

05.70.13  
05.70.14  
05.70.15

C.N.E.A. Biblioteca  
APLICACIONES  
2 1970 ✓

SAN JUAN  
República Argentina

# aplicación de radioisótopos en hidrología

## 6º curso regional

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
REPUBLICA ARGENTINA

TRAZADORES RADIATIVOS EN AGUAS SUPERFICIALES

Héctor R. Gómez

APLICACION DE RADIOISOTOPOS EN HIDROLOGIA  
6to CURSO REGIONAL

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

## 1.0.0 INTRODUCCION

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 o gasto -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 Fricke, 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.

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 molinete en la sección ya que existe, como es sabido, un gradiente vertical y otro horizontal. La velocidad media se encuentra comprendida entre 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.

### 1.1.0 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 adsorción 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; fenómeno 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 regimen "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 regimen "permanente" en el que la concentración es practicamente constante en cualquier punto de la sección en un instante dado e independiente de las condiciones en que el trazador fue inyectado. fig. 1.

En general se alcanza antes la dispersión uniforme longitudinal y la dispersión constante (en un instante) en profundidad, que la lateral. Esto último es, practicamente, lo que perfija 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 (1). 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. 2.

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 (3) fig. 1:

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

$R_e$  : 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 dar la 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  $1 < R < 700$ .

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

$d$ : 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. 2.

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 (4) (5) (6):

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 Rimmer:

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

fórmula de Full:

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

$L_{\min}$  : 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.

### 1.2.0 VERIFICACION 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:

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

$N_i$  : 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;

$N_m$  : conteje 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.

### 1.3.0 TIEMPO DE PASO DE LA "OLA RADIACTIVA" O "NUBE RADIACTIVA"(FICO)

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;

$v_m$  : 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 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.

## 2.0.0 METODOS DE MEDICION DE CAUDALES CON TRAZADORES RADIACTIVOS

### 2.1.0 METODO DE LOS "DOS PICOS"

Este método que sólo es aplicable en conductos de sección o perímetro 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 buena mezcla; 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. 3.

El caudal  $Q$  (m<sup>3</sup>/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:

$$v_m = \frac{\Delta l}{n} \sum_i \left( \frac{1}{\Delta t} \right)_i = \Delta l \left( \frac{1}{\Delta t} \right)_m$$

n : número de partículas en movimiento.

En la fig. 3 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  $\sigma$

$$Q_{\text{medido}} = v_G \sigma = \Delta l \left( \frac{1}{\Delta t_m} \right) \sigma$$

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

$$v_G = v_m \quad \therefore \quad \left( \frac{1}{\Delta t_m} \right) = \left( \frac{1}{\Delta t} \right)_m$$

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.

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

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 frecuentes en aguas subterráneas o movimientos de sedimentos de fondo, es, por lo menos, importante tener en cuenta la relación  $\beta$  (momentum o coeficiente de cantidad de movimiento) ya que en movimiento laminar, bien definidos, la relación anterior puede diferir considerablemente de 1.

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

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.

$$Q_{\text{medido}} = v_G \sigma = \Delta l \left( \frac{1}{\Delta t_G} \right) \sigma \quad (1)$$

La velocidad del papel del registrador gráfico esta dada por:

$$v_{\text{papel}} = \frac{\Delta l_G}{\Delta t_G} \quad \dots \quad \Delta t_G = \frac{\Delta l_G}{v_{\text{papel}}} \quad (2)$$

Reemplazando (2) en (1)

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

- $\Delta l$  : 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.

### 2.2.0 METODO DE LAS CUENTAS TOTALES

Este método fue desarrollado por D. D. Hull (7) (8) 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 (regimen 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 nucleido.

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  $c_t$  ( $\mu\text{c}/\text{m}^3$ ):

$$R_t \left( \frac{\text{ctas}}{\text{seg}} \right) = F \left( \frac{\text{ctas/seg}}{\mu\text{c}/\text{m}^3} \right) c_t \left( \mu\text{c}/\text{m}^3 \right) \quad (1)$$

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

$$N = \int_{t(a)}^{t(b)} R_t dt \quad \dots \quad N = F \int_{t(a)}^{t(b)} c_t dt \quad (2)$$

$N$  : contaje 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 más adelante debe ser determinado con el mismo detector, nucleido 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:

$$Q = \frac{dV}{dt} \quad \dots \quad dt = \frac{dV}{Q} \quad (3)$$

Reemplazando (3) en (2)

$$N = \frac{F}{Q} \int_{t(a)}^{t(b)} c(t) dV \quad (4)$$

Como es dable apreciar la expresión bajo el signo de integración no es otra cosa que la actividad inyectada A (uc):

$$\int_{t(a)}^{t(b)} c(t) dV = A \quad (5)$$

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:

$$N = \frac{F}{Q} A \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad Q = F \frac{A}{N} \quad (6)$$

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:

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

- La constante F fue determinada con el mismo detector, nucleido 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 varíe durante el intervalo de medición.

- El período de semidesintegración del nucleido 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 conteaje  $[t(a) - t(b)]$  es igual o superior al tiempo de pasaje de la "ola radiactiva".

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

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

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:

$$M = \int_{t(a)}^{t(b)} c(t) dV \dots \int_{t(a)}^{t(b)} c(t) dQ dt = Q \int_{t(a)}^{t(b)} c(t) dt$$

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

### 2.2.1 Constante de proporcionalidad o calibración

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

$$\frac{A_c}{V_c} \text{ (}\mu\text{c/m}^3\text{)}$$

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

- $n_c$  : 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

$$x'_{1/2} = \frac{1}{\mu_{01}} ; x'_{1/2} \gg x'_{1/2}$$

$\mu_{01}$  : 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 determina 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:

$$F = \frac{n_c}{A_c/V_c} \left( \frac{\text{ctas/seg}}{\mu\text{c/m}^3} \right) \quad (7)$$

Reemplazando (7) en (3)

$$Q = \frac{n_c}{A_c} \frac{A}{N} V_c \quad (8)$$

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  $\pm 5\%$ , su propagación en la expresión (8) 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 la  $A_c$  difiere entre cuatro y cinco cifras, para un caudal, por ejemplo, de  $20 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

La calibración estática hasta aquí desarrollada puede reemplazarse por una calibración dinámica en caso de conocerse el caudal o gasto 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, nucleido y geometría de medición no difieran.

### 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 (8)

$$N = F \frac{A}{Q} \tag{9}$$

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

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

$$100 \frac{\sigma_N}{N} = \sqrt{\frac{N}{N^2} + \frac{2 N_F}{N^2}} = p (\%) \tag{10}$$

Siendo  $p$  la precisión porcentual que obtendremos en la medición del caudal. Reemplazando (9) en (10):

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

Multiplicando por  $A^2$  e intercambiando términos:

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

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 esta dada por:

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

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

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  $p$  (%):

$$A_{\min} (\mu\text{c}) \geq \frac{Q}{F} \frac{100^2 \pm 100 \sqrt{100^2 + 8 p^2 n_t t}}{2 p^2} \quad (11)$$

### 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 continua (sonda sumergida, semisumergida o adosada a cañerías) o bien discontinua, por extracción de muestras periódicas.

Cuando el tirante de agua o ancho de la sección de medición es inferior a  $7 x'_{1/2}$ , ó bien cuando el río arrastra piedras, cantos rodados u otro tipo de sedimento 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. 4)

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

Este método nos permite medir la concentración  $c_m$  durante el lapso  $(t(a) - t(b))$  o mayor y así mejorar la estadística del conteo. 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 volúmen será tal que resulten representativas de la dinámica del trazador en la sección de medición.

Guizerix et al (4) preconizan el uso de una variante de este 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:

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

- $q$  : caudal constante derivado hacia el recipiente de medición ( $m^3/\text{seg}$ );
- $a$  : actividad derivada de la corriente principal (uc) y almacenada en el recipiente;
- $A_c$  : actividad usada en la calibración (uc);
- $n_c$  : actividad medida en la calibración (ctas/seg);
- $t$  : tiempo de conteo de la actividad recogida en el río (seg).

El caudal se calcula a partir de:

$$Q = q \frac{A}{a} \quad (4) \quad \dots \quad Q = \frac{A}{A_c} \frac{n_c}{N} q t$$

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 expusieramos.

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

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

El volumen de 18 litros ha sido fijado teniendo en cuenta problemas de transporte, portabilidad e 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, contínuos o discontinúos tienen la ventaja de permitir un conteo 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 comprobar 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.

#### 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.

#### 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. 5.

Si el subsidiario lleva la fracción  $x_Q$  del caudal principal  $Q$  también llevará la fracción  $x_A$  de la actividad inyectada, por esa razón de (8):

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

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.

### 2.3.0 METODO DE INYECCION CONTINUA O DILUCION

Constituye una variante de forma, más 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. 5):

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

$Q$  : 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  $q \ll Q$

$$q C_1 = Q C_2 \quad \therefore \quad Q = q \frac{C_1}{C_2} \quad (1)$$

Igual que antes, si las concentraciones fueren 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. 6.

- El fondo natural no varió durante la experiencia.

- El regimen es permanente.

### 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.

#### 2.4.0 COMPARACION ENTRE LOS METODOS DESCRIPTIVOS

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 estos 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 podemos 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 más 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:

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

Como podemos apreciar en la fig. 6, 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. 4)

$$\sigma_1 = \left( \int_{t(a)}^{t(b)} R(t) dt \right)^{1/2} \quad (3)$$

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

$$\sigma_2 = \left[ K_m (t(b) - t(a)) \right]^{1/2} \quad (4)$$

Suponiendo que el tiempo de contaje en (3) y (4) 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).

### 3.0.0 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 más 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 (9) (10):

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

$C(x, t)$  : 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 nucleído 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:

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

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

$Q$  : caudal ( $f t^3$ /seg);

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

W : ancho a mitad de altura (seg);

L : distancia (ft).

En la fig. 7 hemos graficado la expresión (i). 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 actividad" 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. 8a y 8b se representan distintos parámetros de dispersión longitudinal y transversal correspondientes a un estudio realizado en el río Danubio (34) 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 (12) (13).

#### 4.0.0 TECNICAS DE APLICACION EN PERFORACIONES Y TRANSPORTE DE FLUIDOS

##### 4.1.0 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 (14) (15).

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.

- Segundo 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 realiza 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 más 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 algunas de ellas.

#### 4.2.0 PERFORACIONES

##### 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 (enciertos terrenos) es más sensible que el de prospección eléctrica.

Bajas actividades indican la presencia de carbonos, dolomitas ( $\text{CO}_3$ )  ${}^3\text{NgCa}$ , gres y areniscas, medianas actividades pueden ser originadas por granitos, cenizas volcánicas, esquístos y muy altas actividades denotan altas leyes de uranio y potasio (16). 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 natural 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 más 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. 10 se puede apreciar buena definición y correlación para el método eléctrico (potencial espontáneo) y gamma natural en una litología tipo arena-arcilla (17).

En la fig. 11 se aprecia la perfecta armonía que existe entre el perfilaje gamma natural con pozo entubado y sin entubar (17).

El perfilaje gamma natural ha sido también confrontado con el perfilaje neutrónico en la fig. 12. El resultado también es, en este caso, satisfactorio para ambos perfilajes. (15).

La fig. 13 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. (18).

#### 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 más 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 más porosos quedan contaminados y pueden ser así localizados y definidos respecto a los menos porosos. En

estas operaciones se suele emplear carbón activo saturado de radón, vidrio en polvo con  $^{46}\text{Sc}$  ó 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. 14 una serie de perfilajes realizados empleando los métodos mencionados.

#### 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 período de semidesintegración compatibles 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. 17 indica la posición exacta de las perforaciones triples logradas marcando las balas con  $^{192}\text{Ir}$ . (19).

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.

#### 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 período 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 sólo es aplicable durante el fraguado (10 horas después de la cementación 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. 16 se representan dos registros gráficos que permiten apreciar la mayor resolución y sensibilidad del método radiactivo. Ambos perfilajes pertenecen al mismo pozo (20).

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.

#### 4.3.0 EXPLOTACION

##### 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 son aplicadas aún ya que el costo de las mismas puede incidir sobre los niveles de rentabilidad de las mismas.

4.3.1.1 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 figs. 9 y 18 contribuyen a aclarar la técnica (20) (21).

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.

#### 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 en 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. 19.

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.

4.3.2.1 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 inyecta en forma continua. En la práctica, sin embargo, se realizan inyecciones de trazador periódicas. (dos o más por día). (22) (23).

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:

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

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. (24).

#### 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. 9 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. Figs. 20 y 21.

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 más de 10 experiencias sucesivas sin necesidad de

recarga o extracción de la sonda.

En la fig. 22 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. 22, 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 fractura geológica u horizonte de alta permeabilidad.

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

$$q = \frac{\Delta e}{\Delta t} s \quad (\text{m}^3/\text{seg}) \quad (2)$$

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

$\Delta e$  : 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:  $0,03 \text{ m}^2$  en este caso.

Primera medición (fig. 22) niveles: 1222,5 m/1227 m.

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

Segunda medición (fig. 22) niveles: 1238 m/1240,5 m

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

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

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

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

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 practicamente igual a la velocidad del baricentro

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

#### 4.4.0 ALMACENAMIENTO, PROCESOS Y TRANSPORTE DE FLUIDOS

##### 4.4.1 Identificación de componentes

En las etapas de transporte, y distribución de fluidos puede ser preciso marcarlos para su ulterior 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 (25) cabe mencionar al Dy, Hf e In.

En la fig. 23 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.

#### 4.4.2 Tiempo de permanencia real

4.4.2.1 Algunas consideraciones previas. El tiempo de permanencia real de uno o más 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:

$$T_n = \frac{V}{q} \quad (\text{min}) \quad (3)$$

$T_n$  : 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.

4.4.2.2 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 al 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.

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

4.4.2.3 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. 24 está sintetizada la resolución gráfica de la expresión anterior. 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

$$\left[ A(t) e^{-07t/T_{1/2}} \right]$$

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).

$$T_p = \frac{\text{Area B}}{\text{Area A}} \quad (6)$$

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 valfa, ya que permite conocer cuales son las fracciones de material "sub-expuesto" aceptable y sobre-expuesto.

#### 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. 26.

#### 4.5.0 TRANSPORTE

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

##### 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: (16) (28)

- 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 alcoholifenato de bario y trifenil-antimonio respectivamente.

Con el fin de evitar las contaminaciones residuales en los poliductos algunos 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  $\text{INa}$ ) 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. 28 y 29 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 ( $SO_4$  Cd).

Para marcar interfases de hidrocarburos los autores de este trabajo, recomiendan emplear el Cd como naftenato (27).

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.

#### 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 comodamente 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 más empleados son el  $^{60}Co$  y el  $^{226}Ra$ .

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 fondo natural cuando es acercado a ellos un detector).

De las curvas de la fig. 30 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.

#### 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.

#### 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 4.5.2.

Es además necesario tener en cuenta que esa actividad mínima debe incrementarse, pues en 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 porosos 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 4.5.4.

4.5.4.1 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:

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

#### 4.5.5 Técnica de las fuentes puntuales.

Se introducen en la cañería llena pequeñas fuentes radiactivas adosadas a 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.

#### 4.5.6 Técnica de 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 en las inmediaciones del orificio de salida será:

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

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

Existe por lo tanto un tiempo óptimo ( $t_{\text{óptimo}}$ ) (29) 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:

$$A(t) = q a_0 t e^{-\lambda t} \quad \text{fig. 31} \quad (9)$$

$a_0$  : 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. 31 se representa  $A(t)/A_{\text{máx}}$  y se dan los valores de  $t_{\text{óptimo}}$  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.

- 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.

#### 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. 32;  $c = f(t)$ .

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 grande las posibilidades de detectarla disminuyen debido a que tiende 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: (30) (31)

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

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:

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

$S$  : sección de la canalización.

Luego la máxima distancia explorable estará dada por:

$$L_{m\acute{a}x} = \frac{Q}{S \lambda} \log \frac{q}{Q} \frac{A_0}{a_m} \quad (13)$$

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.

#### 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 (32) sondas de reducidas dimensiones en cuyo interior están los detectores, fuente de alta tensión, integrador transistorizado y reg. 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 técnica requiere también lavado exhaustivo antes de la detección.

#### 4.6.0 OTRAS CONSIDERACIONES SOBRE DETECCION DE PERDIDAS

Si bien algunas 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 descriptas en 4.5.6 y 4.5.7 sólo pueden emplearse en casos especiales y para tener éxito en la localización es necesario que la pérdida sea significativa.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Balloffet, Gotelli, Meoli, Hidráulica, Ediar Soc. Anon. Editores, seg. edición (1952)
- 2.- 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.
- 3.- Schoeller, H., Les eaux souterraines - Mosson y Cia Ed. 1962.
- 4.- Guizerix, J., et all. Les mesures de débits effectuées en France a l'aide de traceurs radioactifs par la methode d'integration.
- 5.- Masao Kato et all. A study in River engineering on the Rad. in Hydrology- Proc. of a Symp. Tokyo, 5-9 March 1962.
- 6.- Timblin et all. Use of rad for open Channel flow measurements. Proc. of a Sim. Tokyo 5-9 march 1962.
- 7.- Hull D.E., et all. Flow measurements by the total - count method - Repr. from 2nd UN Geneva Conference.
- 8.- Hull D.E., The total count technique; a new principle in flow measurement Int. J. Appl Radiat. Isotops 4 (1958).
- 9.- Chesselet, et all. Determination par detection nucleaire des coefficients de diffusion. Rad. in Hydrology - Proc. of a symp. Tokyo, 5-9 march, 1963.
- 10.- 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.
- 11.- Hull, D.E., Dispersion and persistence of tracer in River flow measurements Int. Journal of Appl. Rad. isotopes, 1962, Vol. 13.
- 12.- Berg, O., and Somer, E. Determination of the distribution of sewage concentration in large natural waters from planned sewage outlets.
- 13.- Int. Atomic Energy Agency - Guidebook on nuclear techniques in Hydrology Technical Reports series No. 91.

- 14.- Castagnet, A.C., Gómez, H.R. Técnicas y equipos nucleares para la medición y control del petróleo, del gas y de la petroquímica. Inst. Arg. del Petróleo.
- 15.- C.N.E.A., Aplicación de Radioisótopos en la Industria Argentina. (Encuesta Internacional).
- 16.- Documento Schlumberger No. 8, Introducción al método de perfilaje de pozos (Schlumberger), 1958.
- 17.- Kokesh, F.P., Gamma Ray logging, The Oil and Gas Journal, 23-7-51.
- 18.- 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.
- 19.- Cambell, H.F. OE/65-3, Welx, A Division of Halliburton Comp. 1965
- 20.- Alekseev and Srebrodolsky, Rad. tracers in Geophysics, Proc. of Symposium, Pragua, 21-25 Nov. 1966.
- 21.- Watkins, J.W., Dunning, H.N, Los isot. rad. en la investi. de la prod. de petróleo. Acta: C.E.A.
- 22.- 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 Pragua, 21-25 Nov. 1966, 161.
- 23.- Hull, D.E. Rad. tracers to merk interfaces and measure intermiscing in pipe lines. Ind. Chem. No. II (1952).
- 24.- C.N.E.A. Norma de Seguridad Radiológica y Nuclear.
- 25.- Bondy Ch., Vidal, J.P., Robin, G. La méthode des tracers activales es ses Appl. récentes a la verrerie et an pétrole, Suppl. an bulletin d'information, 1967 No. 66.
- 26.- Beswick, C.K. Routine industrial uses of radioactive tracers. (SM-84/2) Proc. of a Symposium, Pragua, 21-25 Nov. 1966, 21
- 27.- Comanescu, P. Sandru et Topa, A., Dev. Rec. de l'utilisation das traceurs rad. daus l'industrie Roumaine du petrole Proc. of a Sym. Pragua, 21-25 nov. 1966.
- 28.- Weber, Rad. tracer success full in prod pipe line appl. Oil and gas Journal: 10 nov. 1952.

- 29.- Teillier, C. et all. Quelques appl. des rad. a per. courte dans l'ind. gaziere Francais. Conf. Viena 5-9 nov. 1962.
- 30.- Williams, M. Nuclear Eng. and Sc. Conf. 4-7 april 1960 paper No. 48.
- 31.- Joly, J. Rad. and Geology, London Arch Constable and Co, Ltda.
- 32.- Plata Bedmar, X curso de apl. de los rad. en la industria, Conf. No. 19 y 20.
- 33.- Kohl, J. and oill. Rad. Appl. Eng. Van Vostrand Nuclear Sc. Series.
- 34.- Tosovac, T. et ali. 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.

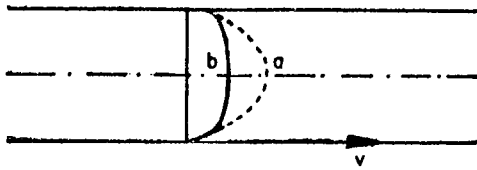


Fig. 1 - Distribución de velocidades con caudal constante.  
a) Reg. laminar; b) reg. turbulento

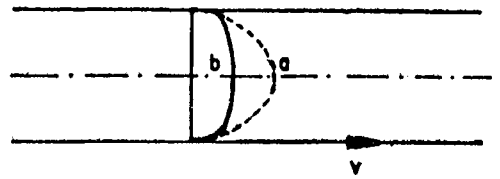


Fig. 2 - Distribución de velocidades con caudal constante  
a) con superficie lisa  
b) con superficie rugosa

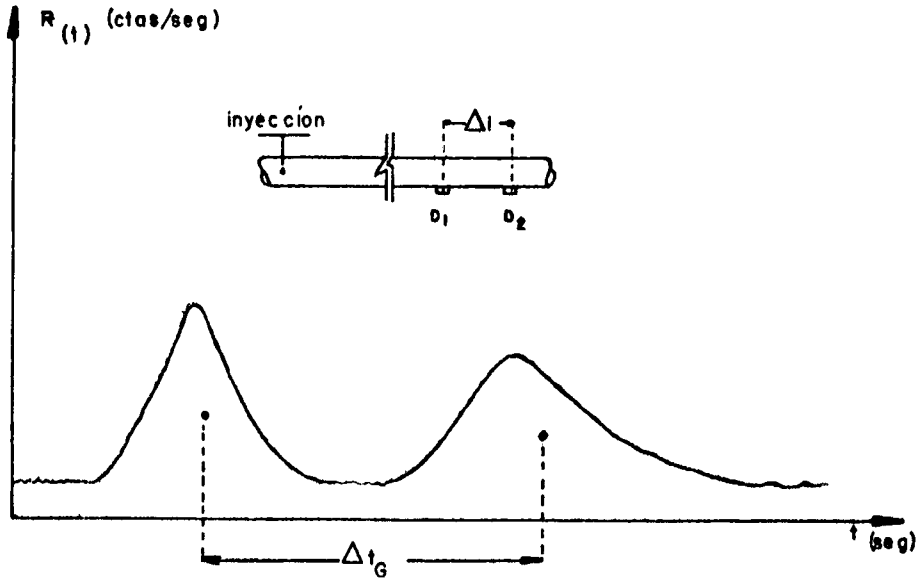


Fig. 3 - Método de los "dos picos".

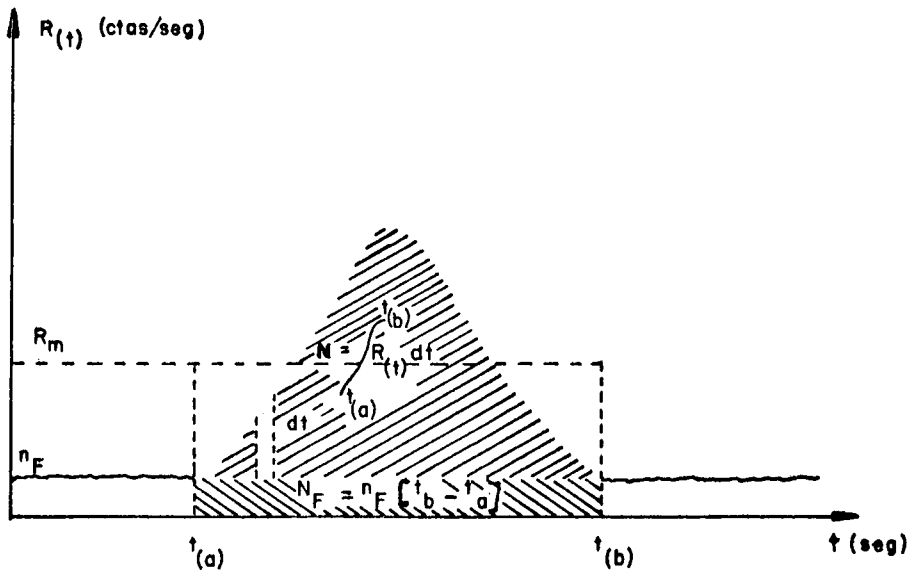


Fig. 4 - Método de las cuantas totales

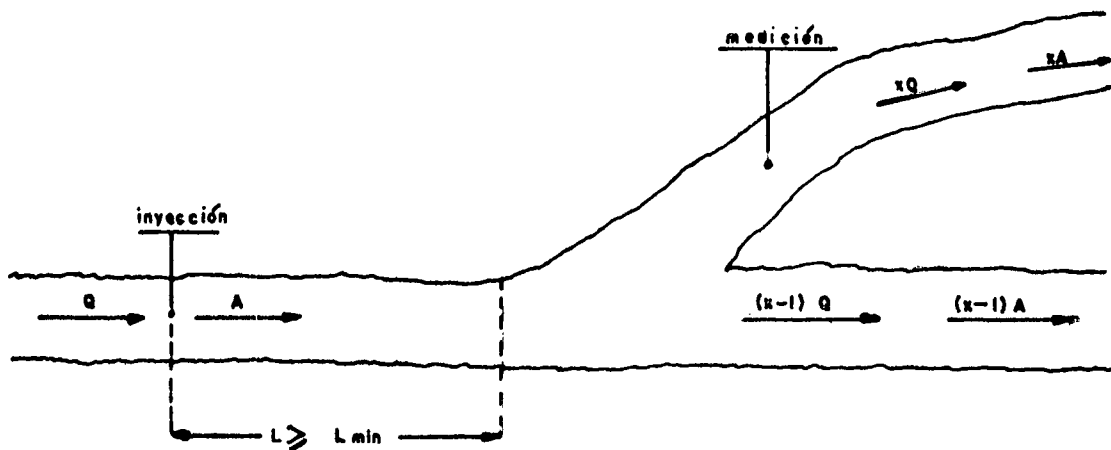


Fig. 5 - Posibilidades de medición con corrientes divergentes

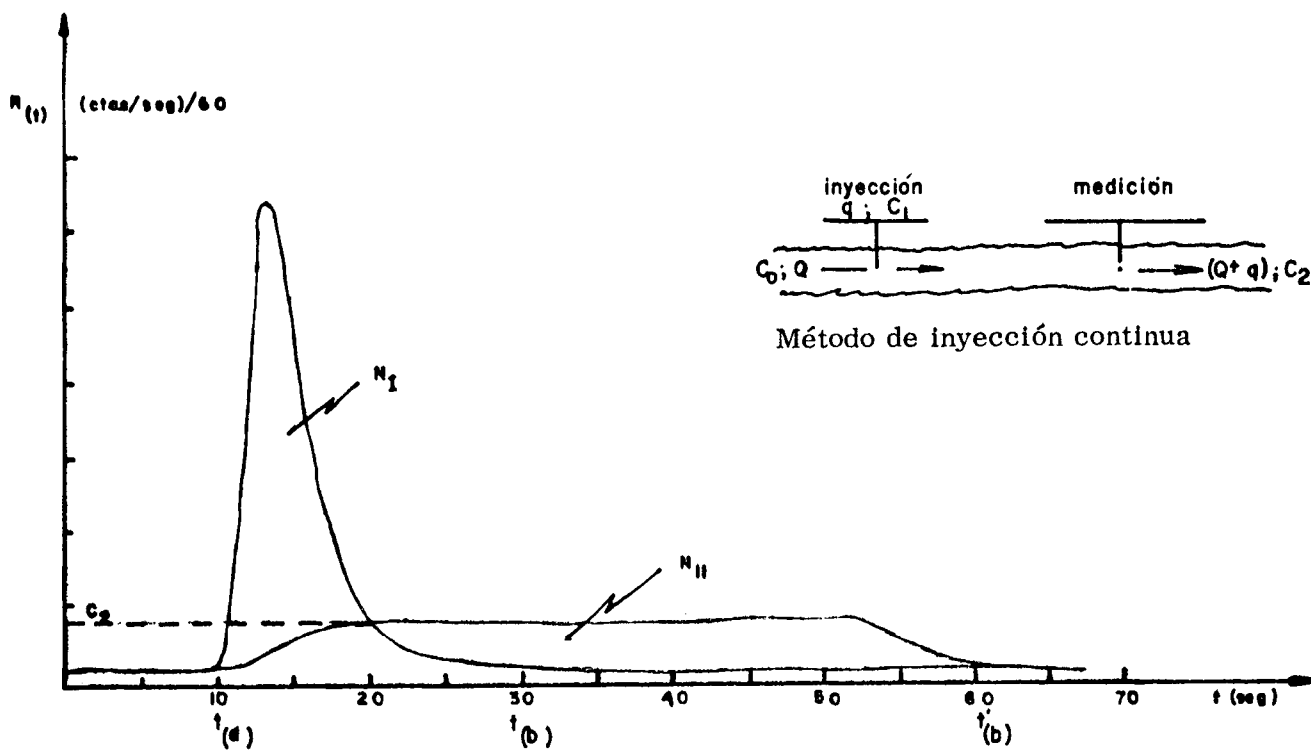


Fig. 6 - Métodos de las cuantas totales y método de inyección continua. La actividad inyectada, caudal, distancia inyección-medición y la geometría de medición son las mismas en ambos casos.

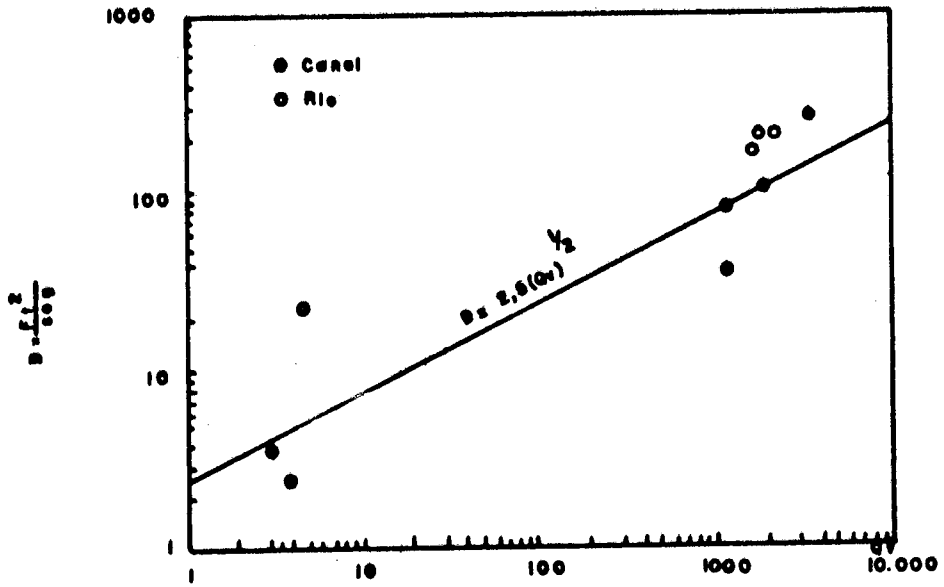


Fig. 7 - Coeficiente de dispersión longitudinal en ríos y canales (11)

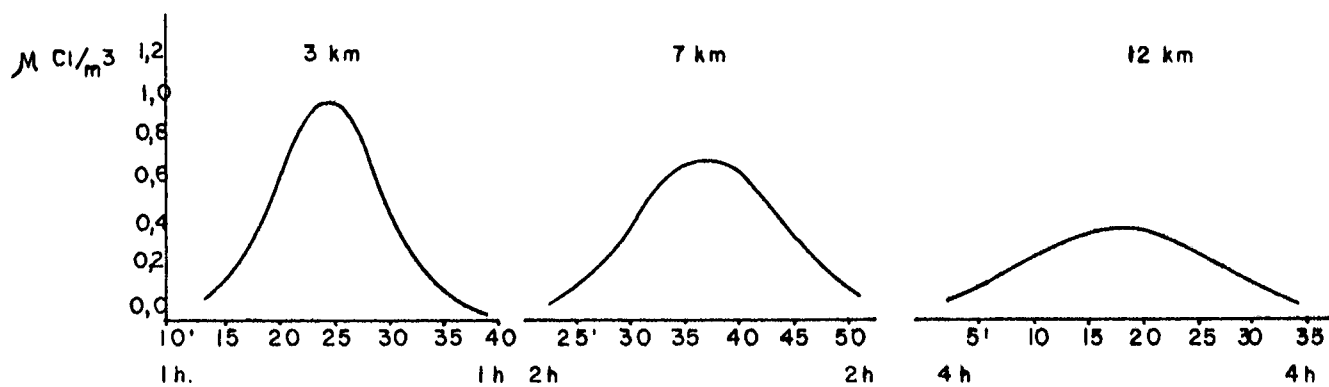


Fig. 8a- Distribución en el trazador y el espacio del trazador radiactivo en el Río Danubio. (14).

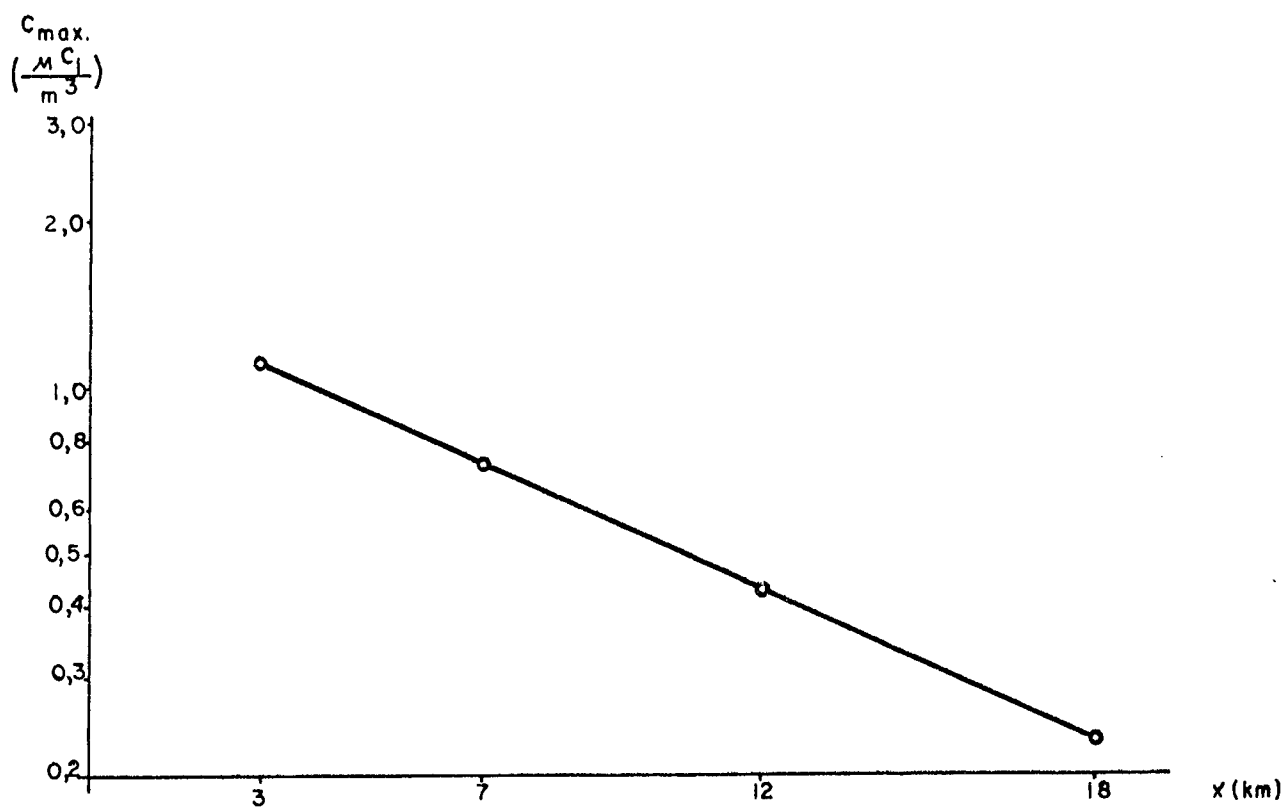
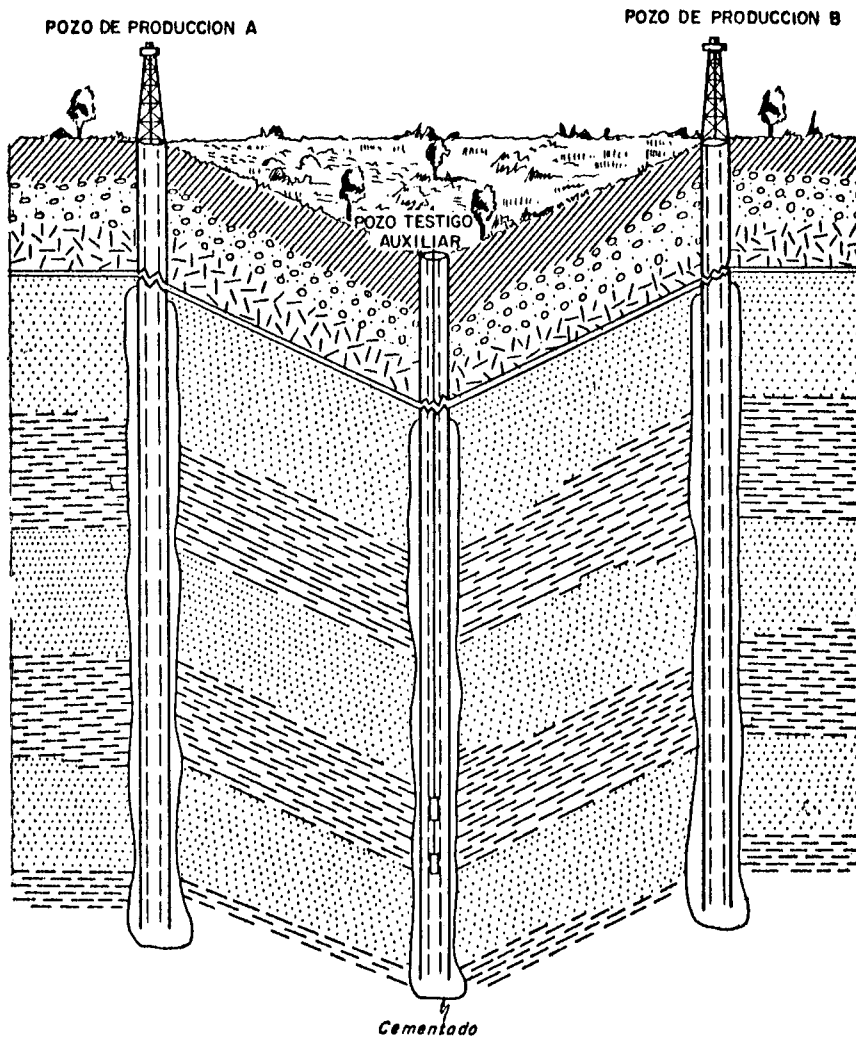


Fig. 8b - Concentración máxima en función de la distancia al punto de inyección. Río Danubio. (14).



ESQUEMA REPRESENTATIVO DE LA DISPOSICION DE POZOS DE PRODUCCION Y AUXILIARES... Fig. 9

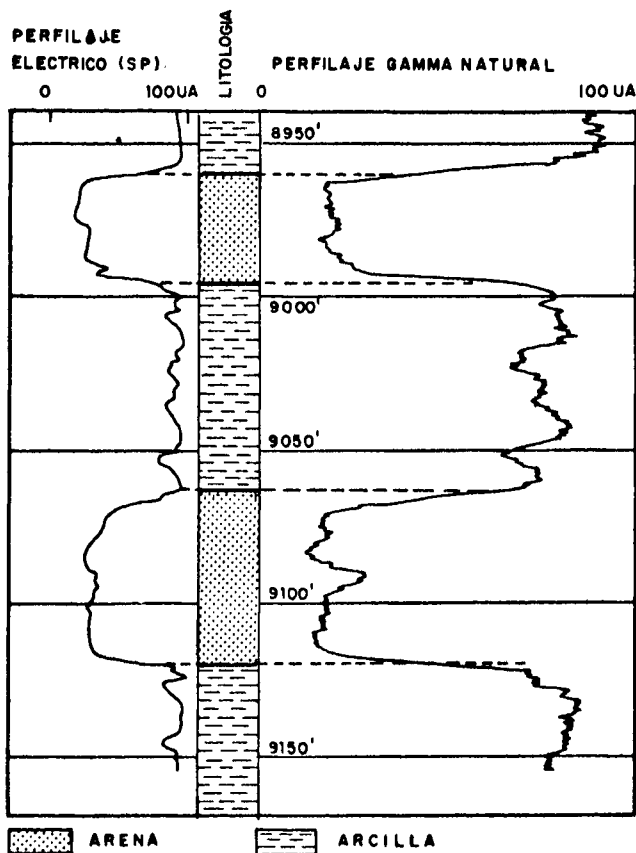


FIG.10.-PERFILAJE DE POZOS. COMPARACION ENTRE UN PERF. ELECTRICO (SP) Y GAMMA NATURAL EN SERIES ARENA-ARCILLA. VELOCIDAD PERF. 220m/hora CTE. DE TIEMPO : 7 seg.

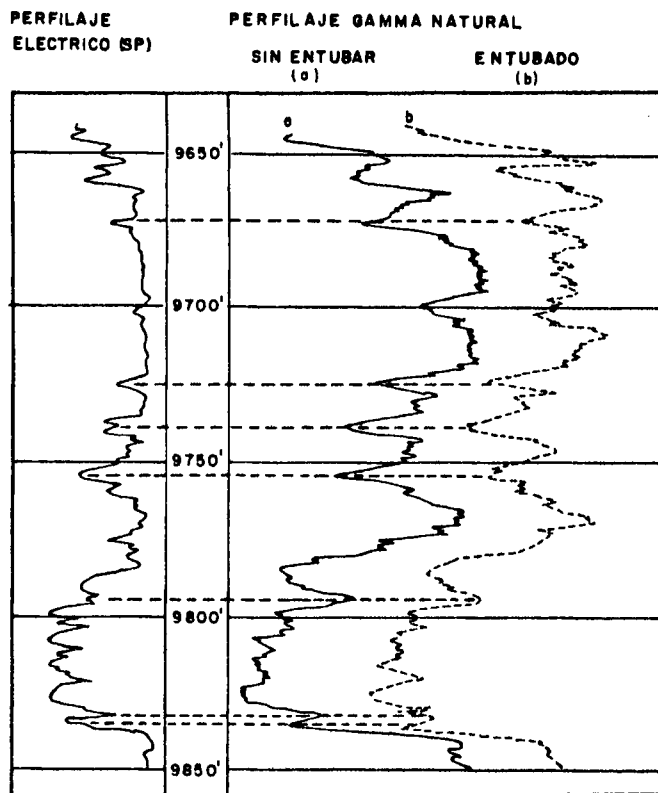


FIG.11.-PERFILAJE DE POZOS. COMPARACION ENTRE UN PERF. ELECTRICO (SP) Y GAMMA NATURAL EN SERIES ARENA-ARCILLA. VELOCIDAD PERF. : 220 m/hora CTE. DE TIEMPO : 7 seg.

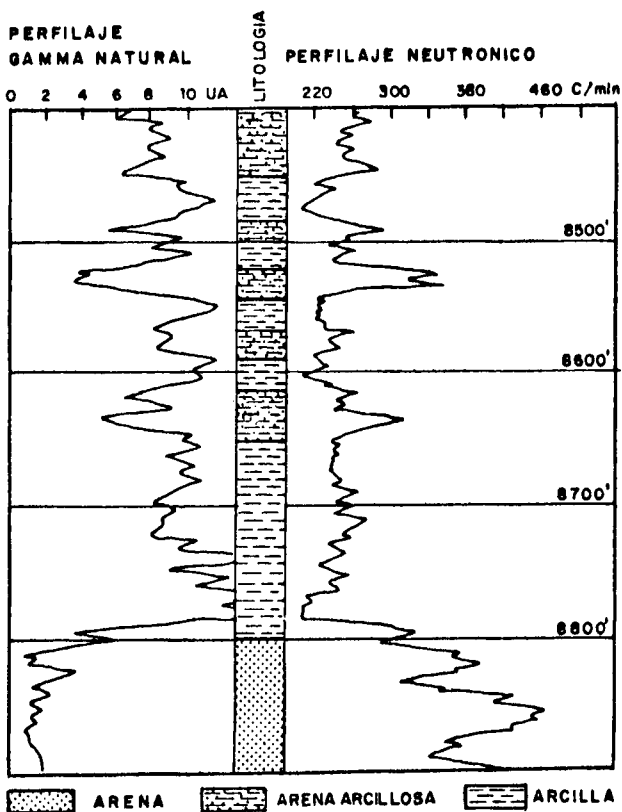


FIG.12.-PERFILAJE DE POZOS.. PERFILAJE NEUTRONICO Y PERFILAJE GAMMA NATURAL...

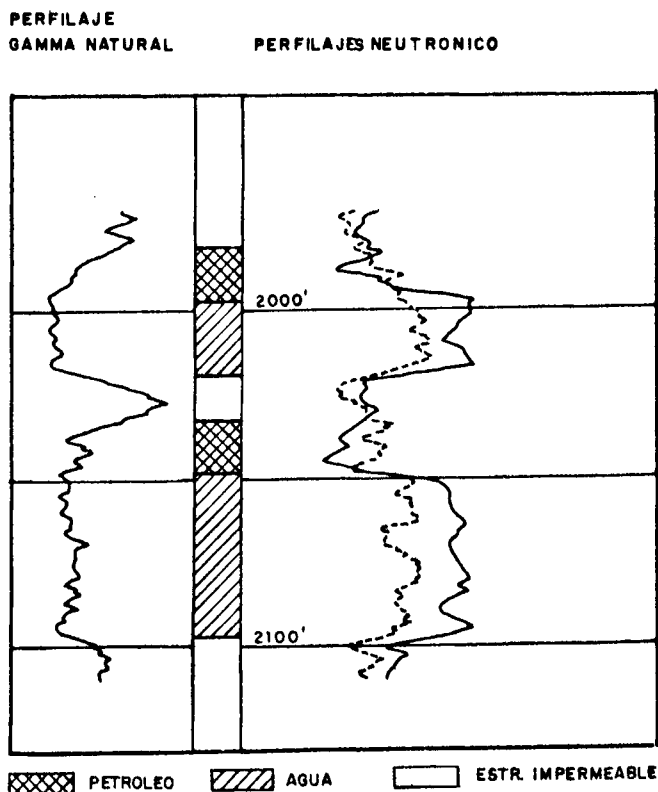


FIG.13 -PERFILAJE DE POZOS COMPARACION ENTRE PERFILAJE GAMMA NATURAL Y DOS TIPOS DE PERF. NEUTRONICOS...

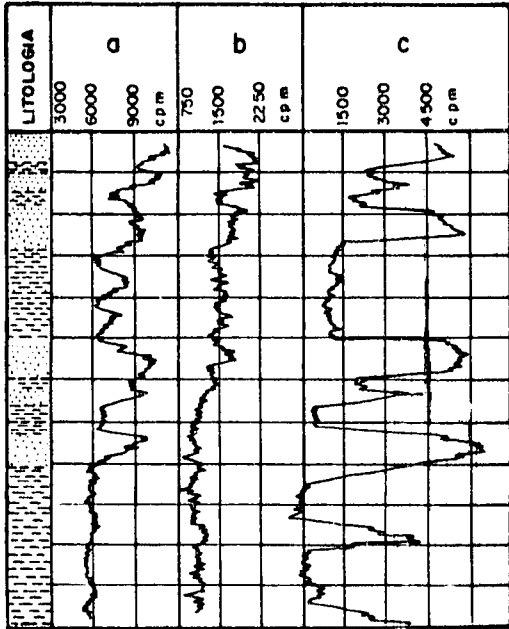


FIG- 14 - PERMEABILIDAD Y POROSIDAD...  
 Perfilaje neutronico (a). Perfilaje gamma natural (b)  
 Perfilaje empleando un trazador radiactivo (c)

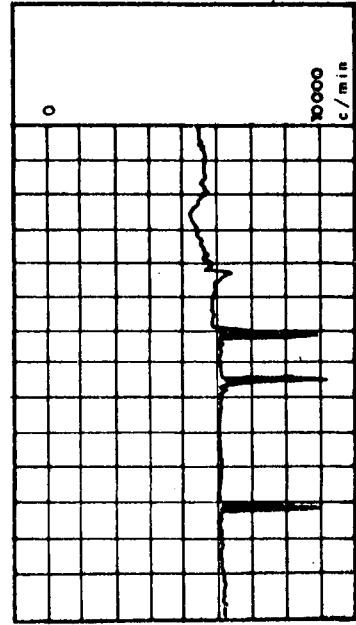


FIG- 15 - PUNZONADO DE CAMISAS O TUBERIAS  
 Empleando un trazador incorporado a las cargas  
 explosivas...

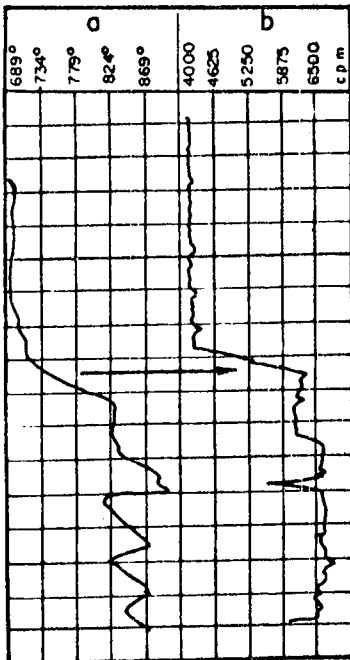


FIG- 16 - CONTROL DEL CEMENTADO  
 Perfilaje térmico (a) y Perfilaje gamma (b) con  
 trazador radiactivo incorporado al cemento...

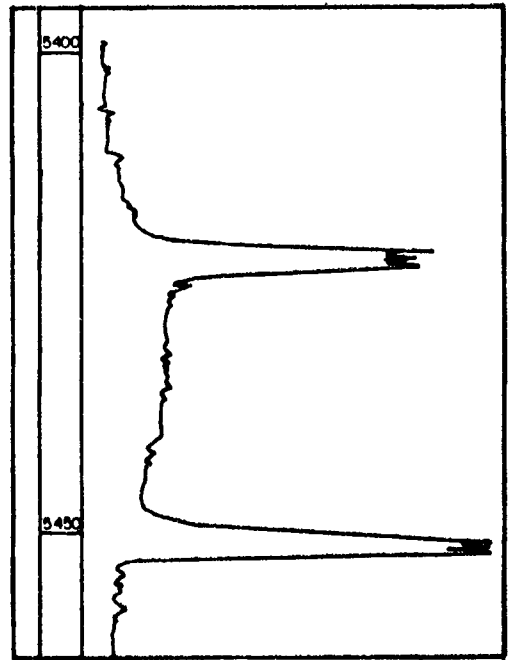


FIG- 17 - PUNZONADO DE CAMISAS Y CEMENTO  
 Perforaciones realizadas marcando las cargas  
 explosivas con <sup>131</sup>I

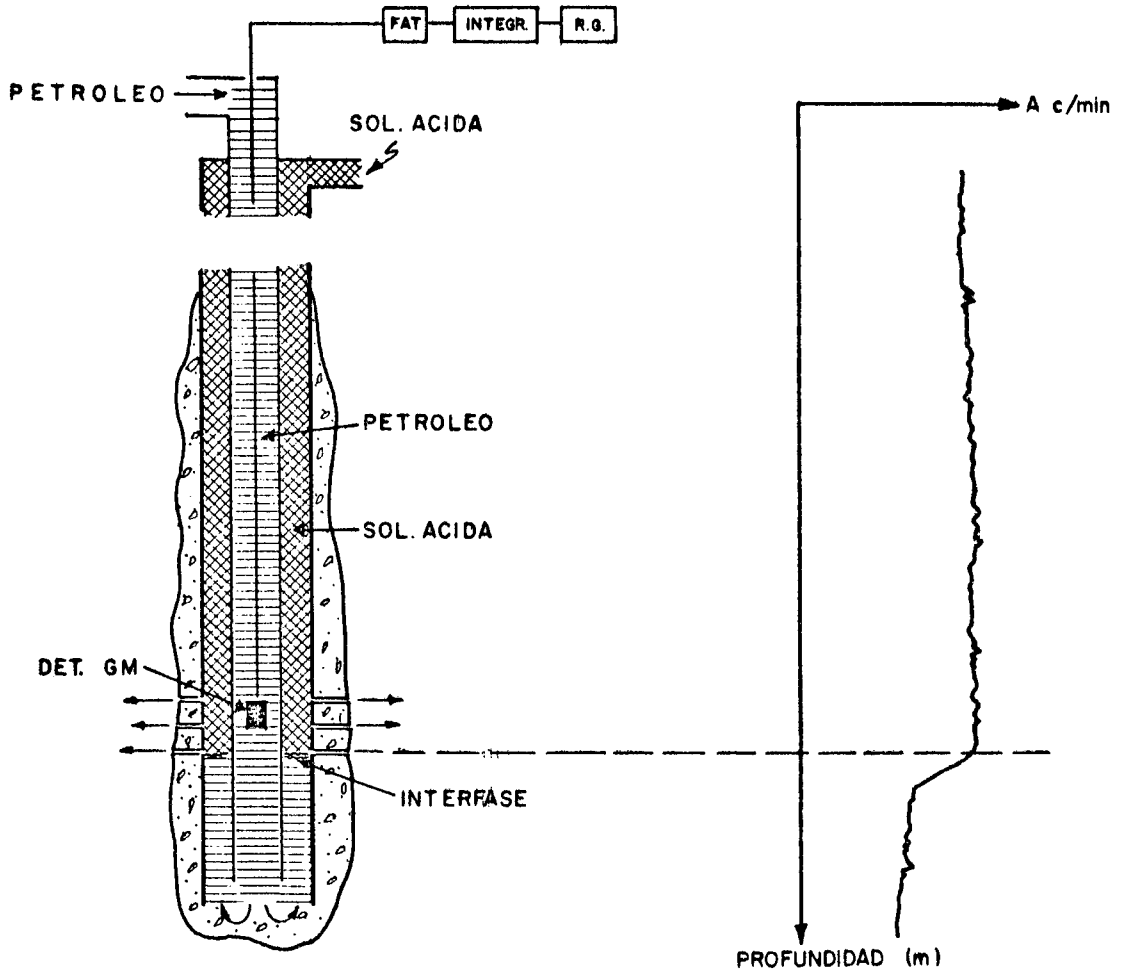


FIG- 18 -CONTROL DEL PROCESO DE ACIDIFICACION CON TRAZADORES RADIACTIVOS.-

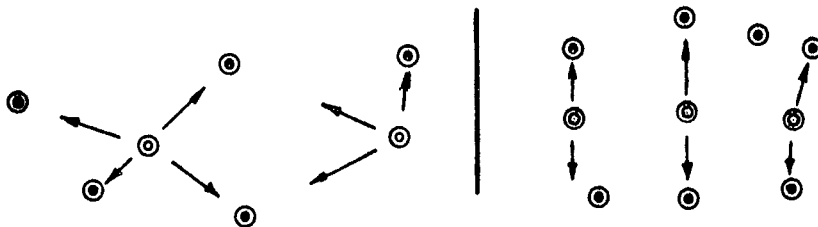


FIG- 19 DOS POSIBLES DISTRIBUCIONES DE POZOS TESTIGOS O DE INUNDACION(⊙) CON RESPECTO A LOS POZOS DE PRODUCCION(⊙).-

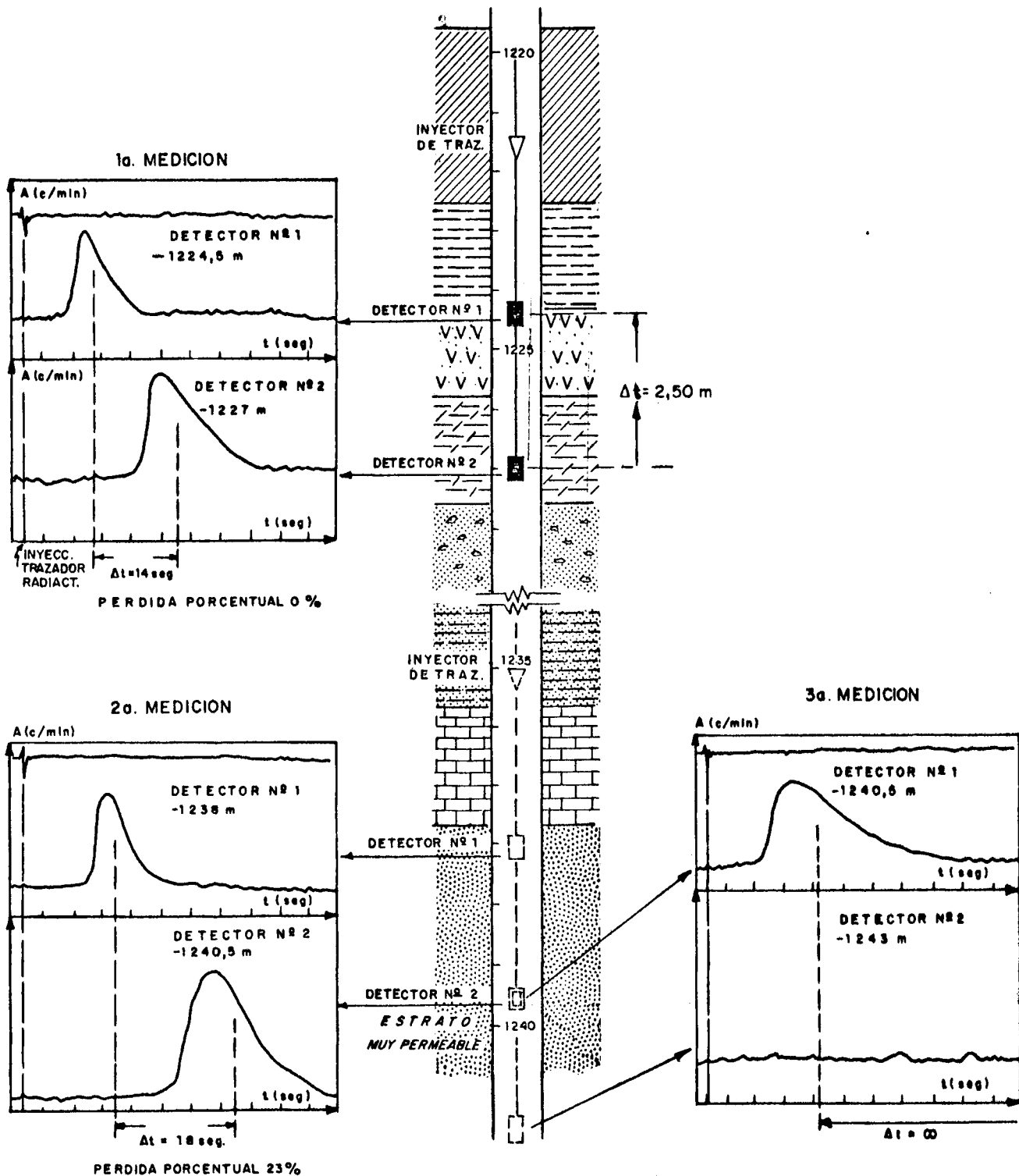


FIG 22 CONTROL DE LOS PROCESOS DE INUNDACION.- MEDICIONES REALIZADAS PARA LOCALIZAR FRACTURAS Y ZONAS DE ALTA PERMEABILIDAD..

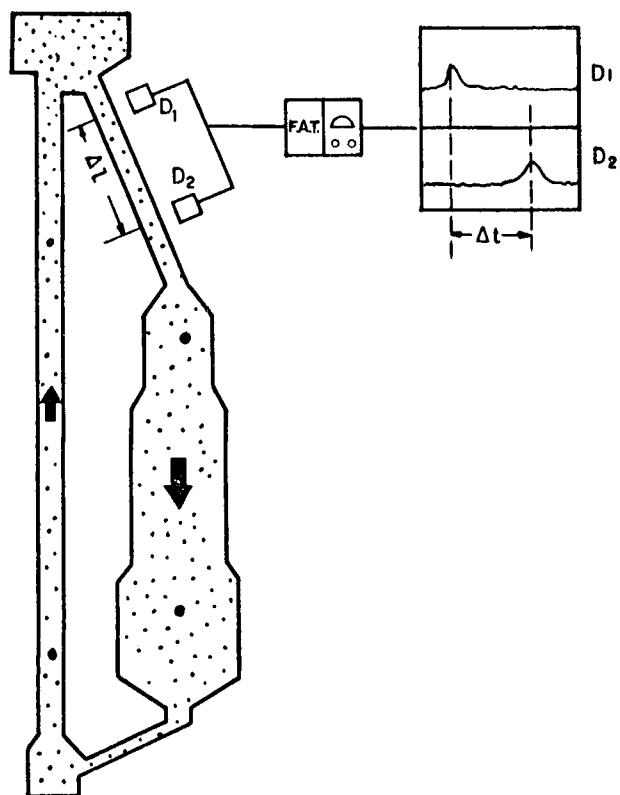


FIG- 2 3a· CIRCULACION DE CATALIZADORES  
Determinación de la velocidad de circulación de catalizadores en  
una instalación de craqueo térmico.

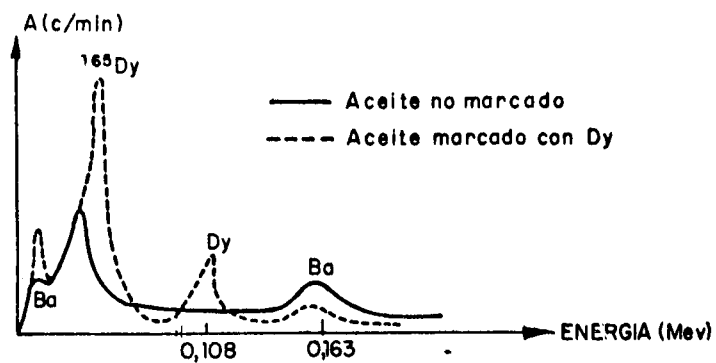


FIG2 3b IDENTIFICACION DE HIDROCARBUROS  
Espectro gamma de un aceite marcado con Dy y espectro  
gamma del mismo aceite sin marcar.

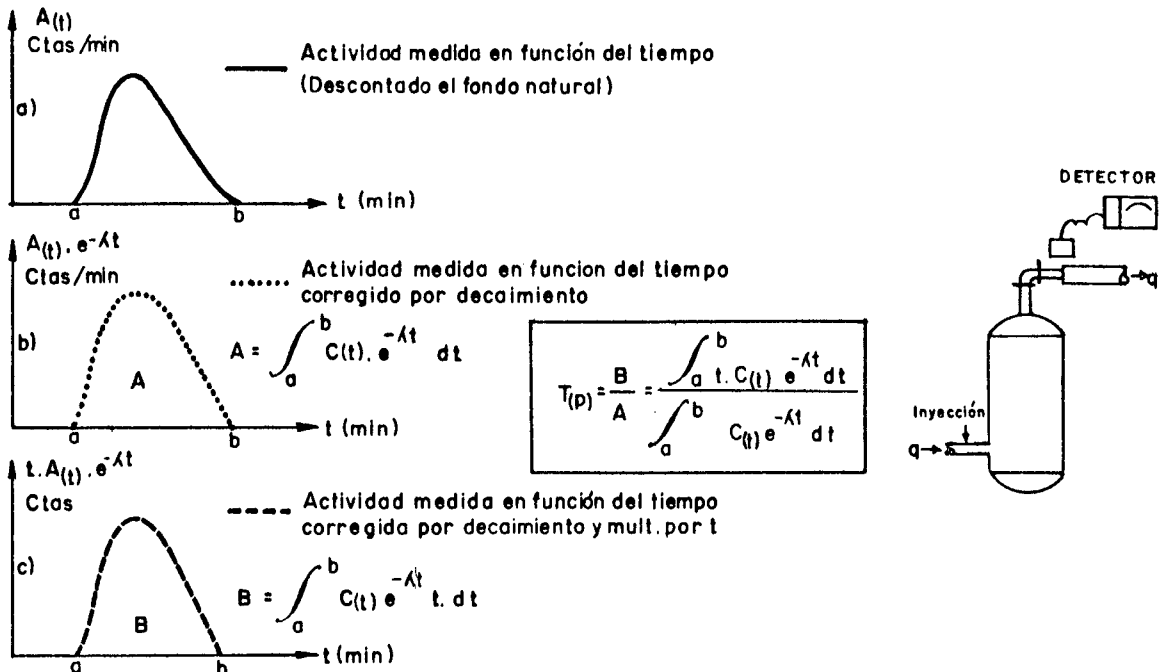


FIG. 24 - DETERMINACION DEL TIEMPO DE PERMANENCIA, PROMEDIO ( $T_p$ )

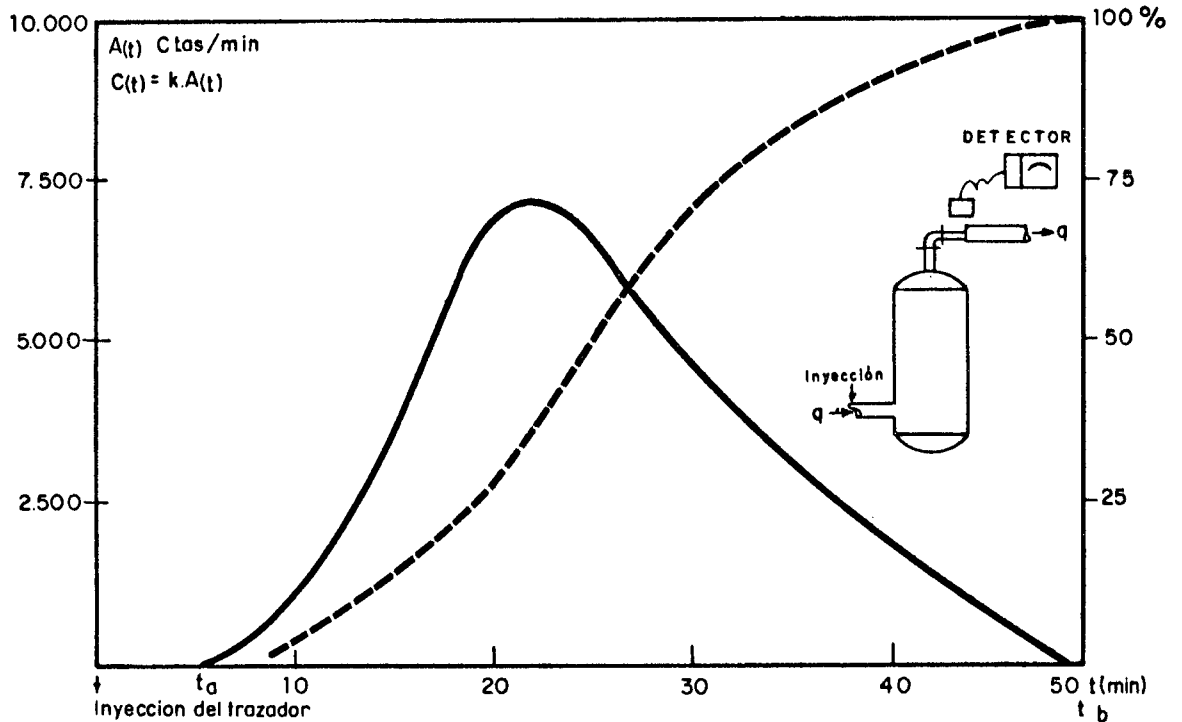


FIG. 25 - ACTIVIDAD MEDIDA EN LA SALIDA DEL PROCESO Y PORCENTAJES PROCESADOS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO...

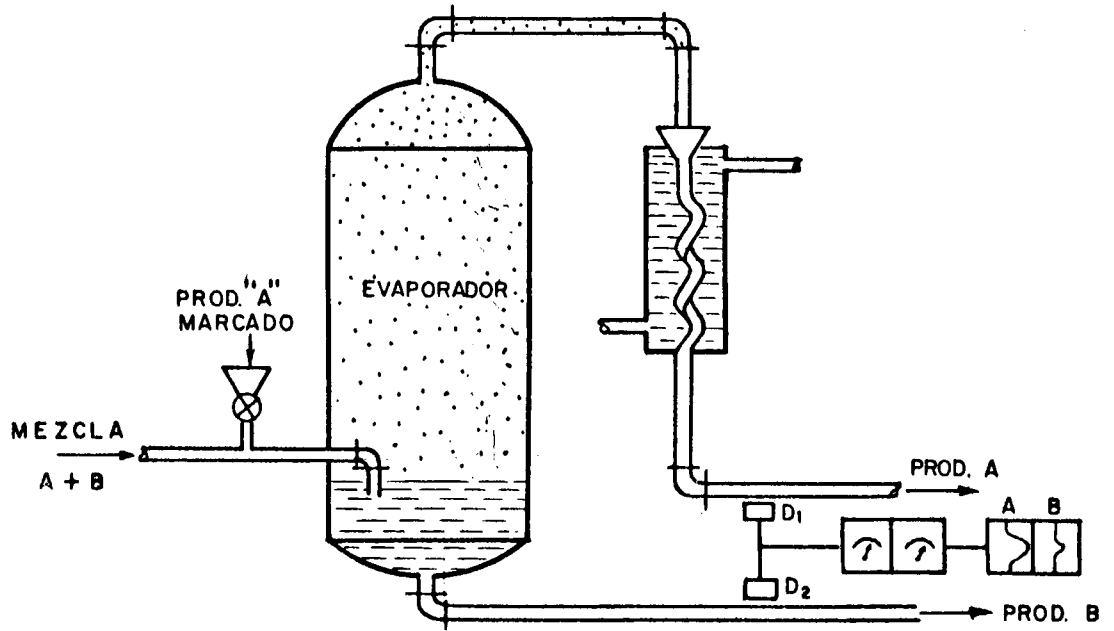


FIG: 26 · SEPARACION DE COMPONENTES DE UNA MEZCLA

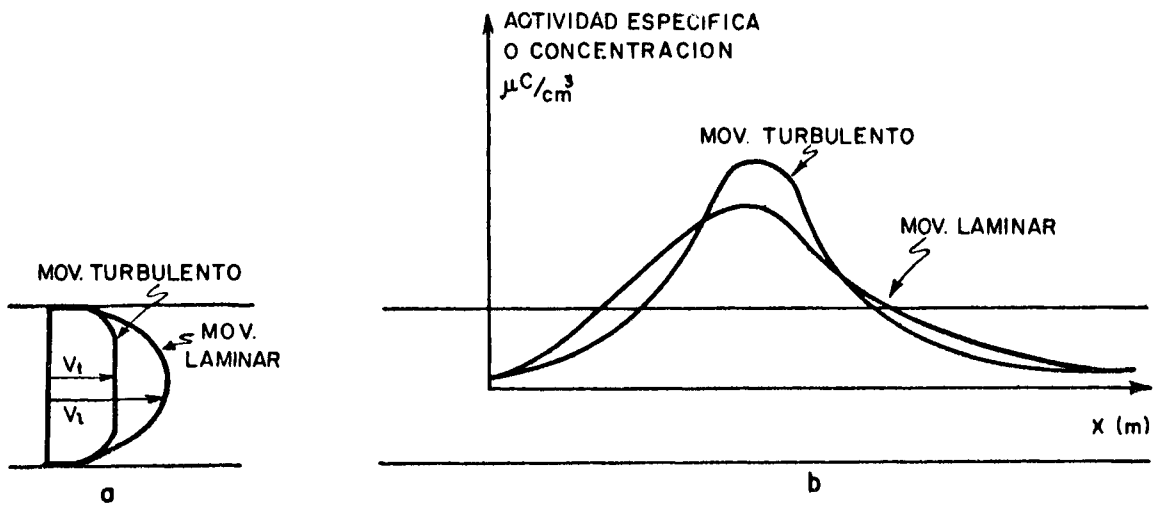
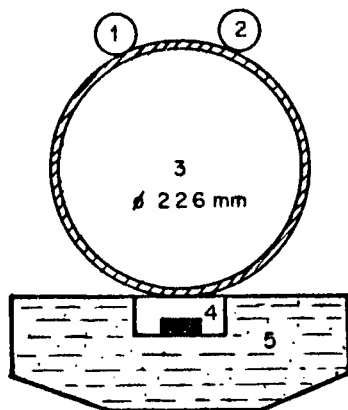


FIG. 27 -a) DIAGRAMA DE VELOCIDADES EN UNA CAÑERIA CON REGIMEN LAMINAR Y TURBULENTO.

b) CONCENTRACION DE TRAZADOR EN UNA SECCION CUALQUIERA, AGUAS ABAJO DEL PUNTO DE INYECCION. INYECCION DISCRETA ("INSTANTANEA.")



- 1) DETECTOR  $\gamma$  (CRISTAL  $\text{InO}$ )
- 2) DETECTOR DE NEUTRONES ( $\text{BF}_3$ )
- 3) SECCION DE LA TUBERIA
- 4) FUENTE DE  $\text{Po-Ba}$
- 5) CONTENEDOR DE PARAFINA

FIG 28 - ESQUEMA DE LA INSTALACION NECESARIA PARA MEDIR INTERFASES EN POLIDUCTOS CON TRAZ. ACTIVABLES...

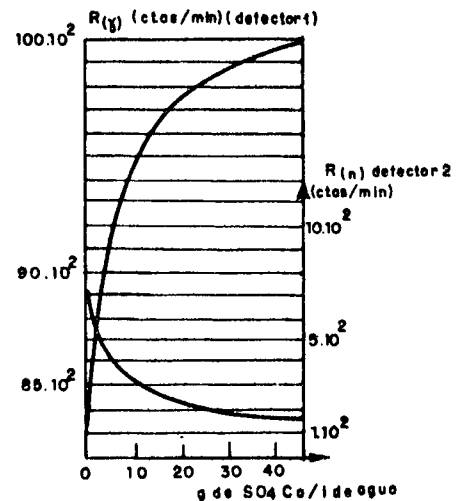
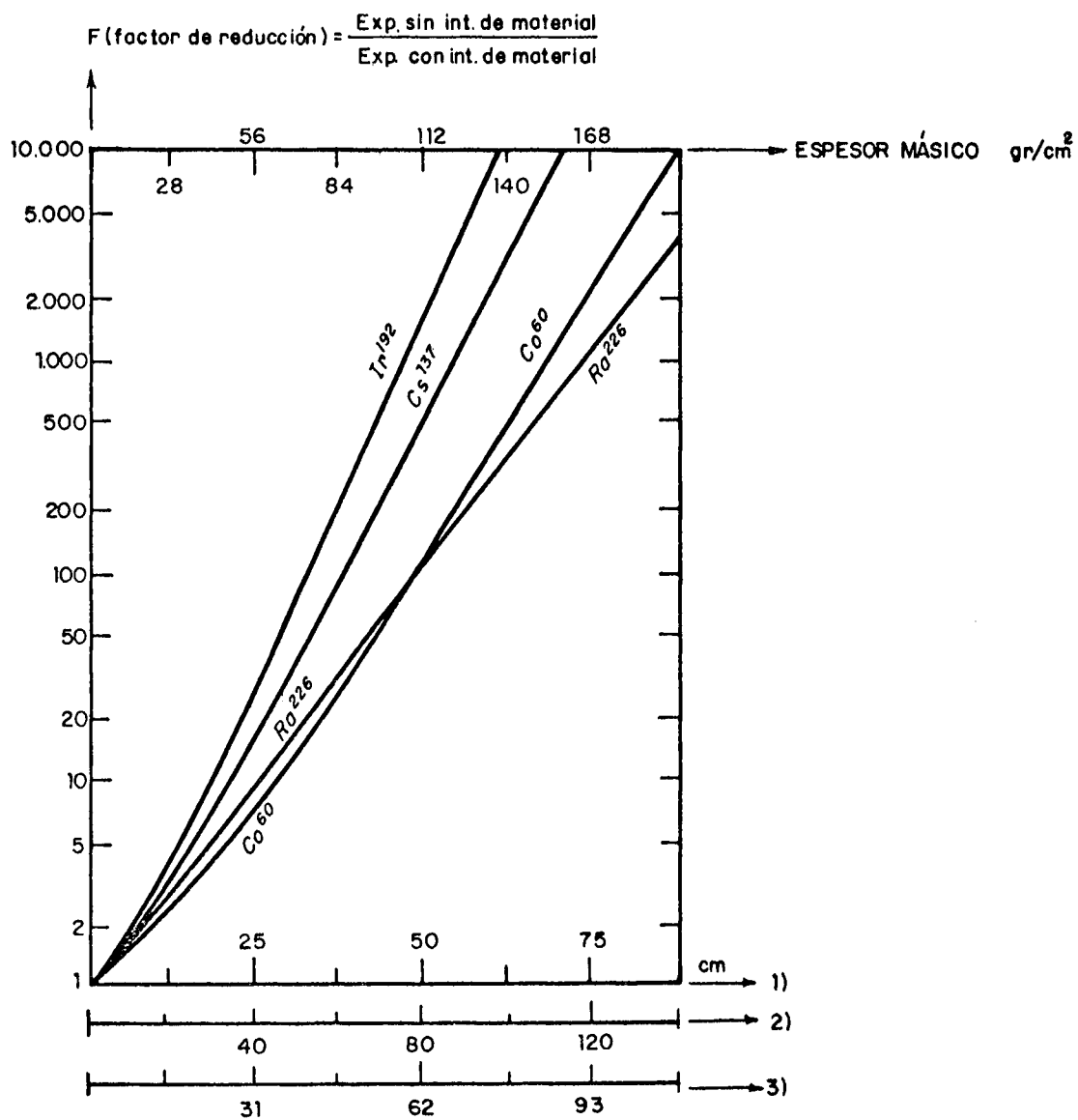


FIG- 29- ACTIVIDAD MEDIDA EN FUNCION DE LA CONCENTRACION DE CADMIO CAÑERIA DE 226 mm



- 1) ESPESOR DE HORMIGÓN :  $\delta \approx 2,2 \text{ gr/cm}^3$
- 2) ESPESOR DE TIERRA :  $\delta \approx 1,4 \text{ gr/cm}^3$
- 3) ESPESOR DE TIERRA :  $\delta \approx 1,8 \text{ gr/cm}^3$

Fig- 30: -FACTOR DE REDUCCION EN FUNCION DE ESPESOR MÁSIKO Y ESPESORES DE HORMIGÓN Y TIERRA DE DISTINTA COMPACTACIÓN.

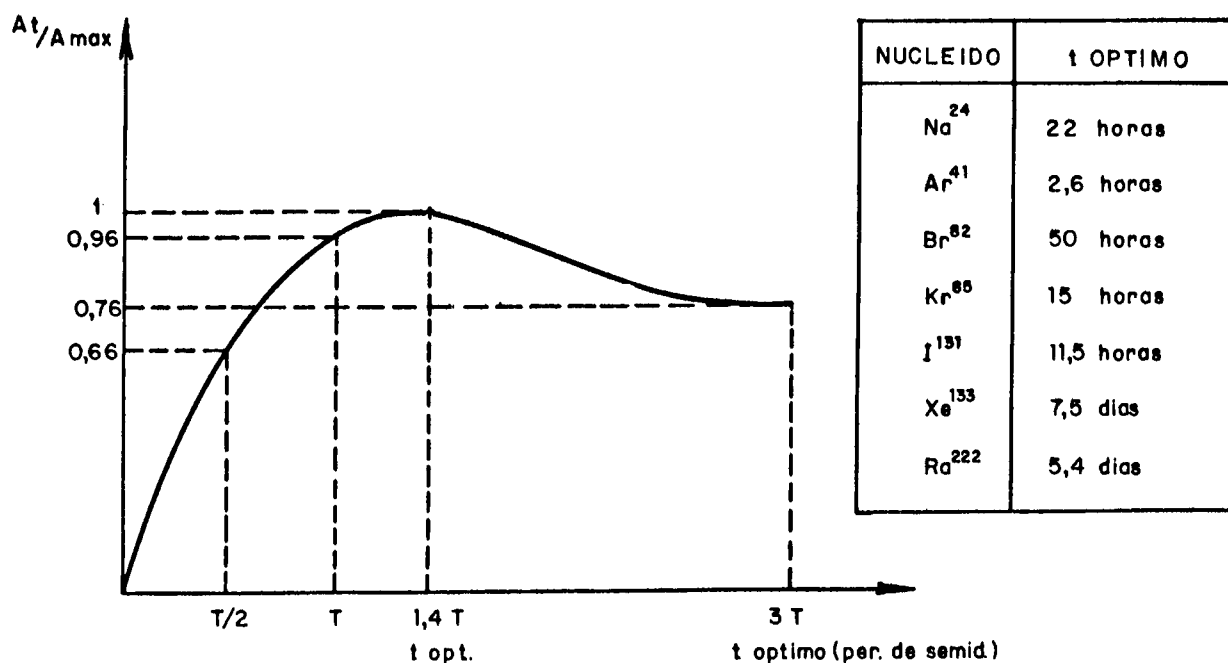


Fig- 31 -TIEMPO OPTIMO DE INYECCION

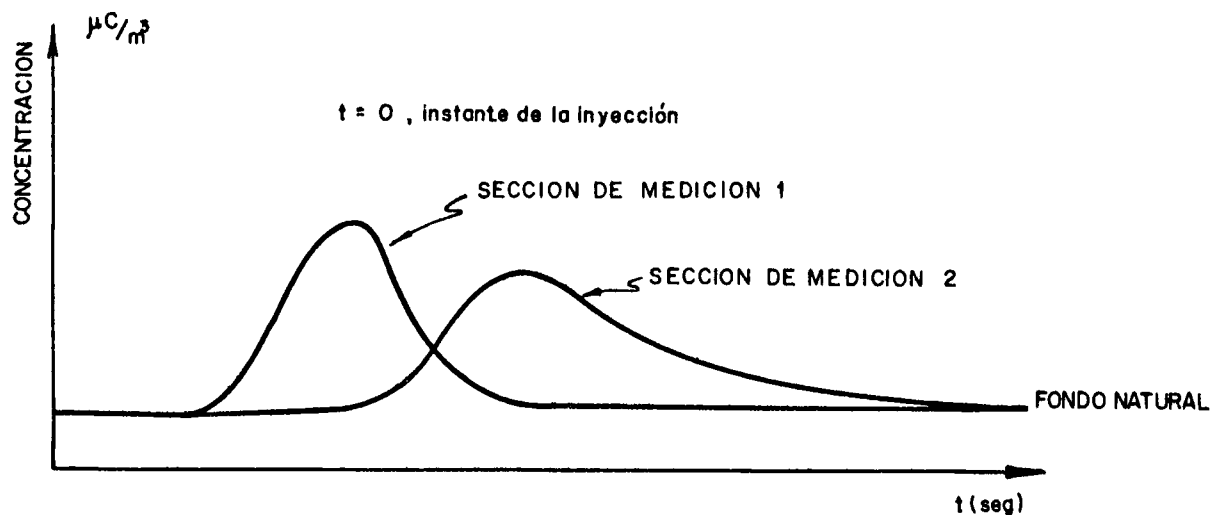


Fig- 32 - VARIACION DE LA CONCENTRACION EN FUNCION DEL TIEMPO Y DE LA DISTANCIA AL PUNTO DE INYECCION. LA SECCION 2 ESTA MAS ALEJADA DEL PUNTO DE INYECCION QUE LA SECCION 1. INYECCION "INSTANTANEA".

