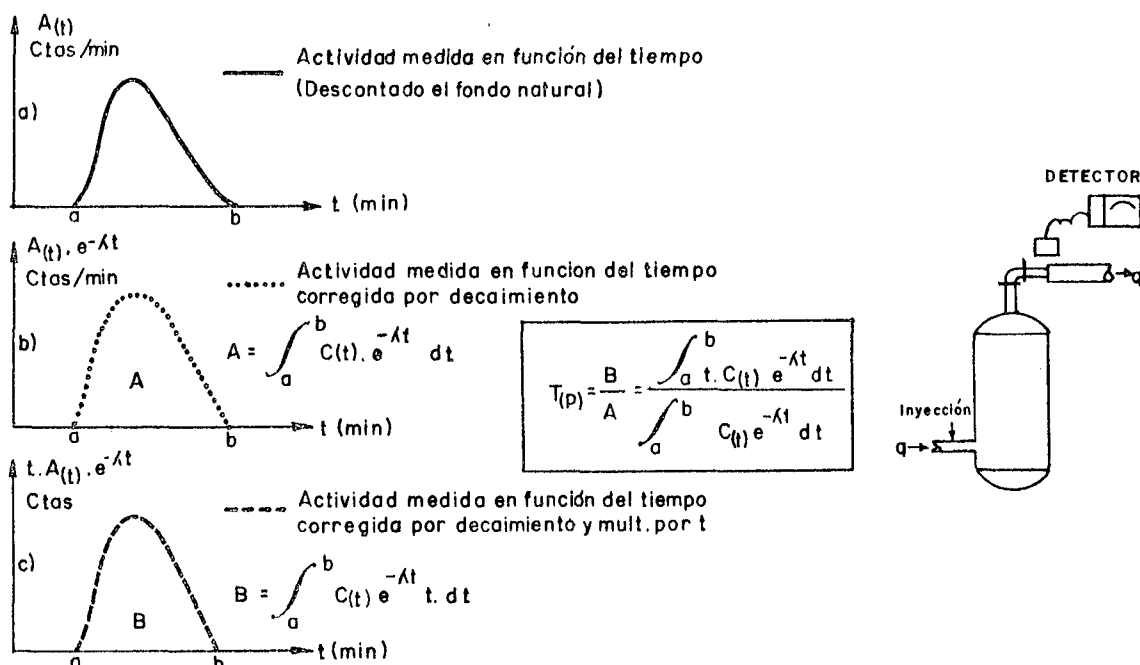


FIG: 31 - DETERMINACION DEL TIEMPO DE PERMANENCIA, PROMEDIO ( $T_p$ )

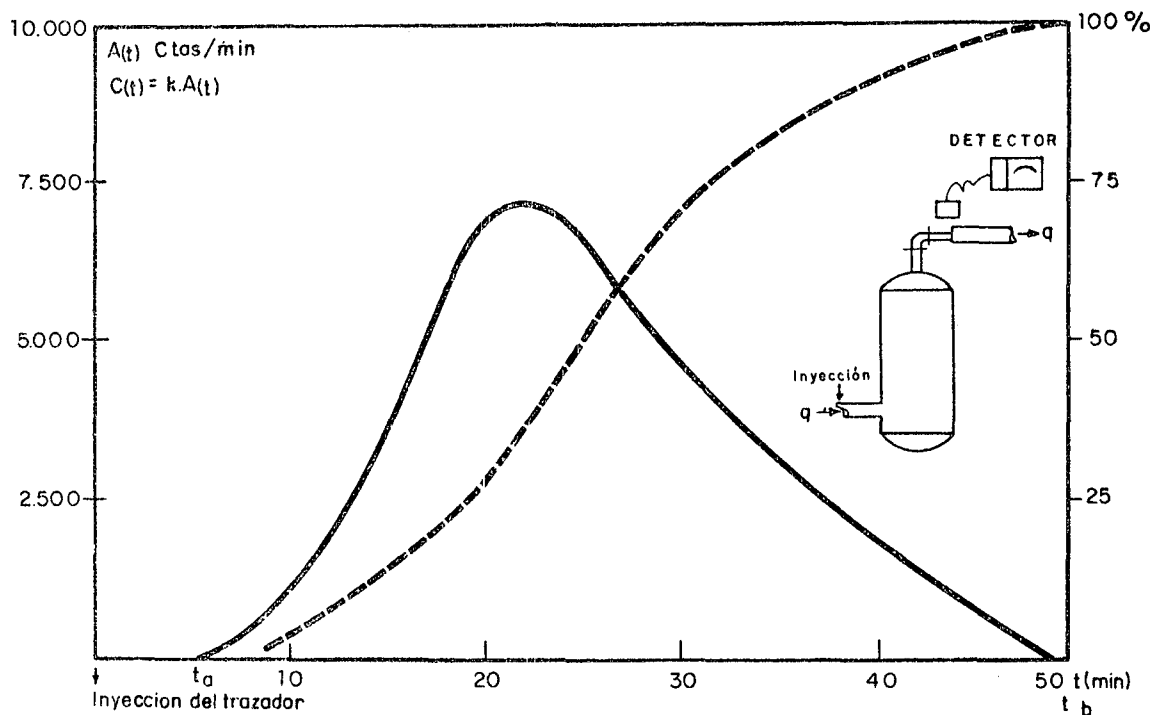


FIG: 32 - ACTIVIDAD MEDIDA EN LA SALIDA DEL PROCESO Y PORCENTAJES PROCESADOS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO..

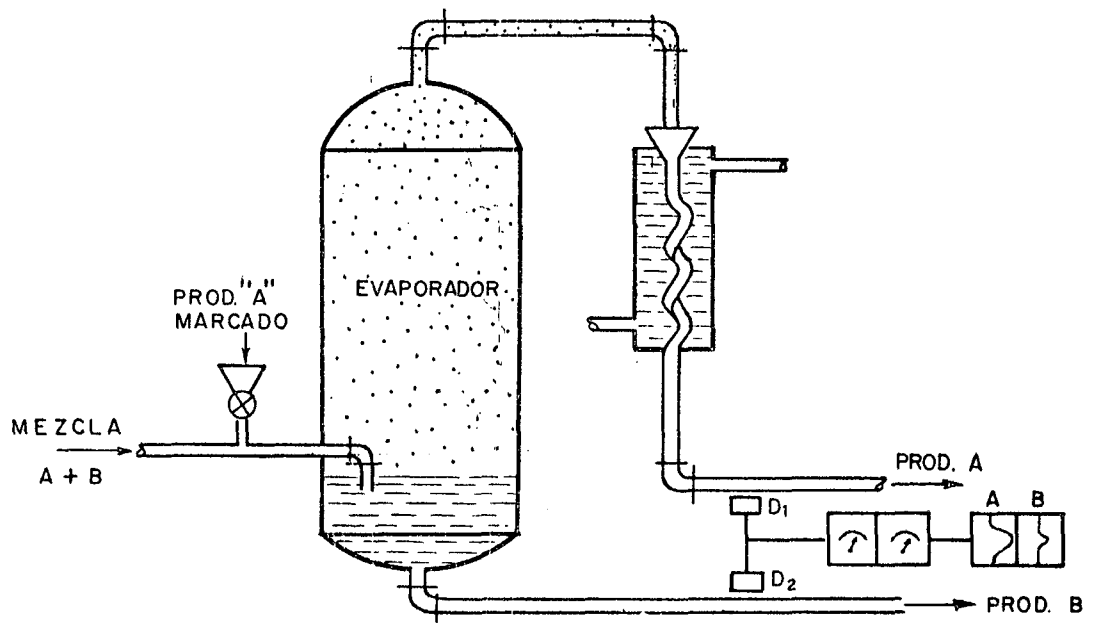


FIG. 33 -SEPARACION DE COMPONENTES DE UNA MEZCLA

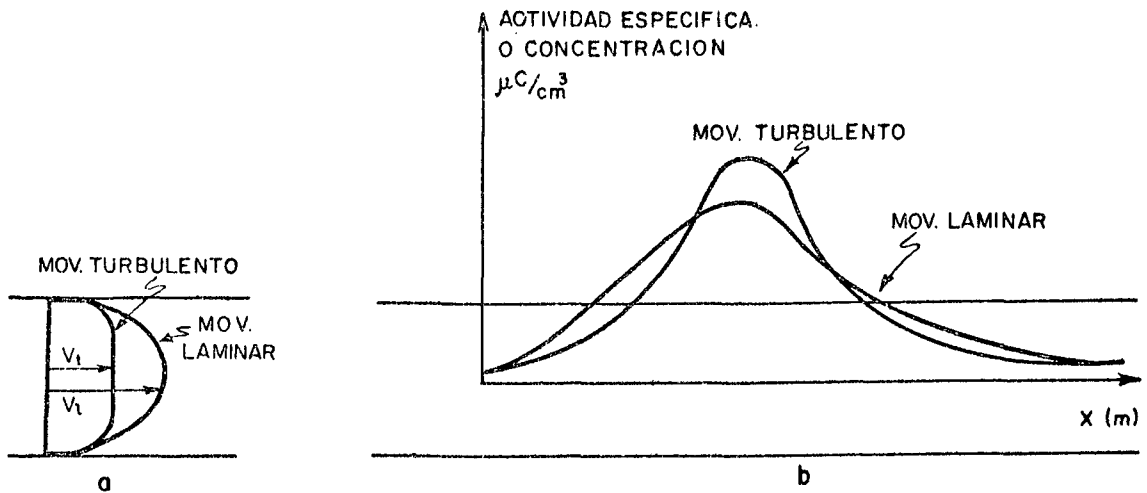


FIG: 34 -a) DIAGRAMA DE VELOCIDADES EN UNA CAÑERIA CON REGIMEN LAMINAR Y TURBULENTO.

b) CONCENTRACION DE TRAZADOR EN UNA SECCION CUALQUIERA, AGUAS ABAJO DEL PUNTO DE INYECCION. INYECCION DISCRETA ("INSTANTANEA.")

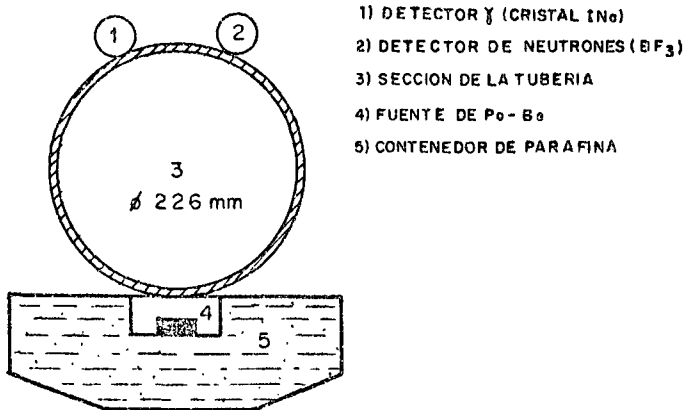


FIG 35 -- ESQUEMA DE LA INSTALACION NECESARIA PARA MEDIR INTERFASES EN POLIDUCTOS CON TRAZ. ACTIVABLES..

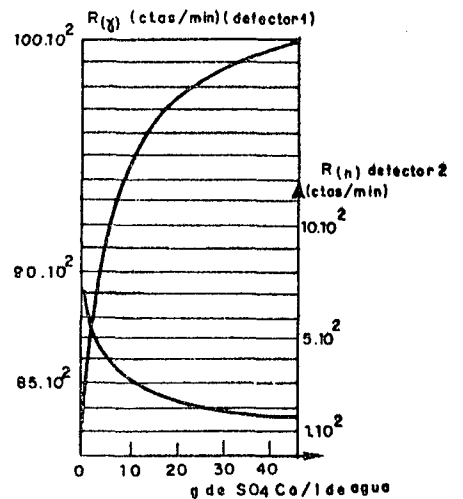


FIG: 36 - ACTIVIDAD MEDIDA EN FUNCION DE LA CONCENTRACION DE CADMIO CAÑERIA DE 226 mm

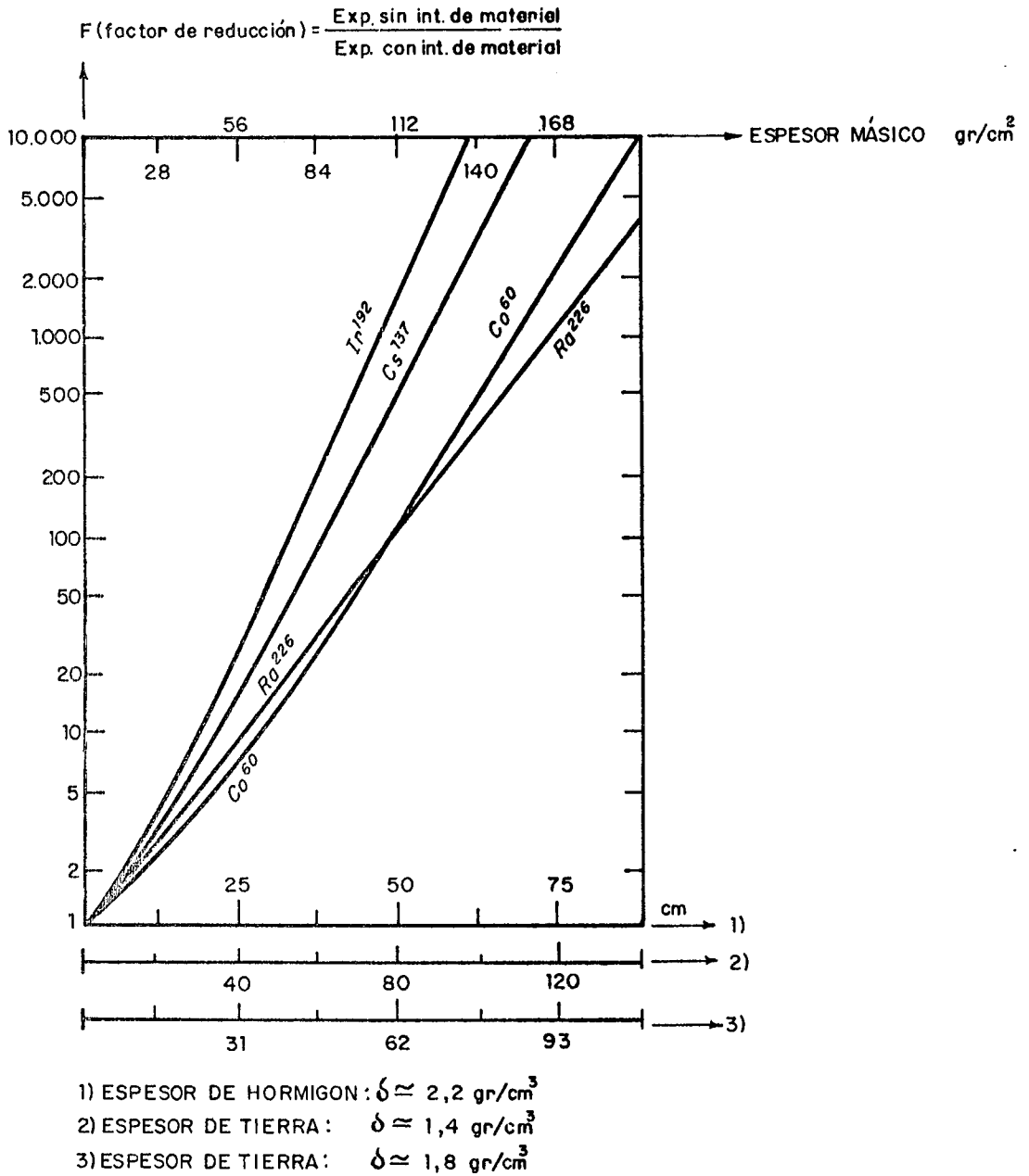


Fig- 37 -FACTOR DE REDUCCION EN FUNCION DE ESPESOR MÁSSICO Y ESPEORES DE HORMIGÓN Y TIERRA DE DISTINTA COMPACTACIÓN.

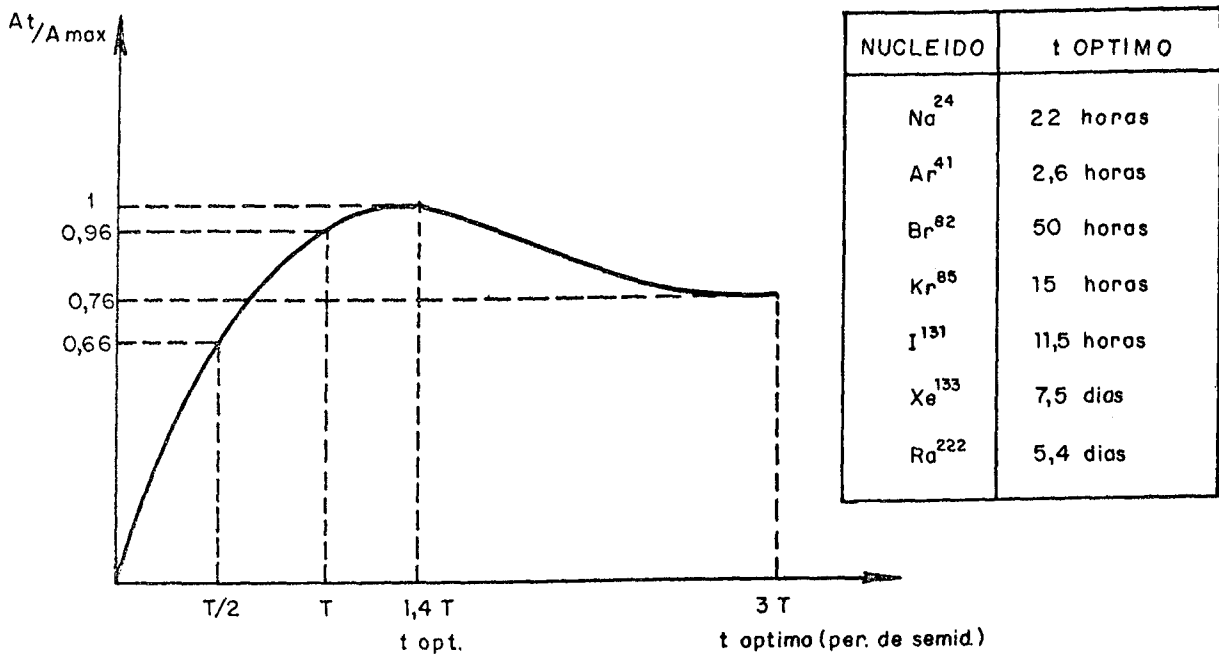


Fig- 38 - TIEMPO OPTIMO DE INYECCION

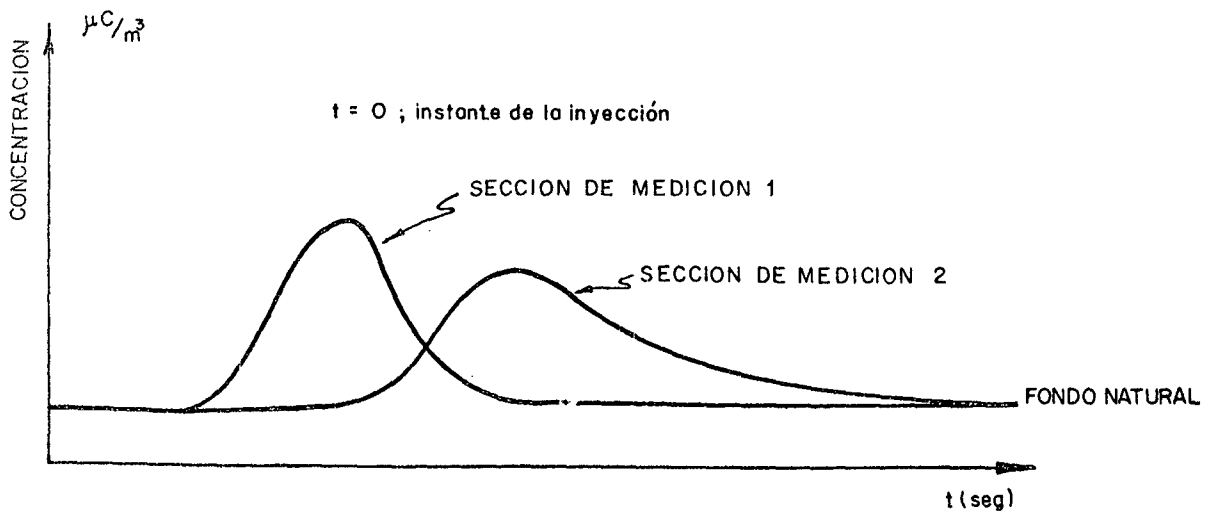


Fig: 39 - VARIACION DE LA CONCENTRACION EN FUNCION DEL TIEMPO Y DE LA DISTANCIA AL PUNTO DE INYECCION. LA SECCION 2 ESTA MAS ALEJADA DEL PUNTO DE INYECCION QUE LA SECCION 1. INYECCION "INSTANTANEA".

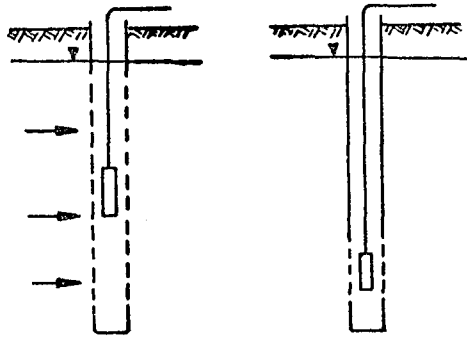


Fig. 40 - Disposición de la sonda en la perforación.

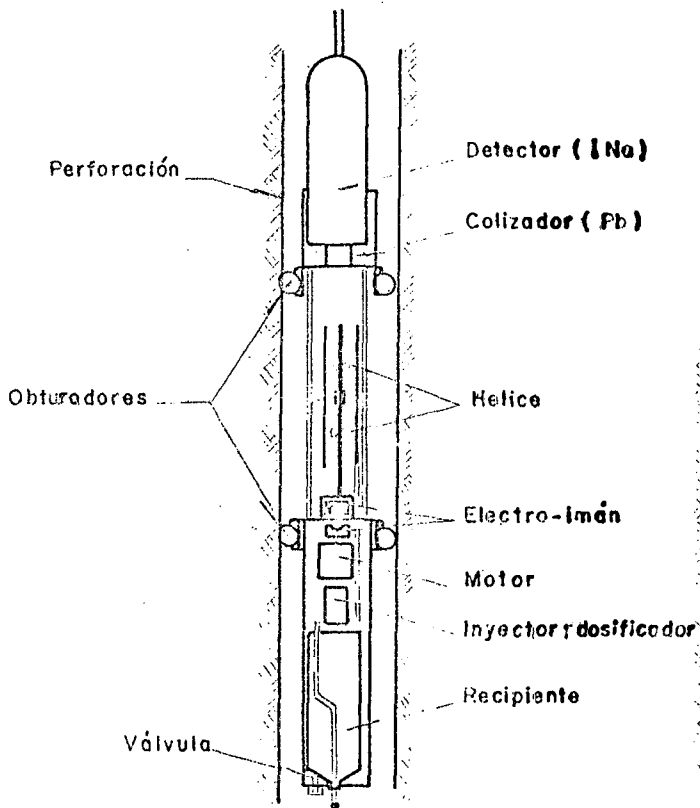


Fig. 41 - Sonda CEA para medir componente horizontal de velocidad de aguas subterráneas (60)

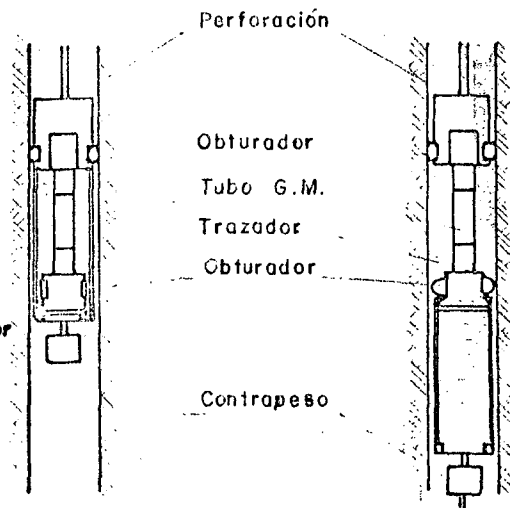


Fig. 42 - Sonda para medir componente horizontal de velocidad de aguas subterráneas.

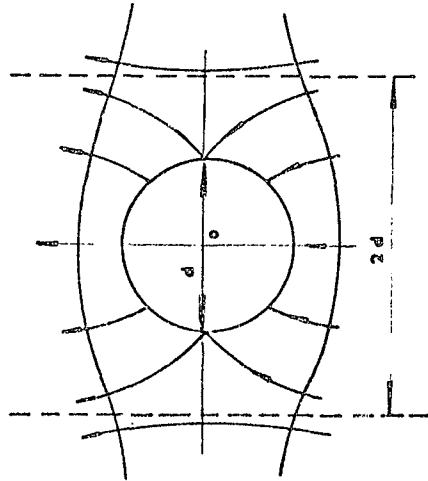


Fig. 43 - Distorsión producida por la perforación; d: es el diámetro de la perforación.

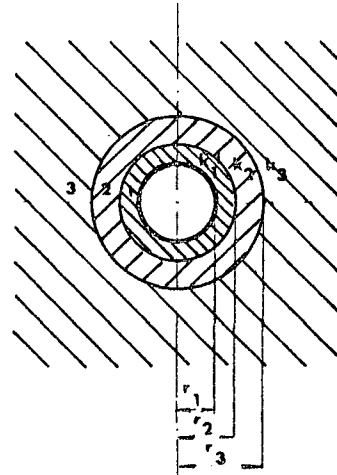


Fig. 44 - Radios y permeabilidad de filtro y empaquetadura. Ref. a fig.45.

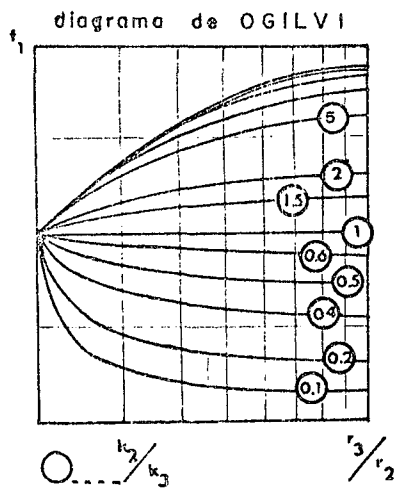


Fig. 45 - Factor de corrección por permeabilidad y radio de filtro y empaquetadura.

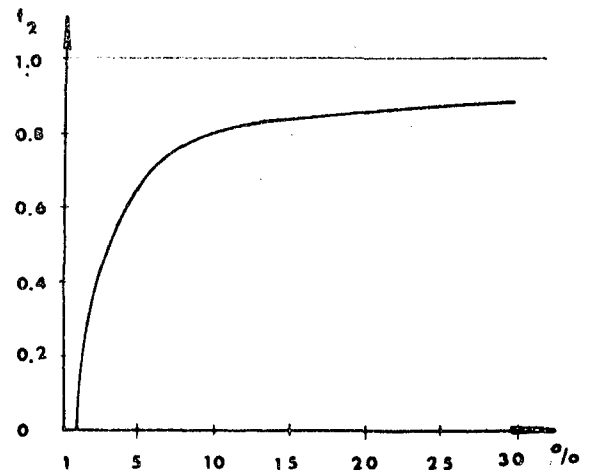


Fig. 46 - Factor de corrección debido al porcentaje de orificio de cañería.

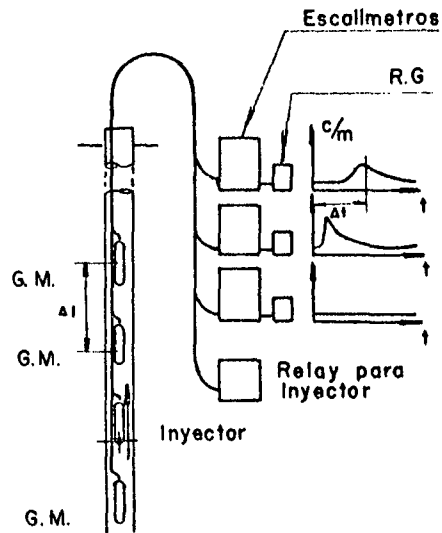


Fig. 47 - Esquema representativo de un equipo para medir la componente vertical de velocidad en una perforación.

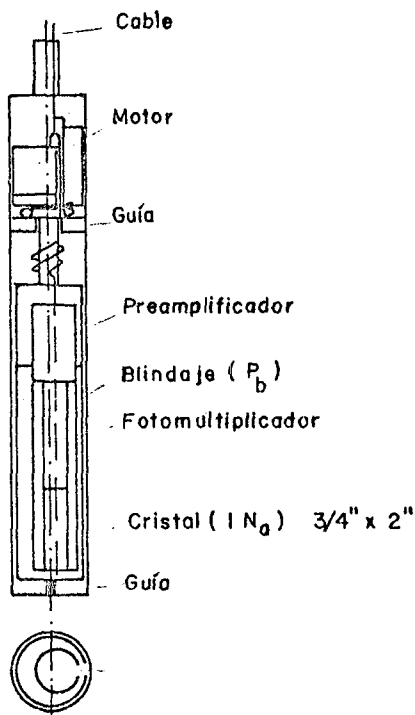


Fig. 48 - Esquema representativo de una sonda apta para medir la dirección del agua subterránea (32)(58)

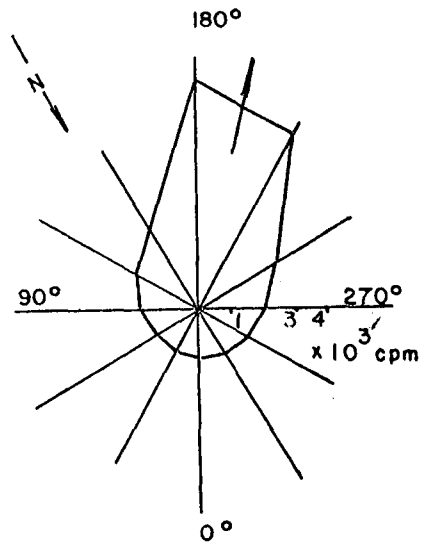


Fig. 49 - Registro obtenido con el equipo de la fig. 48 (32)(58)

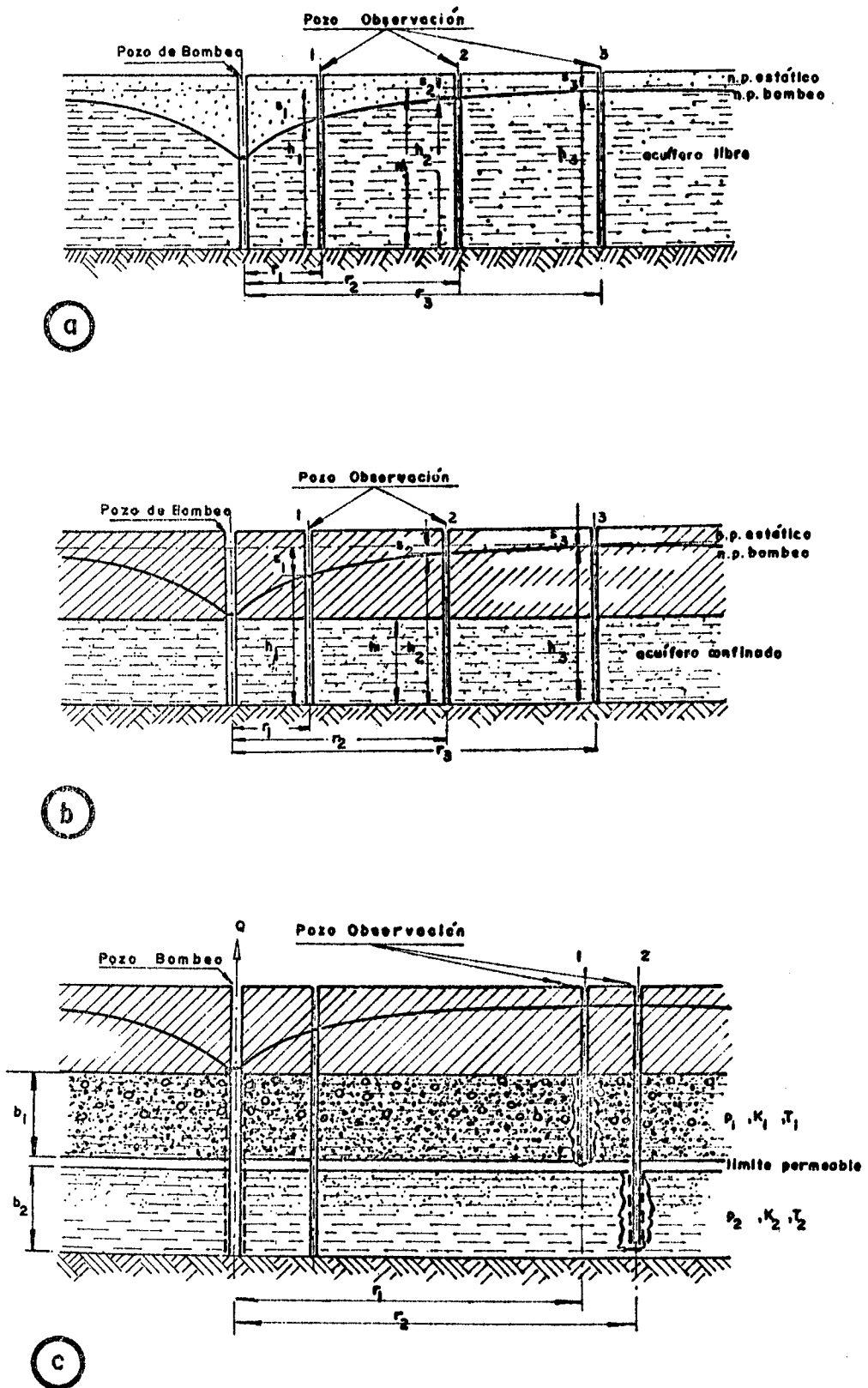


Fig 50 a)Acuifero libre;b)acuifero confinado; c)acuiferos con permeabilidades muy distintas

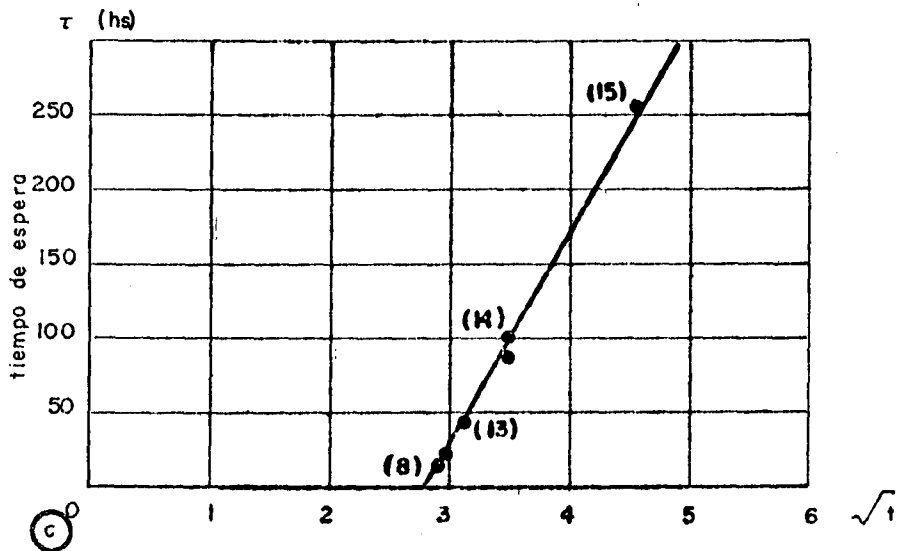
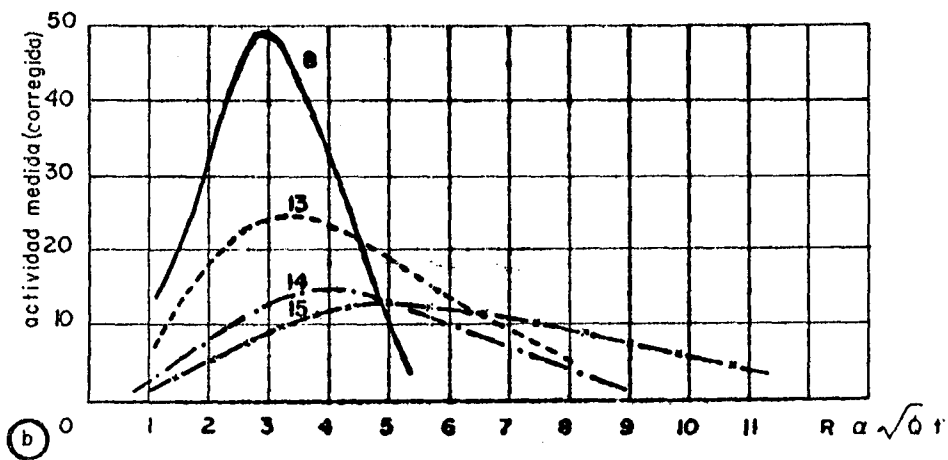
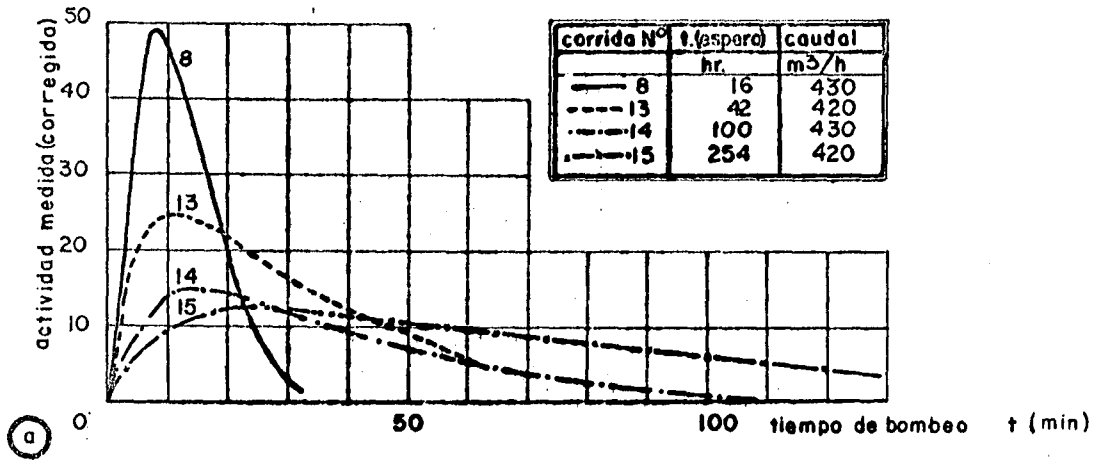


Fig. 51 a) Actividad medida en función del tiempo de bombeo  
 b) " " " " " " " " " " y caudal Q  
 c) Relación tiempo de la experiencia (t) al tiempo de espera.  
 Ver bibliografía (32)

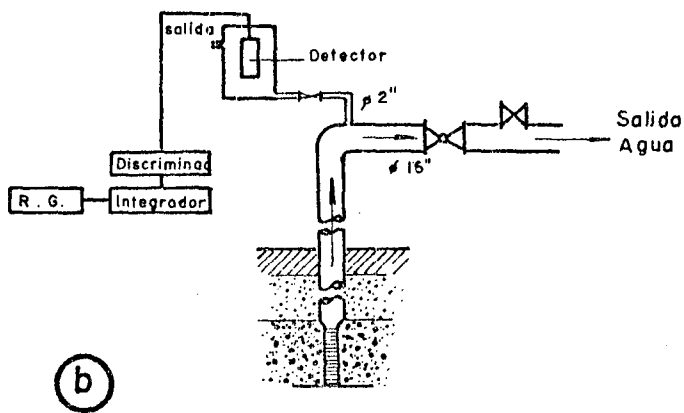
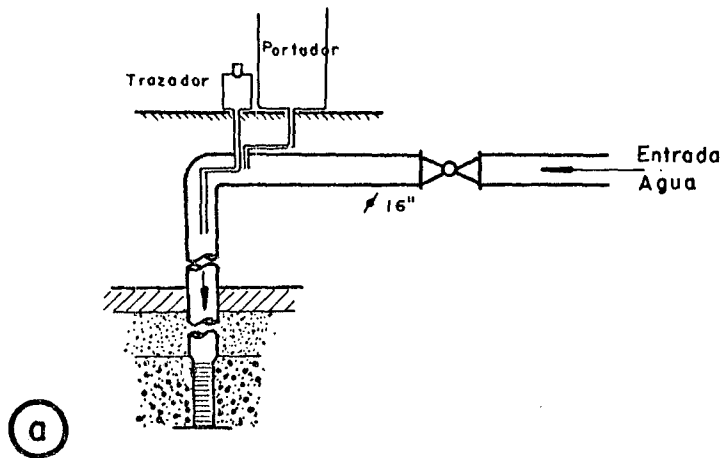
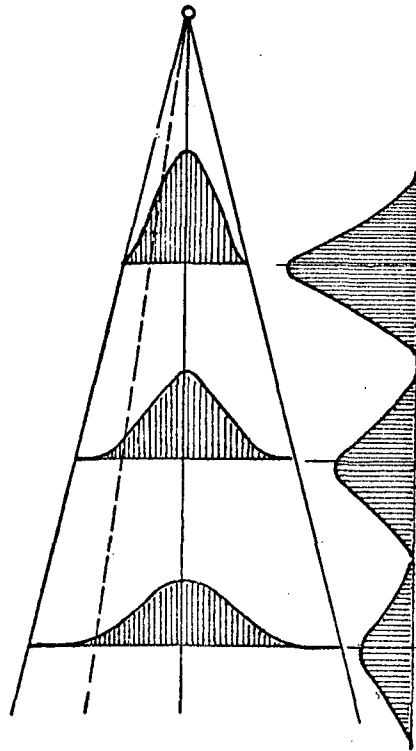
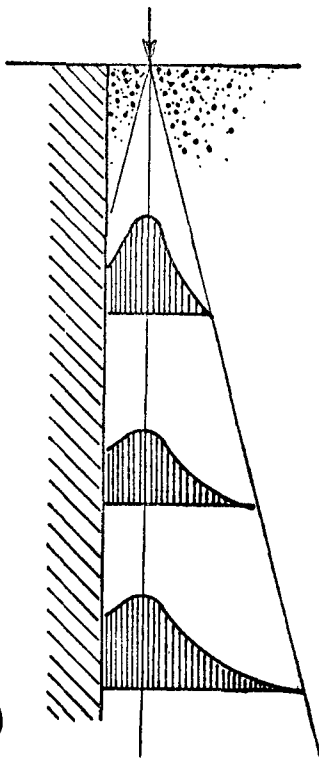


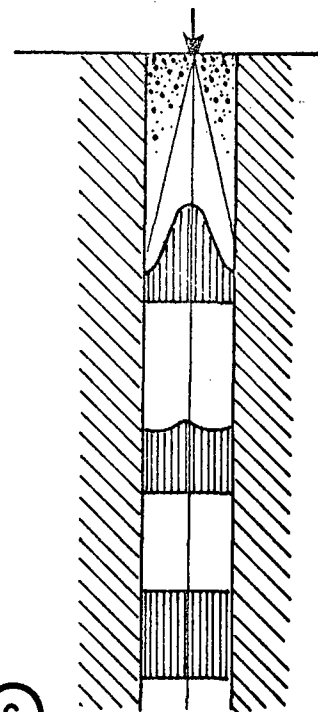
Fig:52 a)Esquema perforación y dispositivo de inyección del trazador  
b)Esquema de la perforación de bombeo con dispositivos de med.  
de radiación e instrumental asociado.Ver bibliografía (32)



(a)



(b)



(c)

Fig.53 -Dispersión longitudinal del trazador en acuíferos con y sin pantallas laterales. Bibliografía (62),y (1)

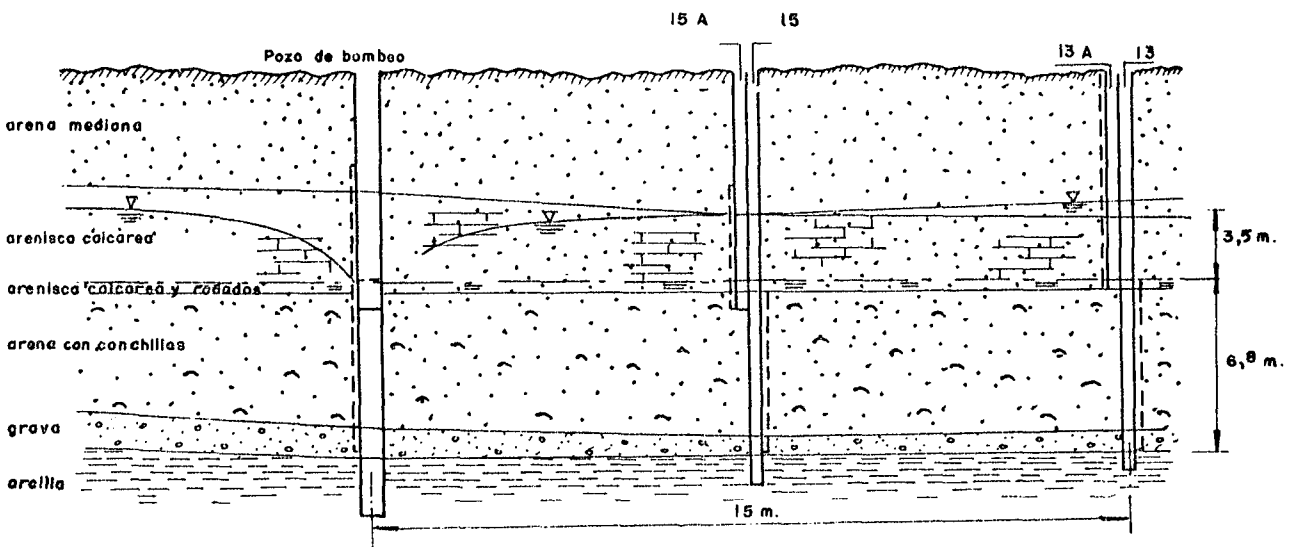
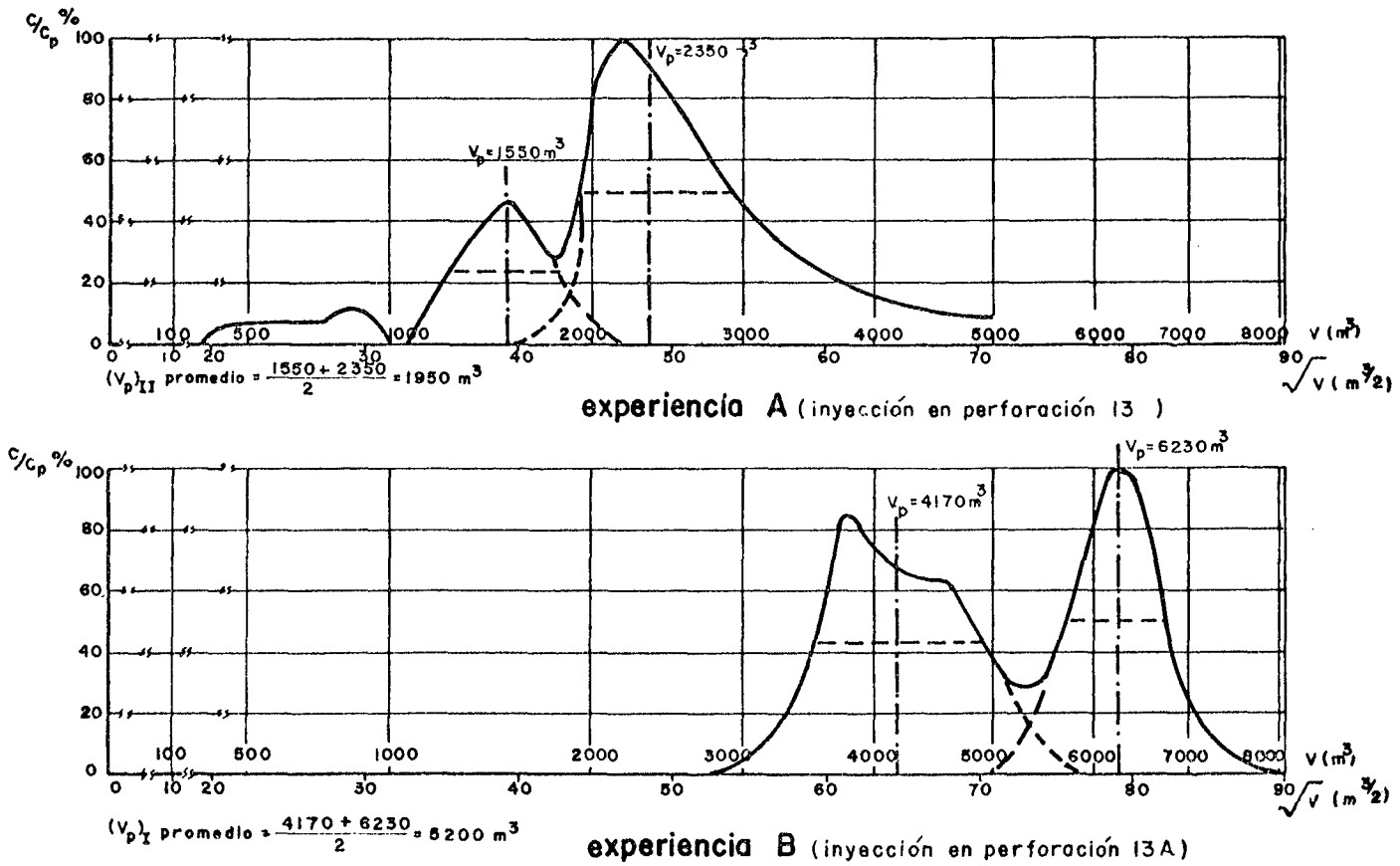


Fig.54 Determinación de la transmisibilidad en acuíferos de distinta permeabilidad (64)



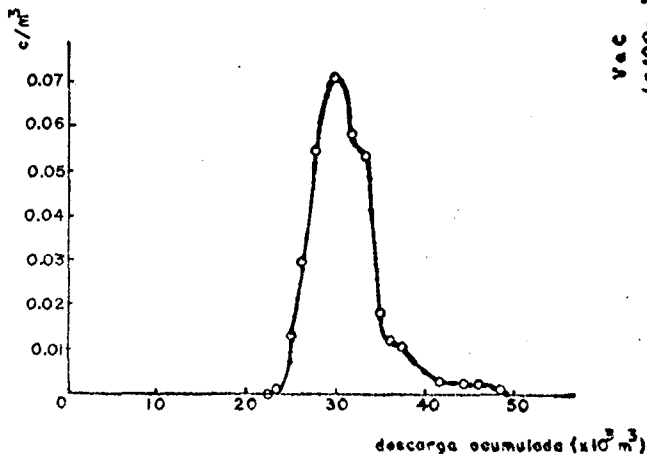


Fig. 56 -Concentración de tritio en las surgencias en función de la descarga acumulada (72)

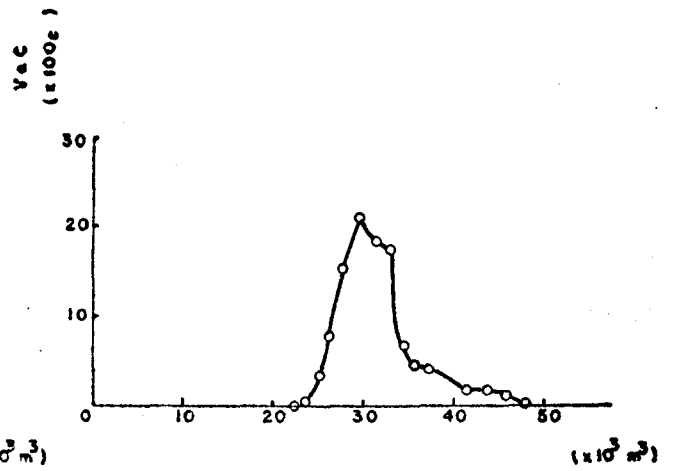


Fig. 57 -Descarga-concentración en función de la descarga (72)

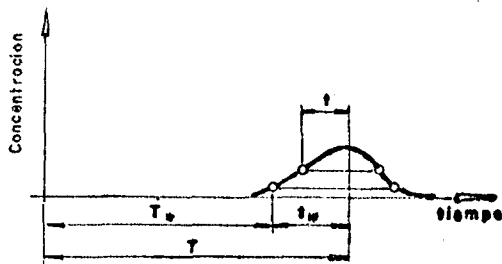


Fig. 58 -Relación dispersión long.-tiempo de tránsito (71)

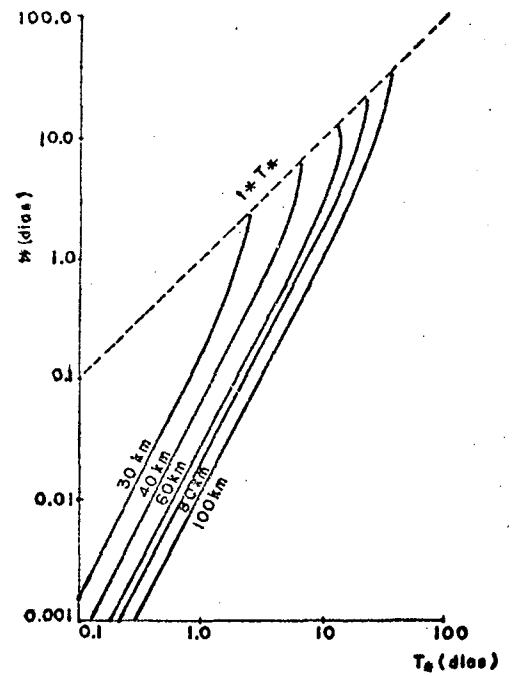


Fig. 59 -Relaciones de tiempo de tránsito para el ejemplo de la fig. 19 (71)



Fig. 60 - Pozo testigo o auxiliar empleado en reactivación secundaria.

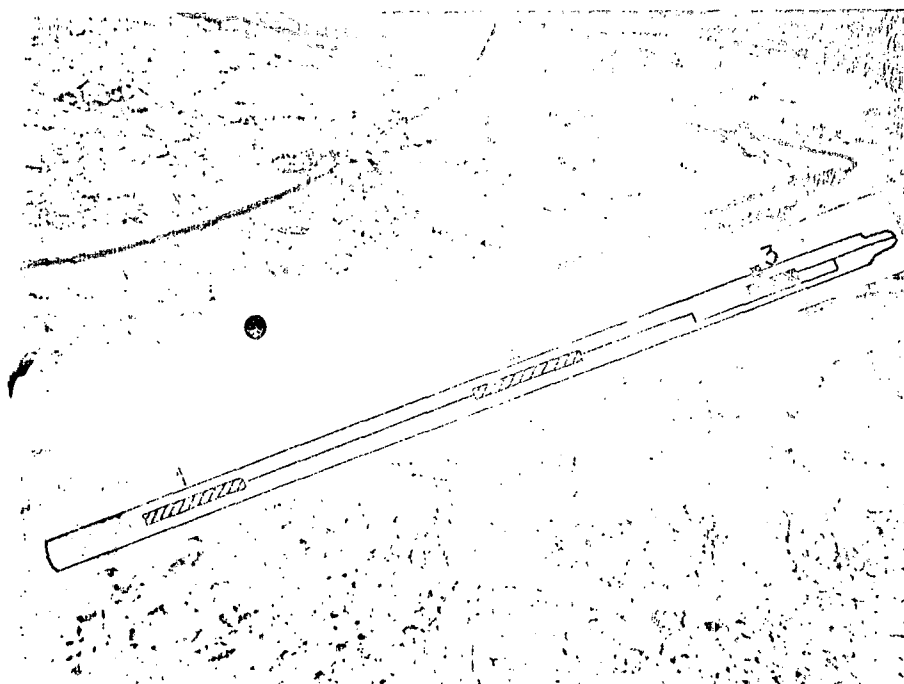


Fig. 61 - Sonda de medición empleada en pozos petrolíferos  
Consta de dos tubos tipo G.M. (1 y 2) y un inyector (3)  
apto para realizar cuarenta experiencias sin extraer la sonda del pozo.