



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**Radiotrazado con Tritio entre Pozos Petroleros  
con Sistemas de Recuperación Secundaria a  
Base de Inyección de Agua**

**T E S I S**

Que para obtener el Título de :

**INGENIERO QUÍMICO**

P r e s e n t a :

**Guillermo Falconi de la Fuente**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# TESIS

## CAPITULO

### INTRODUCCION.

- I A. CONCEPTOS BASICOS DE LA RADIOACTIVIDAD.
- B. EL DETECTOR DE CENTELLEO LIQUIDO Y SU APLICACION.
- C. ESTADISTICA DE SISTEMAS DE DETECCION.

II EL TRITIO.

III INFORMACION DEL YACIMIENTO EN ESTUDIOS DE RADIOTRAZADO.

IV RADIOTRAZADO DE UN MODELO DE CAMPO PETROLERO .

V INTERPRETACION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA.

# INDICE

Página :

## INTRODUCCION.

### CAPITULO I.

#### A. CONCEPTOS BASICOS DE LA RADIATIVIDAD.

1.0	La radiactividad y su descubrimiento.	1
1.1	Emisión de radiaciones.	3
1.2	Relación entre radiactividad y número de masa.	4
1.3	Decaimiento radiactivo y velocidad de desintegración.	6
1.4	Vida media.	9
1.5	Constante de decaimiento.	9
1.6	Actividad específica, el Curie y sus unidades.	10
1.7	Esquemas de decaimiento.	11
1.8	Esquema de decaimiento del tritio.	12

#### B. EL DETECTOR DE CENTELLEO LIQUIDO Y SU APLICACION.

1.9	Generalidades de detectores y su aplicación.	13
1.9.1	Voltaje de operación en un detector de centelleo.	15
1.9.2	Radiación de fondo.	16
1.10	El detector de centelleo líquido.	17
1.10.1	El tubo fotomultiplicador.	20
1.10.2	Equipo electrónico para el sistema de conteo de radiación.	22
1.10.3	Eficiencia de un detector de centelleo líquido.	27
1.10.4	Detección de partículas $\alpha$ , $\beta^-$ y rayos $\gamma$ .	28
1.11	Tipos de fósforo.	29
1.11.1	Líquido centellador Instagel.	30
1.12	Método de conteo del tritio en agua tritiada.	30
1.12.1	Ventajas y desventajas de los detectores de centelleo líquido.	32

## C. ESTADISTICA DE SISTEMAS DE DETECCION.

1.13	Estadística de conteo.	34
1.13.1	Precisión de medición de conteo.	35
1.13.2	Selección de tiempo de conteo.	36
1.13.3	Actividad óptima en función de la desviación estándar.	37

## CAPITULO II.

### EL TRITIO.

2.0	Generalidades.	39
2.1	Propiedades físicas.	40
2.2	Características principales radiactivas del tritio.	40
2.3	Cuadro de decaimiento del tritio.	42
2.4	Producción natural del tritio.	43
2.5	Producción artificial del tritio.	44
2.6	Unidad de tritio.	46
2.7	Peso de un Curie de tritio.	46
2.8	Actividad específica del tritio.	47
2.9	Seguridad radiológica del tritio.	48
2.9.1	Vida media efectiva, vida media biológica.	50
2.9.2	Gafas de protección contra la radiación (G.P.R.) para el tritio.	52
2.9.3	Concentración de tritio en los estudios de radiotrazado.	55

## CAPITULO III.

### INFORMACION DEL YACIMIENTO EN ESTUDIOS DE RADIODRAZADO.

3.0	Importancia de la geología de explotación.	57
3.1	Recuperación secundaria de hidrocarburos.	58
3.2	Tipos de modelos de campo petrolero.	60
3.3	Información requerida del yacimiento para la planeación de un estudio de radiotrazado.	63

## CAPITULO IV.

### RADIOTRAZADO DE UN MODELO DE CAMPO PETROLERO.

4.0	Radiotrazado entre pozos petroleros con agua tritiada.	65
4.1	Aspectos importantes en los programas de radiotrazado.	68
4.1.1	Patrón de inyección.	69
4.2	Equipo de inyección de agua y dispositivos.	70
4.2.1	Batería de inyección de agua.	70
4.2.2	Arbol de válvulas (pozos).	73
4.2.3	Dispositivos para inyección.	74
4.2.4	Dispositivos para recolección de muestras.	75
4.3	Elección del punto de inyección.	77
4.3.1	Elección de los pozos para recolección de muestras.	78
4.3.2	Volumen de las muestras.	79
4.4	Diagrama de etapas de un estudio de radiotrazado.	79
4.5	Análisis de las muestras.	
4.5.1	Laboratorio del campo petrolero.	81
4.5.2	Laboratorio de radioquímica.	81
4.5.3	Laboratorio de conteo de bajo nivel.	82

## CAPITULO V.

### INTERPRETACION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

5.0	Cálculos de un estudio de radiotrazado.	88
5.1	Datos del radiotrazador.	89
5.2	Dilución del trazador.	89
5.3	Actividad Mínima Detectable (A.M.D.).	90
5.4	Actividad del tritio en el punto de inyección.	91
5.5	Corrección por decaimiento.	94
5.6	Concentración del tritio en el fluido de inyección.	94
5.7	Inyección del trazador.	95
	CONCLUSIONES.	98

## INTRODUCCION

El empleo de radiotrazadores en estudios geofísicos, se inició aproximadamente en el año de 1939 en los Estados Unidos de América. Los primeros trabajos con materiales radiactivos, se planearon con el fin de estudiar la distribución del cemento en los pozos petroleros para evaluar la eficiencia de las operaciones de cementación.

A medida que se produjeron artificialmente nuevos materiales radiactivos, (radioisótopos), las aplicaciones en diferentes estudios aumentaron rápidamente hasta abarcar casi todas las operaciones de campo en la Industria Petrolera.

La tecnología nuclear se desarrolló en forma explosiva durante los primeros años de la década de los 50. En esta primera etapa existió una marcada tendencia a resolver todos los problemas que se presentaron mediante la aplicación de técnicas radioisotópicas.

La aplicación de los radioisótopos en Pétroleos Mexicanos, se inició aproximadamente en el año de 1950 y desde entonces se utilizan casi exclusivamente como herramientas de exploración geofísica del subsuelo y en dispositivos para inspección de ductos. Es viable obtener algunos beneficios aplicando técnicas nucleares en la solución de problemas en diferentes fases de la explotación petrolera, como por ejemplo :

Radiotrazado entre pozos petroleros con sistemas de recuperación secundaria a base de inyección de agua. El radiotrazado proporciona la información necesaria para simplificar la solución de problemas que se presentan durante la planeación y ejecución de los programas de recuperación secundaria por inyección de agua.

Si el fluido de inyección es agua, un gran número de trabajos de laboratorio y de campo, recomiendan al TRITIO como el trazador casi perfecto.

El tritio como trazador en sistemas de recuperación secundaria tiene la importancia de obtener información acerca del desplazamiento de fluidos desde los pozos inyectoros hasta los pozos productores, de manera que pueda deducir o calcular las características relativas o efectivas de permeabilidad, las barreras a la permeabilidad, la presencia de canalizaciones y la orientación de sistemas regionales de fracturas, el tiempo de tránsito entre el pozo inyector y productor, etc.

Los fluidos de inyección se marcan fácilmente con tritio y se detecta la concentración de este mismo radioisótopo en los fluidos de los pozos productores. El tritio se agrega en la forma química que le permite una mezcla homogénea con el agua de inyección, es decir como agua tritiada.

La información que se obtiene durante toda la experiencia consiste básicamente en una serie de gráficas de concentraciones del trazador con respecto al tiempo, a partir del momento en que se añade el trazador al fluido en los pozos inyectores.

Para contar el tritio en forma de agua tritiada, en los niveles de actividad que poseen las muestras recolectadas en los pozos productores, se aplica el Método de Detección de Centelleo Líquido.

Con esta Tesis se pretende, a través del estudio de radiotrazado, conjuntar las técnicas radioisotópicas que permitan dar información acerca del desplazamiento de fluidos a través de la formación del yacimiento petrolífero.

Las características que implica este estudio las puede abordar un Ingeniero Químico, en vista de los criterios que le confiere el conocimiento de la mecánica de los fluidos, que aunado a la aplicación de sistemas de seguridad y tecnología nuclear hacen de éste un profesional que puede fomentar el desarrollo de soluciones.



## CAPITULO I

### A. CONCEPTOS BASICOS DE LA RADIATIVIDAD.

#### 1.0 La radiactividad y su descubrimiento.

En 1896 Becquerel al llevar a cabo ciertos estudios sobre la luminiscencia de las sales de uranio excitadas por luz ordinaria, observó que las radiaciones luminiscentes eran capaces de reproducir las siluetas de ciertos objetos opacos colocados sobre una placa fotográfica, aún cuando ésta se encontrara adecuadamente protegida por papel negro.

El asombroso descubrimiento de Becquerel consistió de hecho en la observación de que la radiación emitida por el uranio subsistía aún en ausencia de la luz de excitación, demostrando además que la radiación se ponía de manifiesto para todos los compuestos del uranio, en relación directa con su contenido en dicho elemento, y que tal emisión espontánea de radiación, o radiactividad, era una propiedad del átomo de uranio en su estado normal.

Se sabe ahora que las radiaciones estudiadas por Becquerel eran electrones rápidos emitidos en la desintegración  $\beta^-$  de los productos hijos del núcleo  $^{238}\text{U}$ .

Las primeras experiencias de Curie y Rutherford demostraron que las radiaciones emitidas por las sustancias radiactivas contenían componentes de diferentes poderes penetrantes, como se ponía de manifiesto por su distinta absorción por la materia.

Los rayos menos penetrantes, que resultaban completamente absorbidos por algunos cm. de aire o por una lámina metálica delgada (con un espesor del orden de 0.1 mm.) fueron denominados RAYOS  $\alpha$ .

Los componentes más penetrantes, que resultaban absorbidos por un espesor de 1 mm. de plomo, se denominaron RAYOS  $\beta$ .

Estudiando su deflexión en un campo magnético, se demostró que ambas radiaciones eran de naturaleza corpuscular.

En 1900 Willard identificó un tercer tipo de radiación ionizante todavía más penetrante, capaz de atravesar espesores del orden de 10 cm. de plomo. Estos rayos no podían ser desviados por un campo magnético y fueron denominados como RAYOS  $\gamma$ . Actualmente se sabe que su naturaleza es electromagnética.

El análisis de las interacciones electromagnéticas (efecto fotoeléctrico, efecto Compton) hizo posible la determinación de la energía de los rayos  $\gamma$ , encontrándose valores comparables con los observados en el caso de la emisión  $\alpha$  y  $\beta$ .

Estructura del átomo.

Se considera al protón, neutrón y electrón como partículas básicas de las cuales toda materia está compuesta, es decir como integrantes de un átomo. El átomo se integra en dos partes:

el núcleo y los electrones externos.

El núcleo ocupa un volumen muy pequeño pero constituye más del 99.9% de la masa total del átomo. Los electrones externos que circundan al núcleo ocupan la mayor parte del volumen de átomo, pero constituyen menos del 0.1% de la masa total.

En el concepto del átomo, el núcleo es un conglomerado de neutrones y protones y aún cuando el término átomo significa indivisible, su núcleo fue dividido por Hahn, Strassmaun y Neitner en 1939, al bombardear con neutrones al metal uranio y producir la fisión nuclear.

El protón es una partícula con carga eléctrica positiva y tiene una masa de 1.007277 UMA (unidad de masa atómica, equivalente a 1/12 de la masa del  $^{12}\text{C}$ , o sea igual a  $1.66 \times 10^{-24}$  gramos) contenida en el núcleo atómico, cuyo número determina el número atómico (Z) y caracteriza a los diversos elementos químicos.

El neutrón es una partícula sin carga con una masa igual a 1.008665 UMA contenida en el núcleo atómico, cuyo número (N) sumado al número atómico determina el número de masa (A).

El electrón es una partícula de masa despreciable ( $1/1840$  avo. de aquella del protón, igual a  $0.000549$  UMA), con una carga eléctrica negativa y que gira en órbitas definidas en torno al núcleo atómico.

### 1.1 Emisión de radiaciones.

La materia es radiactiva, cuando los núcleos atómicos emiten partículas subnucleares, o radiación electromagnética, teniendo lugar un intercambio de energía al mismo tiempo.

Las radiaciones emitidas por el núcleo atómico son de cuatro especies principales :

-Partículas  $\alpha$  . Consisten en 2 neutrones asociados con protones, que pueden ser consideradas como núcleos de átomos de helio. Tienen una masa de 4 UMA y 2 cargas positivas, es una partícula relativamente lenta, pesada (7000 veces más que una partícula beta o un electrón) y altamente ionizante. Si un núcleo atómico es radiactivo y emite una partícula  $\alpha$  , pierde 2 unidades en carga y 4 unidades de masa. Este átomo se convierte en otro elemento, con número atómico menor y número de masa menor. Esto significa que los electrones radiactivos que decaen por la emisión de partículas  $\alpha$  pasan a ocupar un sitio dos lugares a la izquierda de su colocación original en la tabla periódica.

-Partículas  $\beta$  . Son productos del decaimiento radiactivo de algunos isótopos con la naturaleza de un electrón de alta velocidad. Son de masa despreciable (su masa es la del electrón) y presenta carga negativa ( $\beta^-$  o negatrón) y positiva ( $\beta^+$  o positrón) .

La partícula  $\beta^-$  o negatrón es un electrón emitido por el núcleo, el cual aumenta una unidad su carga positiva, al transformar un neutrón en protón. Por tanto, el número atómico aumenta una unidad, el átomo se convierte en el elemento situado un lugar a la derecha en la tabla periódica y su número de masa permanece sensiblemente el mismo.

La partícula  $\beta^+$  o positrón, es emitida cuando un protón se transforma en neutrón y una partícula de la misma masa que el

electrón pero con carga positiva es emitida por el núcleo; el número atómico decrece una unidad y el elemento se corre un lugar a la izquierda en la tabla periódica.

-Rayos  $\gamma$ . Son radiaciones electromagnéticas, similares a los rayos X, la luz u ondas de radio, pero con mucho menor longitud de onda y en consecuencia mucho mayor energía; no tienen carga eléctrica, esto significa que no son influenciados por campos eléctricos y por lo tanto viajan en líneas rectas. Cada isótopo productor de gamma emite rayos de uno o más energías específicas.

-Neutrones. Son partículas sin carga, teniendo una masa de aproximadamente 1 UMA. Por tanto, los núcleos perdiendo neutrones no cambian su número atómico pero su número de masa disminuye una unidad por cada neutrón emitido. Estos pueden llegar a penetrar fácilmente y también son absorbidos eficientemente por algunos de los elementos más livianos, particularmente hidrógeno.

## 1.2 Relación entre radiactividad y número de masa.

La radiactividad que existe en la naturaleza es producida principalmente por elementos muy pesados, con gran número de protones y neutrones que representan un gran número de masa.

Si se traza una gráfica de N contra Z (ver FIG. 1) para los 274 núclidos estables encontrados en la naturaleza, se obtiene una curva que principia por tener una pendiente de 60 grados, (cuando  $N=Z$  en los elementos ligeros), la cual aumenta después (cuando  $N > Z$  en los elementos pesados).

De este modo, la relación  $N/Z$  empieza por ser igual o casi igual a uno, para los elementos ligeros, y llega a ser mayor que uno para elementos pesados.

Los núclidos inestables o radiactivos se sitúan a ambos lados de esta curva; cuando su relación natural  $N/Z$  se rompe, y se tiene un exceso de neutrones o protones.

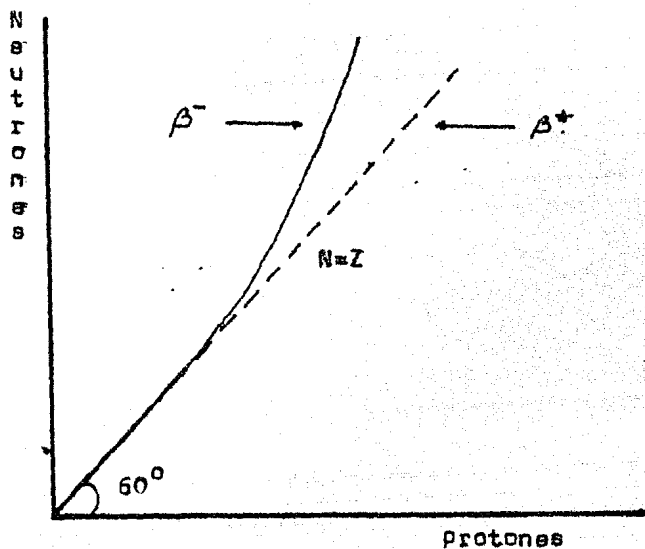


FIG. 1

En el primer caso los núcleos emiten una partícula  $\beta^-$  que se transforma un neutrón en protón, y por lo tanto el valor natural de la relación  $N/Z$  tiende a ser restablecido.

Cuando hay un exceso de protones, en términos generales, una partícula  $\beta^+$  es emitida o un electrón orbital capturado y un protón se transforma en neutrón, tendiéndose de nuevo al valor natural  $N/Z$ .

### 1.3 Decaimiento radiactivo y velocidad de desintegración.

Cuando un núcleo atómico emite una partícula alfa, beta, rayo gamma, o cualquier otra partícula, o captura un electrón de las capas electrónicas aledañas al núcleo, se dice que se tiene un proceso de decaimiento radiactivo.

Cada núcleo radiactivo de un radioisótopo particular tiene la misma probabilidad de desintegración en la unidad de tiempo.

Esta probabilidad de desintegración por unidad de tiempo es una constante de decaimiento, que se designa por el símbolo  $\lambda$ , característica para cada especie radiactiva.

Si a un tiempo dado  $t_0$  existen  $N$  átomos radiactivos, y  $dN$  de estos átomos decaen en un tiempo  $dt$ , tenemos que:

$$dN = - \lambda N dt$$

el signo negativo significa que se trata de una desintegración, de una "desaparición" con el tiempo.

Siendo ésta la ecuación fundamental de decaimiento radiactivo.

$$dN/dt = - \lambda N$$

donde  $dN/dt$  es el número de núcleos radiactivos que decaen en la unidad de tiempo emitiendo radiaciones, es decir la rapidez o velocidad de desintegración, o decaimiento llamada también Actividad o radiactividad, en términos de medición de este fenómeno.

por lo tanto,  $dN/N = - \lambda dt$

integrando  $\ln N = - \lambda t + K$

a un  $t=0$ ,  $N=N_0$  y  $\ln N_0 = K$

por lo tanto,  $\ln N = - \lambda t + \ln N_0$

Siendo  $N$  y  $t$  variables,  $N_0$  y  $\lambda$  constantes, esta es la ecuación de una línea recta cuya pendiente es  $-\lambda$ .

Cambiando términos,  $\ln N/N_0 = -\lambda t$

$$N/N_0 = e^{-\lambda t}$$

por lo tanto  $N = N_0 e^{-\lambda t}$

esta ecuación es una expresión matemática de la Ley del Decaimiento Radiactivo.

En la práctica, el concepto de actividad es mucho más útil que el de núcleos desintegrados.

En efecto, es la actividad lo que se mide por medio de los contadores. La actividad se define clásicamente como la disminución del número de núcleos por unidad de tiempo, es decir:

$$A = -dN/dt = \lambda N$$

$$A_0 = dN_0/dt = -\lambda N_0$$

por lo tanto,  $A/A_0 = N/N_0 = e^{-\lambda t}$

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

donde  $A_0$  es la actividad inicial.

Trazando una gráfica de los valores  $t$  contra aquellos de  $A$ , será obtenida la curva de decaimiento característica de cada núclido (FIG. 2).

Como  $A$  es una función exponencial de  $t$ , tenemos:

$$\ln A = -\lambda t + \ln A_0$$

de modo que si es trazado una gráfica de  $t$  contra  $A$  en papel semilogarítmico, será obtenida una línea recta característica del núclido con pendiente  $-\lambda$  (FIG. 3).

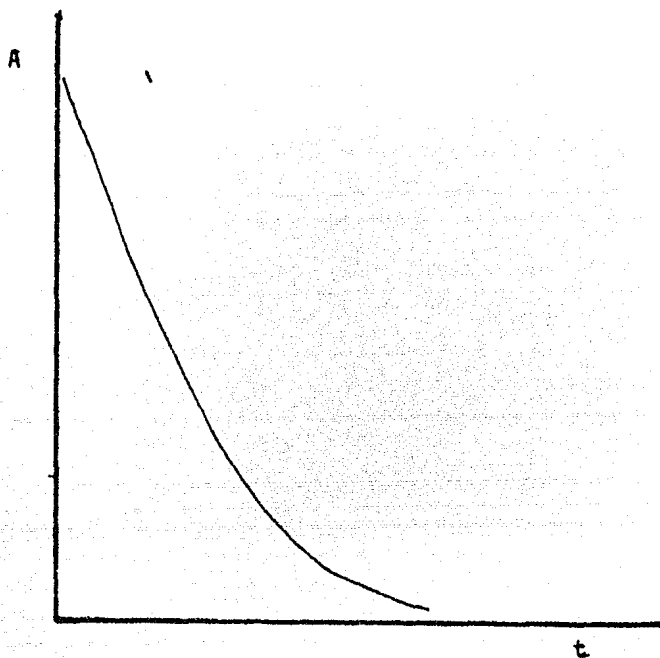


FIG. 2 Curva de Decaimiento

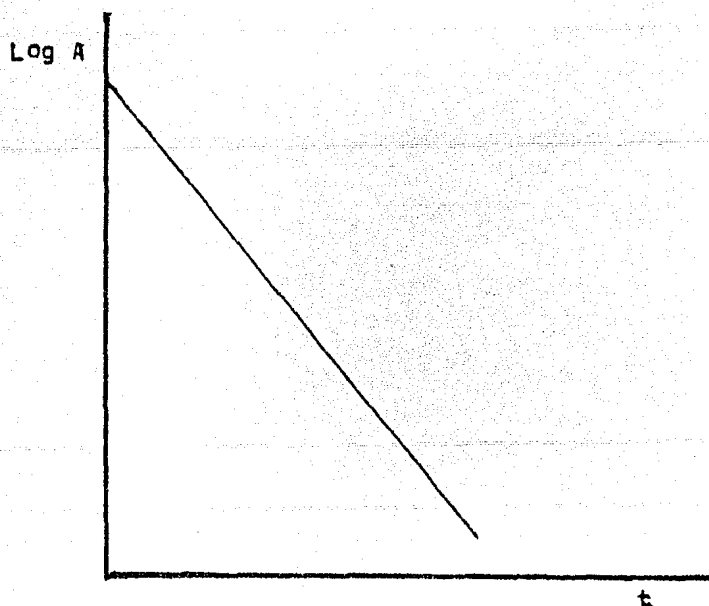


FIG. 3 Línea de Decaimiento.  
(papel semilogarítmico)



#### 1.4 Vida media.

La vida media se define como el intervalo de tiempo en el cual la actividad decrece a la mitad de la inicial, se denota  $t_{1/2}$ .

Como la actividad es proporcional al número de átomos presentes en la muestra que no han decaído, entonces  $t_{1/2}$  es igual al intervalo de tiempo en el cual el número de átomos no decaídos decrece a la mitad.

Substituyendo  $N = N_0/2$ ,  $t = t_{1/2}$ , en la siguiente ecuación:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

donde  $N(t)$  es el número de átomos radiactivos presentes al tiempo  $t$ :

$$N_0/2 = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$N_0/N_0 = 2 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

por lo tanto  $t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$

$$t_{1/2} = 0.693/\lambda$$

#### 1.5 Constante de decaimiento.

La relación entre la constante de decaimiento y la vida media está dada por:

$$\lambda = 0.693/t_{1/2}$$

la vida media se expresa en la unidad de tiempo que resulte más conveniente para cada elemento; segundos, minutos, horas o años.

### 1.6 Actividad específica, el Curie y sus unidades.

La actividad específica de una fuente radiactiva, está definida como la actividad por unidad de masa de un radioisótopo.

Si la muestra está libre de portador o acarreador, esto es, no está mezclada con otras especies nucleares, su actividad específica puede ser calculada como :

$$\text{Actividad Específica} = \frac{\text{Actividad}}{\text{masa}} = \frac{\lambda N}{NM/N_0} = \frac{\lambda N_0}{M}$$

donde :  $M$  = peso molecular del radioisótopo.

$N_0$  = número de Avogadro.

$\lambda$  = constante de decaimiento.

El Curie, es una unidad de radiactividad, que se define como cualquier cantidad de material radiactivo que sufre  $3.7 \times 10^{10}$  desintegraciones por segundo (dps) ó  $2.22 \times 10^{12}$  desintegraciones por minuto (dpm), las cuales equivalen aproximadamente a la razón de decaimiento de un gramo de Radio ( $^{226}_{88}\text{Ra}$ ).

Es decir,  $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps}$

$1 \text{ Ci} = 2.22 \times 10^{12} \text{ dpm}$

Los submúltiplos utilizados son el milicurie (mCi) y el microcurie ( $\mu\text{Ci}$ ) y son :

$1 \text{ mCi} = 1.0 \times 10^{-3} \text{ Ci}$

$1 \mu\text{Ci} = 1.0 \times 10^{-6} \text{ Ci}$

Existe otra unidad que ha sido creada para medir la radiactividad, el Becquerel, que se abrevia Bq. y se define como la cantidad de cualquier material radiactivo que sufre una desintegración por segundo; en consecuencia,

$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps}$

$1 \text{ Bq} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$

$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$

Volviendo con la actividad específica, sus unidades son :

$$\text{Act. Esp.} = \lambda N_0 / M$$

donde :  $N_0 = 6.023 \times 10^{23}$

$$\lambda = 0.693/t_{1/2}$$

por lo tanto, la actividad específica será :

$$\begin{aligned} \text{Act. Esp.} &= \frac{0.693 N_0}{t_{1/2} M} \\ &= \frac{0.693 \times 6.023 \times 10^{23}}{t_{1/2} M} \times \frac{\text{Ci}}{3.7 \times 10^{10} \text{ dps}} \\ &= 1.13 \times 10^{13} / t_{1/2} \times M \quad (\text{Ci/g}) \end{aligned}$$

Este valor está dado para una  $t_{1/2}$  en segundos. La actividad específica está expresada en Curies por gramo, también se emplea el término  $\mu\text{Ci/ml}$ .

### 1.7 Esquemas de decaimiento.

A fin de representar las pérdidas de energía y los cambios de número atómico que resultan del decaimiento radiactivo, han sido creados los esquemas o diagramas llamados de desintegración o decaimiento.

En estos diagramas los diferentes pasos o niveles de energía son representados por rayas horizontales.

La caída de un nivel a otro por decaimiento radiactivo es indicada como sigue:

a) Caidas verticales que representan el decaimiento por medio de radiación  $\gamma$ , cuando tiene lugar la transición isomérica.

b) Movimientos a la derecha representan un avance en cargas positivas, cambiando a un elemento de mayor número atómico por emisión de partículas  $\beta^-$ .

c) Movimientos a la izquierda indican una pérdida de carga positiva, cambiando a un elemento de menor número atómico por emisión de partículas  $\alpha$  o  $\beta^+$ , o bien captura electrónica con emisión de rayos X.

La unidad más conveniente para medir la energía de las radiaciones nucleares es el Megaelectrovoltio (MeV), que es equivalente a  $1.6 \times 10^{-6}$  ergios, a  $3.88 \times 10^{-14}$  calorías y a  $1.07 \times 10^{-3}$  UMA.

El MeV se define como un millón de veces la energía adquirida por un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de un voltio.

### 1.8 Esquema de decaimiento del tritio.

En la FIG. 4 se observa que el núcleo de tritio original aumenta su número atómico en una unidad por expulsión de una partícula Beta, pero su número de masa permanece constante en tanto que el número de neutrones también disminuye en una unidad, transformándose de esta forma en un núcleo de helio con número de masa tres. La energía de decaimiento de la partícula Beta es de 0.0181 MeV.

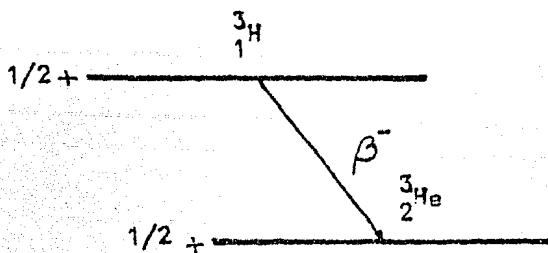


FIG. 4

## 8. EL DETECTOR DE CENTELLEO LIQUIDO Y SU APLICACION.

### 1.9 Generalidades de detectores y su aplicación.

El desarrollo del estudio de los radioisótopos ha sido posible con el desarrollo paralelo de la electrónica, la cual ha ido produciendo cada vez mejores instrumentos para detectar la radiactividad.

Estos instrumentos proporcionan con variada eficiencia datos acerca del número de núcleos que decaen por unidad de tiempo en una muestra radiactiva y de la energía de las radiaciones absorbidas por el detector.

Para ello es necesario que el tipo de detector sea escogido de acuerdo a las características de la radiación y su uso se realice en forma apropiada.

Los diferentes detectores de radiactividad están basados en los 3 principios siguientes :

- a. Recolección de iones producidos cuando las radiaciones atraviesan un gas.
- b. Comportamiento de materiales semiconductores de corriente al ser atravesados por radiaciones.
- c. Transformación en pulsos de electricidad de la fosforescencia producida cuando las radiaciones son absorbidas por materiales especiales.

El conocimiento de las técnicas adecuadas para detectar las radiaciones y obtener una buena medida de su número de cuentas por unidad de tiempo y de su energía, constituye un punto principal en el estudio de diferentes tipos de detectores.

Se conocen los siguientes tipos de detectores:

- a. Cámaras de Ionización.

Los detectores que operan en la región donde el voltaje resulta

insuficiente para causar amplificación gaseosa son conocidos como cámaras de ionización, generalmente se utilizan para detectar partículas que producen una gran ionización específica tales como las partículas  $\alpha$ .

#### b. Detectores Proporcionales.

En los detectores proporcionales, el sistema de discos paralelos de las cámaras de ionización para realizar las funciones de electrodos es reemplazado por un cilindro, cuya pared actúa como cátodo, y un alambre central delgado o una pequeña esfera en el centro del mismo funciona como ánodo. Los detectores proporcionales son comúnmente operados a presión atmosférica usando una cámara a través de la cual fluye el gas ionizable compuesto por una mezcla de 90% de Argón y 10% de Metano (llamado gas P).

Sirven para detectar partículas  $\alpha$ ,  $\beta^-$  y rayos X.

#### c. Detectores Geiger-Müller.

La naturaleza de los pulsos producidos por un detector Geiger es similar a la de aquellos obtenidos en un detector proporcional, pero de una mayor amplitud, como resultado de que las avalanchas iónicas originadas por la radiación y el voltaje aplicados son mucho más grandes.

De la misma manera, los electrodos en los detectores Geiger-Müller están formados por la pared de un cilindro que contiene un alambre a lo largo de su eje central, el cual actúa como ánodo. Se conocen detectores de ventana y sin ventana, sobre todo para la detección de partículas  $\alpha$  y  $\beta^-$  de baja energía, aún cuando el gran tamaño uniforme de los pulsos producidos no permita realizar análisis de energía de la radiación como en el caso de los detectores proporcionales.

#### d. Detectores Semiconductores.

Una variedad cada vez más usada de detectores de radiación, hace uso de materiales sólidos que presentan una muy pobre conductividad eléctrica, siendo llamados detectores semiconductores, o con una denominación un tanto impropia detectores de estado sólido.

Actualmente los más usados son los de Ge-Li , Si-Li y Ge hiperpuro debido a su óptimo funcionamiento, aún cuando requieran un dispositivo que los mantenga a las bajas temperaturas necesarias a la conservación de su propiedad semiconductoras.

#### e. Detectores de Centelleo.

Los detectores de centelleo difieren en su principio de los contadores basados en la recolección de iones.

Los detectores de centelleo permiten efectuar mediciones de la energía de la radiación, porque la intensidad del destello luminoso que producen es directamente proporcional a la energía de la radiación, es decir la medida de la altura del pulso es una medida de la energía de la radiación .

Se conocen tres tipos de detectores de centelleo :

- Detector de centelleo de gas,
- Detector de centelleo sólido, y
- Detector de centelleo líquido .

Solo nos interesa únicamente el detector de centelleo líquido, ya que la detección radiactiva por centelleo líquido presenta indiscutibles ventajas cuando se trata de partículas  $\beta^-$  de baja energía, tal como las emitidas por el tritio en forma de agua tritiada obtenida en los pozos productores con sistemas de recuperación secundaria.

#### 1.9.1 Voltaje de operación en un detector de centelleo.

El criterio general para determinar el voltaje de operación, es escoger aquel voltaje para el cual la diferencia entre las cuentas debidas a la actividad de la muestra y a la radiación de fondo sea mayor.

En detectores de centelleo, es necesario trazar una gráfica de los correspondientes valores de voltaje, contra el cuadrado de la diferencia de las lecturas para la muestra radiactiva y el fondo dividido entre el fondo.

El máximo de la curva obtenida indicará el óptimo voltaje de operación (FIG. 5)

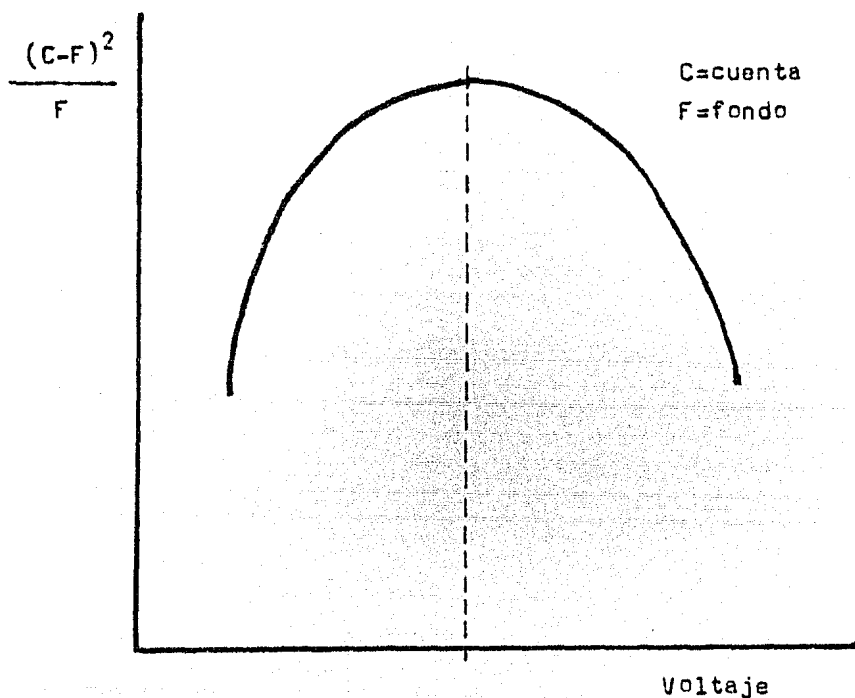


FIG. 5

### 1.9.2 Radiación de fondo.

Cuando un detector es conectado y se aplica su voltaje de operación, empieza a registrar un número dado de cuentas por unidad de tiempo, aunque no tenga muestra radiactiva en posición de ser detectada. Estas cuentas provienen de la radiactividad que hay de manera natural en nuestro medio ambiente.

La radiación de fondo puede ser de la fuente natural o artificial producidos por fuentes radiactivas:

#### a. Fuentes naturales:

- Rayos cósmicos.
- Radiactividad natural circundante.
- Productos químicos como Radio, Uranio.



#### b. Radiactividad artificial:

- Muestras radiactivas almacenadas en un cuarto cercano.
- Contaminación del equipo de conteo.

La radiación de fondo puede producir un error en mediciones de radiactividad a menos que el conteo de fondo sea determinado y restado de la actividad total.

La diferencia entre la actividad total y el fondo es la actividad neta de la muestra.

#### 1.10 El detector de centelleo líquido.

Los centelleos producidos en materiales fluorescentes por radiación forma la base de uno de los métodos antiguos de la detección de radiación.

Rutherford hizo el uso de este fenómeno cuando observó los destellos individuales y pequeños de luz visible que manifestaban las partículas alfa en una pantalla fluorescente. Este método de detección de radiación hizo la aparición del tubo fotomultiplicador en 1947. Este instrumento recolecta y transforma los destellos de luz en pulsos eléctricos.

Para la detección de baja energía y partículas beta de baja energía tal como el tritio, se usa el llamado "Contador de bajo Nivel de Centelleo Líquido". La emisión de fotones forma la base de esta detección.

Cuando se usa el detector de centelleo líquido, la actividad de la muestra es indicada por las cuentas observadas en el registrador, y depende de un número de variables que incluyen los siguientes factores:

- Número de centelleo que ocurren en el fósforo;
- Fuente de intensidad (incluyendo el fondo) .
- Geometría (incluyendo tamaño de fósforo).

-Distribución de intensidades de centelleos:

Tipos de fuente.

Cristal o tamaño de fósforo.

Eficiencia.

-Fotomultiplicador y sistema óptico:

Eficiencia de transmisión de la luz del cátodo del fotomultiplicador.

Amplificación por el fotomultiplicador:

a) tipo del tubo (eficiencia de la conversión de luz a energía eléctrica en el cátodo).

b) voltaje aplicado (que controla la amplificación de la energía eléctrica dentro del tubo fotomultiplicador).

-Circuitos electrónicos asociados:

Preamplificador entre el tubo fotomultiplicador y el escalador electrónico.

Discriminador.

Circuitos de coincidencia y anticoincidencia.

En el centelleo líquido, podemos considerar al proceso general como una cadena de eventos en donde la radiación excita las moléculas del solvente, en el cual transfiere la energía de excitación a las moléculas del fósforo, emitiéndose entonces el centelleo de luz azul hacia el tubo o tubos fotomultiplicadores.

En la FIG. 6 se muestra un módulo detector de centelleo líquido.

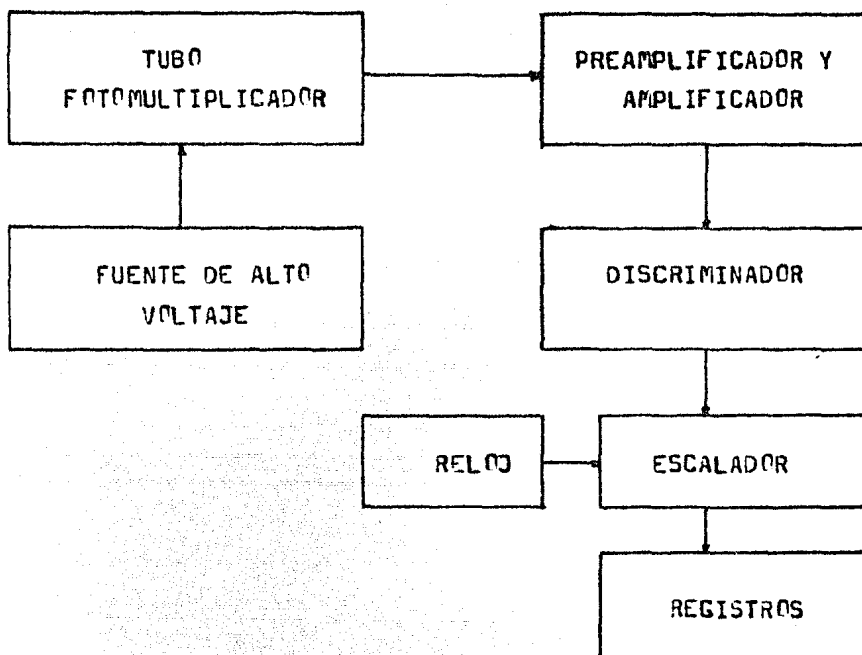


FIG. 6 Módulo Detector de Centelleo Líquido.

### 1.10.1 El tubo fotomultiplicador.

La tarea de este elemento de un detector de centelleo líquido consiste en transformar la luz originada por el fósforo en una señal electrónica.

El tubo fotomultiplicador, es muy común para muchos sistemas de detección de centelleo, debe ejecutar la función de la transformación de los fotones de luz emitida por el líquido centellador en un pulso amplificado de corriente electrónica.

El mecanismo interno del tubo fotomultiplicador trabaja cuando un fotón incidente interactúa con el material del fotocátodo y produce un elemento llamado fotoelectrón.

Un voltaje positivo es aplicado en el primer dínodo de una serie de dínodos con respecto al fotocátodo y arrastra a este fotoelectrón al dicho dínodo, este fotoelectrón es acelerado suficientemente para causar una multiplicación de electrones.

Algunos electrones son emitidos en la interacción por el fotoelectrón con el primer dínodo, estos son arrastrados al segundo dínodo, el cual es mantenido a un potencial más positivo que el primer dínodo.

La multiplicación de electrones continua de esta manera en cada dínodo hasta que todos los electrones son producidos y recolectados en el ánodo, que se localiza en la parte baja del tubo fotomultiplicador.

En la FIG. 7 muestra las partes de un tubo fotomultiplicador. El material más usado en el fotocátodo es una mezcla de Antimonio-Cesio, y tiene una gran eficiencia de transformación de fotones incidentes en fotoelectrones.

Los materiales usados en cada dínodo son también de Antimonio-Cesio, o de Plata-Magnesio.

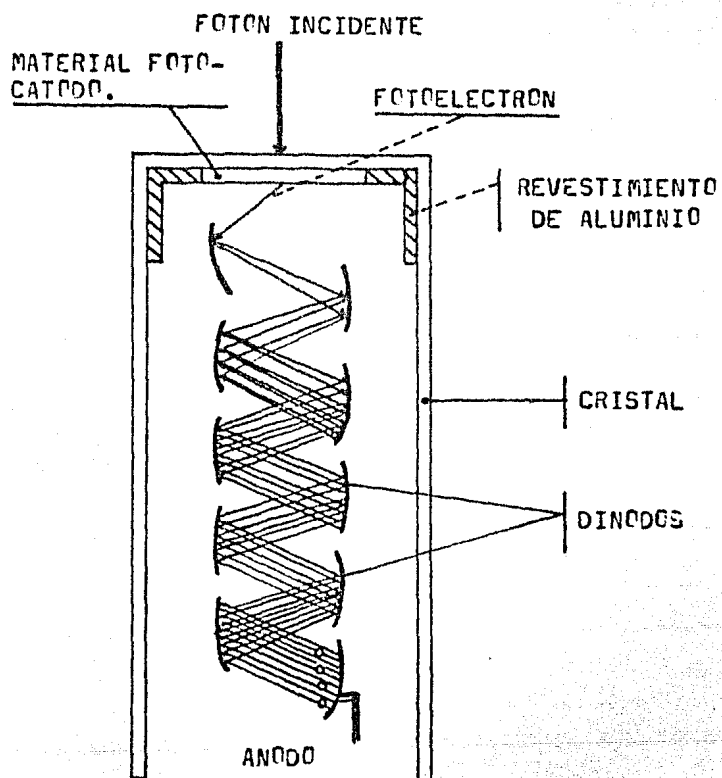


FIG. 7

Diagrama de un Tubo Fotomultiplicador.

### 1.10.2 Equipo electrónico para el sistema de conteo de radiación.

Cada tipo de detector requiere una fuente de voltaje apropiado y un preamplificador apropiado que son características de un balance de equipo electrónico.

La sola información disponible es el número de cuentas del detector durante un intervalo de tiempo.

Las partes fundamentales de un equipo electrónico que se requieren son:

- Una fuente de alto voltaje.

La fuente primaria de potencia es cualquier de las dos formas: una batería o un suministro principal. El voltaje del detector es requerido un rango de unos cuantos cientos a unos cuantos miles de voltios, y una buena estabilidad que generalmente es necesario para mantener el voltaje apropiado.

- Un amplificador.

La señal primaria es frecuentemente un pulso eléctrico o corriente eléctrica.

- Una unidad de distribución de tiempo.

Que determina los intervalos de tiempo de registro.

- Un discriminador.

El discriminador es usado en conteo de pulso para eliminar los pulsos provenientes de ruidos electrónicos o radiación indeseable, generalmente los pulsos en el cual provienen de ruidos electrónicos son pequeños que aquellos provienen de las interacciones de radiación en el detector.

Para ilustrar el orden de magnitud que relaciona las interacciones entre los pulsos provenientes de las interacciones de radiación y aquellos provenientes de una fuente de señal de ruido, es decir, la emisión térmica de fotoelectrones en el fotocátodo del tubo fotomultiplicador.

Para el caso del tritio:

El promedio de la energía de las partículas beta, es aproximadamente 5000 eV.

La conversión de eficiencia desde la energía de radiación a la energía del fotón-luz es dada de 2% (energía emitida como fotón-luz dividido por la cantidad total de radiación de energía que es absorbido en una solución centelladora).

Por consiguiente los 5000 eV de las partículas beta, nos da  $0.02 \times 5000 \text{ eV} = 100 \text{ eV}$  de luz-energía total.

La energía promedio de cada fotón-luz es aproximadamente 3 eV/fotón; por consiguiente dividiendo la luz-energía total por este valor nos da 40 fotones de luz que son producidos.

Suponiendo que la eficiencia de la colección-luz es de 50% , podemos encontrar que  $0.5 \times 40$  fotones, o 20 fotones, chocan en el fotocátodo.

Una eficiencia típica del fotocátodo es de 10%, entonces multiplicando por 20 fotones, o 2 fotoelectrones son producidos en el fotocátodo por el promedio de partículas beta del tritio.

Puesto que la emisión térmica de fotoelectrones en el fotocátodo es alrededor de 5000 por segundo por centímetro cuadrado en un local, la necesidad de un discriminador es evidente, porque la emisión térmica es alta y es completamente probable que los dos fotoelectrones sean expulsados en un mismo tiempo.

#### - Una unidad anti-coincidencia.

Esta unidad electrónica ejecuta pulsos que llegan "en coincidencia", es decir que ambos pulsos llegan dentro de un intervalo de tiempo corto de un microsegundo.

Se usa para determinar la altura de un pulso y análisis de radiación cósmica, la FIG. 8 muestra el esquema de una unidad anti-coincidencia.

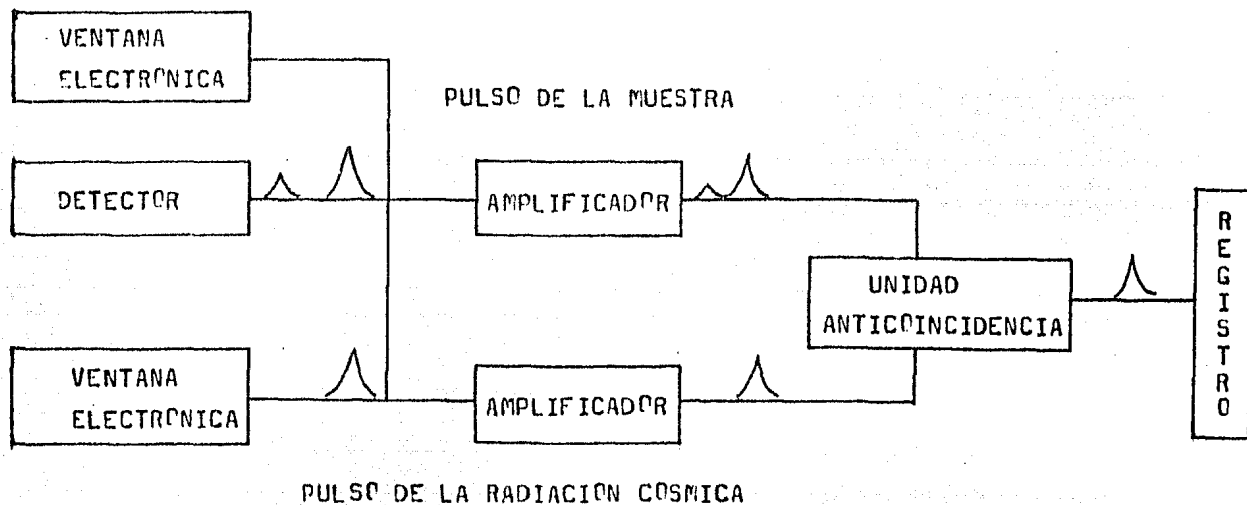


FIG. 8 Unidad Anticoincidencia .



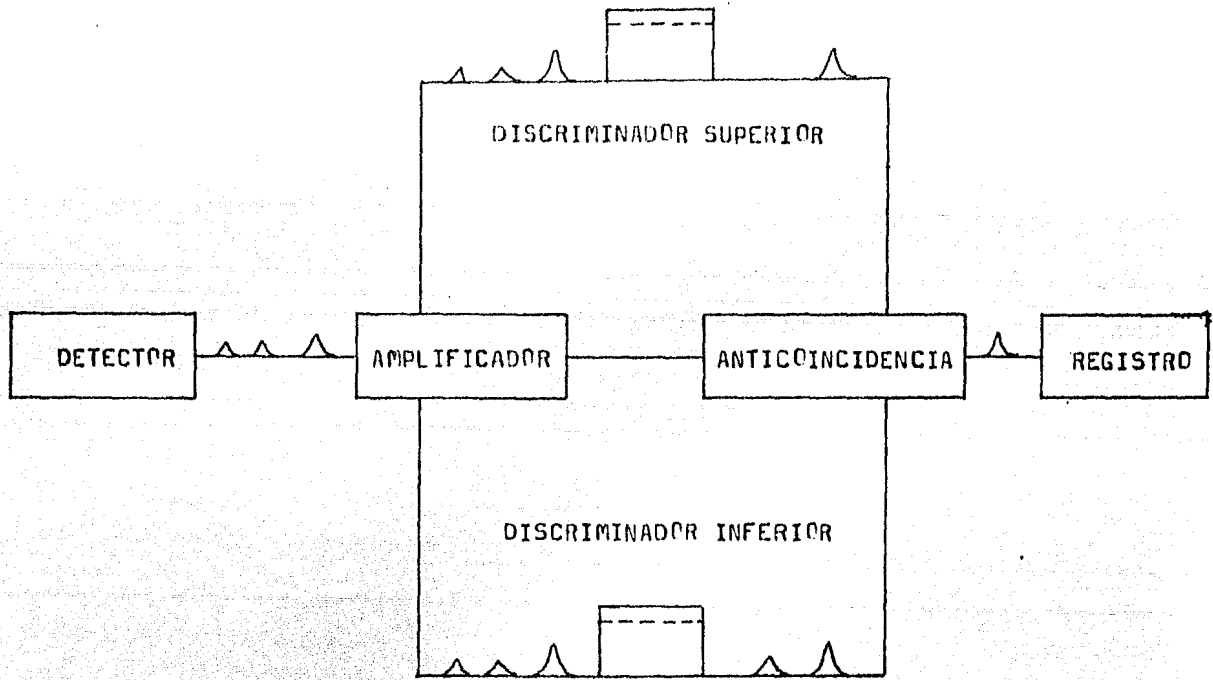


FIG. 9 Analizador de Altura de Pulsos.

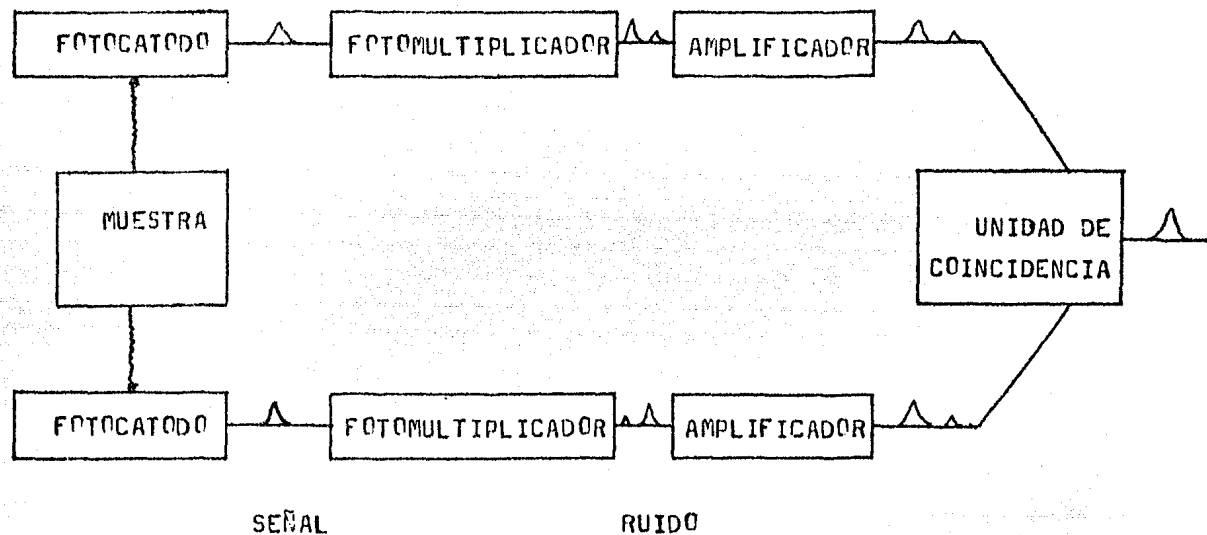


FIG. 10 Unidad de Coincidencia.

- Un analizador de altura de pulso.

Esto consiste esencialmente de dos discriminadores variables (uno inferior y uno superior) que acoplan junto con la unidad anticoincidencia. Con este equipo auxiliar, solamente los pulsos de altura son registrados en un intervalo de tiempo, el esquema analizador de altura de pulso se muestra en la FIG. 9 .

- Una unidad de coincidencia.

Esta unidad ejecuta todos los pulsos sencillo en un solo pulso durante un tiempo de un microsegundo. Generalmente se usa en conjunto con dos detectores en orden prácticamente para eliminar ruidos de pulsos del fotomultiplicador, los ruidos térmicos de los tubos fotomultiplicadores se pueden disminuirse por reducción de la operación de temperatura de los tubos. La FIG. 10 muestra esta unidad .

- Una unidad de registro.

Generalmente es un escalador electrónico.

### 1.10.3 Eficiencia de un detector de centelleo líquido.

Existen 3 razones fundamentales para conocer la eficiencia de un detector de centelleo líquido, y las variables que la afectan:

1) se requiere un valor numérico exacto para convertir las cuentas por minuto obtenidas del análisis espectral a unidades de actividad.

2) la eficiencia cambia con los cambios físicos del sistema de conteo y los alrededores. No es conveniente que ocurran cambios por condiciones no controladas.

3) cuando se analizan muestras de actividad muy pequeña es conveniente aumentar la eficiencia para elevar el nivel mínimo de detectabilidad.

La eficiencia total está definida como el cociente del conteo observado en un número escogido de canales entre la verdadera rapidez de desintegración de la muestra:

$$\text{EFICIENCIA TOTAL} = \frac{\text{CUENTAS POR MINUTO}}{\text{DESINTEGRACIONES POR MIN.}}$$

La eficiencia puede determinarse por conteo comparativo (usando una muestra calibrada) o por conteo absoluto (calculando cada uno de los factores que afectan al sistema de conteo).

Durante la determinación comparativa de la eficiencia, es necesario reproducir todas las condiciones de conteo entre la muestra calibrada y la desconocida. Debe determinarse una eficiencia para cada núcleo, arreglo geométrico y porción del espectro que se calibre.

Los factores que determinan la eficiencia son :

La geometría y la eficiencia intrínseca del detector.

El factor geométrico depende de la distancia entre la muestra y el detector, de la forma del detector y del recipiente que contiene la muestra.

La eficiencia intrínseca es más difícil de evaluar numéricamente que el factor geométrico.

Está definida como la fracción de radiación isotrópica que incide sobre el detector que cuyas interacciones producen un destello suficiente para ser medido.

#### 1.10.4 Detección de partículas $\alpha$ , $\beta^-$ y rayos $\gamma$ .

Para contar partículas  $\alpha$ , la primera opción es un sistema de centelleo, usando un fósforo de ZnS activado con Ag, que admite un considerable intervalo de valores en la rapidez de desintegración, con la ventaja de no requerir una gran ganancia en la amplificación de los pulsos producidos.

En esta forma la actividad de partículas  $\alpha$  puede ser medida en la presencia de una cantidad  $10^6$  veces mayor de partículas  $\beta^-$ , sin interferencia significativa.

En el centelleo líquido con fósforo interno es la primera elección cuando el material marcado con un emisor  $\beta^-$  es soluble en solventes orgánicos, tales como por ejemplo :

Benceno, tolueno o xileno, donde también se solubilizan centelladores orgánicos del tipo PPC, PCPCP o Instagel. Como los emisores  $\beta^-$  débiles son  $C^{14}$  y  $H^3$ , este método es utilizado para concentrarlos y aumentar al mismo tiempo la eficiencia en su detección .

El sistema más apropiado para la detección de rayos  $\gamma$  es el de centelleo, usando un cristal de NaI activado con Tl (Talio).

#### 1.11 Tipos de fósforo.

Las sustancias capaces de absorber energía y emitirla en la forma de fotones de luz son llamados fósforos.

Los plásticos transparentes, tales como poliestireno o polivinil tolueno, conteniendo impurezas de p-terfenilo y terafenil butadieno, son fósforos orgánicos cada día más usados para la detección de partículas  $\beta^-$ , que presentan la ventaja de poder ser moldeados y fabricados a cualquier tamaño y forma requeridos.

Existen también fósforos o centelladores líquidos, como los mencionados en líneas arriba, en los cuales la muestra radiactiva es disuelta en el mismo solvente que el fósforo, formando una solución que al ser contenida en un envase transparente colocado sobre un tubo fotomultiplicador, o bien en medio de varios de ellos, les enviará centelleos de luz azul que serán transformados en pulsos o señales electrónicas.

### 1.11.1 Líquido centellador Instagel.

En 1950 dos investigadores, Kallman y Reynolds, propusieron el empleo de sustancias fluorescentes disueltas en solventes aromáticos, como detectores de radiación, sobre todo para partículas  $\beta^-$  de baja energía. Es decir las soluciones de sustancias fluorescentes en tolueno o similares reemplazan el cristal de centelleo. La solución se conoce con el nombre de "centellador líquido" .

El centellador líquido que se usa en la detección del tritio en forma de agua tritiada, es un cocktail centelladora universal llamado Instagel .

### 1.12 Método de conteo del tritio en agua tritiada.

El tritio se detecta y mide aún en muy bajas concentraciones en estado gaseoso, como agua tritiada o formando parte de algún otro compuesto.

Generalmente se emplean dos diferentes tipos de contadores, de acuerdo con la naturaleza de la muestra:

contadores gaseosos y detectores de centelleo líquido.

Los contadores gaseosos, se diseñan de manera que operen en la "región proporcional" o en la "región Geiger" .

Para los estudios de radiotrazado en los campos petroleros, se prefiere el método de centelleo líquido para contar directamente las muestras de agua tritiada, a pesar de que la eficiencia de los contadores gaseosos es mayor.

El peso específico de muestra que acepta un detector de centelleo líquido es mayor que el peso de la muestra que acepta un contador gaseoso, es decir, la mínima actividad específica detectable es semejante en ambos casos.

Por otra parte, la preparación de la muestra para el contador gaseoso es muy complicada y requiere mucho tiempo, en cambio la preparación de la muestra para el detector de centelleo líquido es muy sencilla y rápida.

TABLA 1 .

Cuadro comparativo de método de medición de partículas  $\beta^-$  .

Características principales	Método de medición	
	Centelleo líquido	Contadores gaseosos
Eficiencia	25-50 %	70 %
Exactitud del método	$\pm 2 \%$	$\pm 2 \%$
Actividad mínima detectable	$10^{-5} \mu\text{Ci}$	$10^{-5} \mu\text{Ci}$
Tipo de muestra	líquido	gaseosa

Otro aspecto importante que se debe considerar cuando se desea contar agua tritjada de muy baja actividad esta relacionado con los contenedores en los que se depositan las muestras para su conteo y concretamente con el material de que se fabrican.

Los contenedores deben poseer además, características ópticas de transmisión excepcionales, sus paredes no deben ser demasiado gruesas y la absorción óptica del material debe ser tal que no afecte la eficiencia de conteo del sistema.

Los contenedores más usados son de vidrio y polietileno por su bajo costo, los de cuarzo son de alto costo, los contenedores de vidrio y polietileno, se usan una sola vez para evitar contaminaciones .

Los contenedores de cuarzo, en vista de su alto costo se emplean varias veces siempre que se laven cuidadosamente cada vez que se usen.

TABLA 2 .

Cuadro comparativo entre diferentes tipos de contenedores.

Contenedores	Volumen	Se utilizan cuando...
Cristal común	20 ml.	la relación entre cuentas netas y fondo es mayor de 100 .
Poliétileno	25 ml.	la relación entre cuentas netas y fondo es mayor de 5 y menor de 100 .
Cuarzo	20 ml.	la relación entre cuentas netas y fondo es menor de 5 .

### 1.12.1 Ventajas y desventajas de los detectores de centelleo líquido.

- Ventajas :
- Rapidez en la medición.
  - Aceptan muestras de volumen relativamente grande (1 a 10 ml. ) .
  - Simultáneamente se miden dos isótopos diferentes de baja energía.
  - Utilizando "contenedores" apropiados no hay riesgo de contaminar muestra o equipo.

Desventajas :

- Baja eficiencia comparada con los métodos gaseosos.
- Hay necesidad de corregir por "Quenching" \*.
- En ciertas condiciones se presentan problemas de fosforescencia y luminiscencia que alteran los resultados.



\*"Quenching".- Fenómeno que se produce en el centellador líquido por efecto de la radiación beta de baja energía y que reduce el conteo total de la muestra.

El "Quenching" puede traducirse como apagado o extinción, el fenómeno consiste en la absorción, dispersión y degradación de los fotones luminosos por sales, gases o sustancias químicas disueltas en la mezcla muestra-centellador o por coloración de ésta y consecuentemente la pérdida de información que llega a los tubos fotomultiplicadores.

El resultado final de esto es que cambia la forma del espectro, bien por la disminución del total de los fotones o por la disminución en la energía de los mismos y con ello un corrimiento del espectro.

En suma la extinción hace variar la eficiencia de la detección.

## C. ESTADÍSTICA DE SISTEMAS DE DETECCIÓN.

## 1.13 Estadística de conteo.

La estadística de sistemas de detección es introducida por consideración de un tipo de detector de pulso, que involucra en una radiación nuclear.

Los datos provenientes de los experimentos que involucran mediciones, observaciones, etc., pueden ser representados como una función de uno o más variables en orden para facilitar la información del fenómeno.

Si la información viene de un fenómeno dependiente de variables al azar, posiblemente se determine la Ley de Probabilidad en la cual rige el fenómeno.

Si  $n_i$  es el número de cuentas en el  $i$ -ésimo intervalo,  $N$  es el número total de intervalos, la media " $m$ " será :

$$m = \bar{n} = 1/N \sum_{i=1}^N n_i \quad \text{ec. 1}$$

La desviación estándar  $\sigma$  es definida como la raíz cuadrada del valor promedio del cuadrado de las desviaciones de la media, entonces la desviación estándar será :

$$\sigma^2 = \overline{(m - n)^2} = 1/N \sum_{i=1}^N (m - n_i)^2 \quad \text{ec. 2}$$

La cantidad  $\sigma^2$  es generalmente llamado la varianza, para casos prácticos, donde " $m$ " no es conocida, uno puede aproximarse la varianza con la siguiente expresión :

$$\sigma^2 = 1/ N-1 \sum_{i=1}^N (\bar{n} - n_i)^2 \quad \text{ec. 3}$$

donde  $\bar{n} = \sum n_i / N$

### 1.13.1 Precisión de medición de conteo.

En equipos de conteo los errores introducidos por los procesos de totalización de cuentas y la medición de tiempo son despreciables comparado con el error estadístico. El caso de la aplicación de que  $\lambda t$  es mucho menor que 1.

Para esta condición,  $\sigma^2$  es encontrado de la media verdadera el número de cuentas para un intervalo de tiempo en cuestión, este valor es reportado como  $n \pm n^{1/2}$ , entonces:

$$n \approx \bar{n} \approx m \approx \sigma^2 \quad \text{ec. 4}$$

Si  $n$  es el número de cuentas totalizadas sobre un intervalo de tiempo  $t$ , entonces la razón de conteo "r" es:

$$r = n/t \quad \text{ec. 5}$$

Con este valor la desviación estándar puede condicionar como:

$$r \pm \sigma_r = n/t \pm n^{1/2} / t = r \pm (r/t)^{1/2} \quad \text{ec. 6}$$

Haciendo en términos de porcentaje de error, esto es:

$$r \pm 100/(rt)^{1/2} \% = r \pm 100/n^{1/2} \% \quad \text{ec. 7}$$

Esta ecuación es una representación del porcentaje de error de una medición de conteo, que es determinado por el número total de cuentas acumuladas.

Cuando algunas desviaciones estándar  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$  son combinadas, entonces la desviación estándar  $\sigma_S$  resulta como:

$$\sigma_S = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2)^{1/2} \quad \text{ec. 8}$$

Como ejemplo, considerando una razón de conteo del fondo  $r_F \pm \sigma_F$  y una razón de conteo total debido para ambos por la fuente y el fondo  $r_T \pm \sigma_T$ , entonces la razón de conteo estándar  $r_S$  debido solamente a la fuente es :

$$r_S \pm \sigma_S = (r_T - r_F) \pm (\sigma_T^2 - \sigma_F^2)^{1/2} \quad \text{ec. 9}$$

### 1.13.2 Selección de tiempo de conteo.

Una medición más común consiste en la determinación de  $r_S$  el conteo neto debido a la fuente de la razón de conteo total  $r_T$  y de la razón de conteo del fondo  $r_F$ .

La división óptima de tiempo entre las razones  $r_T$  y  $r_F$  para obtener de dos clases de tiempo ;  $t_F$  y  $t_T$ .

Que son los tiempos tomados del fondo y de la actividad total de cuentas, respectivamente.

Entonces  $\sigma_S$ , la desviación estándar de la razón de conteo neto, de las ecuaciones 9 y 6 nos da :

$$\sigma_S = (r_F/t_F + r_T/t_T)^{1/2} \quad \text{ec. 10}$$

por diferenciación :

$$2\sigma_S d\sigma_S = -r_F/t_F^2 dt_F - r_T/t_T^2 dt_T$$

tomando  $d\sigma_S = 0$ , la condición de error mínimo.

$$dt_F + dt_T = 0, \text{ la condición de tiempo constante.}$$

la ecuación 10 se convierte en ;

$$t_F / t_T = (r_F/r_T)^{1/2} \quad \text{ec. 11}$$

1.13.3 Actividad Óptima en función de la desviación estándar. El error estadístico es menor si las lecturas de actividad en las muestras son altas.

La actividad Óptima en función de la desviación estándar de una serie de mediciones, el valor del fondo y los tiempos, están relacionados por la siguiente expresión:

$$\sigma = (A + r_F / t_T + r_F / t_F)^{1/2} \quad \text{ec. 12}$$

donde A = actividad de la muestra.

$t_T$  = tiempo de conteo total de la muestra.

$t_F$  = tiempo de conteo del fondo.

$r_F$  = razón de conteo del fondo.

Si bien es cierto que se buscan lecturas altas de actividad por razones de seguridad es conveniente utilizar la mínima cantidad posible de radioisótopo.

Los cálculos se basan por tanto en el límite de sensibilidad de los instrumentos. Si se supone que  $A \ll r_F$ , entonces la ecuación 12 se convierte en :

$$\sigma = (r_F / t_F)^{1/2} \quad \text{ec. 13}$$

Con base en esta expresión, se acostumbra definir:

C.M.D. Conteo Mínimo Detectable, como el doble de la desviación estándar:

$$\text{C.M.D.} = 2\sigma = 2 (r_F / t_F)^{1/2} \quad \text{ec. 14}$$

C.M.M. Conteo Mínimo Medible, como diez veces la desviación estándar:

$$\text{C.M.M.} = 10\sigma = 10 (r_F / t_F)^{1/2} \quad \text{ec. 15}$$

Las expresiones 14 y 15 son válidas si no se presentan variaciones notables en el fondo, con ellas se calcula la ACTIVIDAD MINIMA DETECTABLE (A.M.D.) y la ACTIVIDAD MINIMA MEDIBLE (A.M.M.) ;

$$\begin{aligned} \text{A.M.D.} &= 2\sigma / 3.7 \times 10^{10} \times 60 \times E \times V \\ &= 9.0 \times 10^{-7} (\sigma / E \times V) \quad \text{ec. 16} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{A.M.M.} &= 10\sigma / 3.7 \times 10^{10} \times 60 \times E \times V \\ &= 4.5 \times 10^{-6} (\sigma / E \times V) \quad \text{ec. 17} \end{aligned}$$

donde E= eficiencia del sistema de detección .

V= volumen de la muestra en mililitros.

Estas ecuaciones están expresadas en unidades de  $\mu\text{Ci/ml}$ .

## CAPITULO II

## EL TRITIO

## 2.0 Generalidades.

El compuesto químico más abundante sobre la tierra es el agua, es el principal constituyente en todos los organismos vivientes; la agricultura, industria y casi todas las actividades del hombre, dependen en gran parte del suministro oportuno de este preciado líquido.

Es por lo tanto de gran trascendencia para la humanidad, conocer las fuentes de suministro de agua, su desplazamiento sobre o bajo la superficie terrestre, etc.

Para estudiar los fenómenos relacionados con el desplazamiento de agua, el tritio es el trazador ideal, casi perfecto. Esta aseveración, está respaldada por un número considerable de tanto de investigación como experimentales.

La mayoría de los trazadores ensayados sufren adsorciones en el medio por el que se desplaza el agua, en cambio en el tritio este fenómeno es despreciable (del orden del 1.5 %).

El tritio se puede obtener en el mercado en forma líquida como agua tritiada ( $\text{HTO}$ ,  $\text{T}_2\text{O}$ ), en la forma gaseosa ( $\text{T}_2$ ), o bien en forma de compuestos tritiados.

Concentraciones del agua tritiada en el mercado es de 1 a 5 Curies/mililitro, mayores o menores de acuerdo con las indicaciones del usuario.

## 2.1 Propiedades físicas.

Temperatura crítica .....	43.7 °K .
Presión crítica .....	20.8 atm.
Volumen crítico .....	53.7 cm <sup>3</sup> .
Masa .....	3.01683 ± 9 x 10 <sup>-5</sup>
Calor de vaporización .....	316 cal/mol .
Volumen molecular .....	18.6 cm <sup>3</sup> /mol.
Temperatura de inversión .....	87 °K .
Espectro infrarrojo .....	1024 cm <sup>-1</sup> .

## 2.2 Características principales radiactivas del tritio.

El descubrimiento del tritio es atribuido a Sir Ernest Rutherford y sus colaboradores Cliphant, Chartack en 1934 en el laboratorio Cavendish de Inglaterra mediante la interacción de Deuterio-Deuterio :

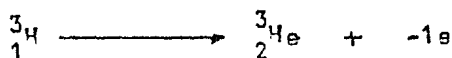


donde  ${}^1_1\text{H}$  ..... Hidrógeno (estable).

${}^2_1\text{H}$  ..... Deuterio (estable).

${}^3_1\text{H}$  ..... Tritio (radiactivo).

Al principio se creyó que el tritio era un isótopo estable, pero en 1948 se sugirió por primera vez un esquema de decaimiento del tritio :





El tritio emite partículas Beta con una energía máxima de 18.1 KeV y una energía promedio de 6.0 KeV .  
 La FIG. 11 muestra el espectro de energía Beta del tritio.

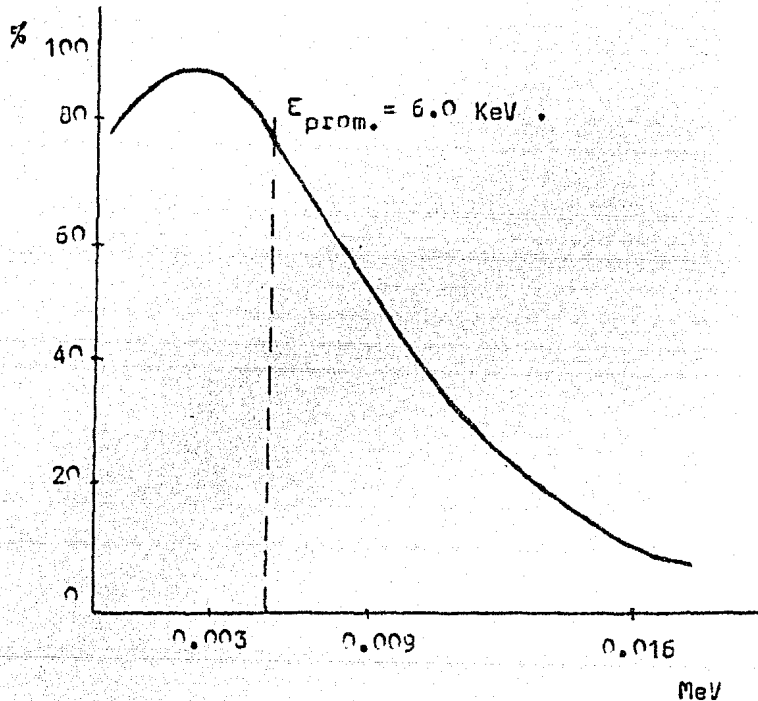


FIG. 11

Espectro de energía Beta del tritio.

La vida media del tritio es de 12.43 años y su constante de decaimiento es de  $1.791 \times 10^{-9} \text{ seg}^{-1}$ .

La radiación beta del tritio es muy débil, tiene un alcance máximo de 6 mm. en agua y un alcance medio de 0.5 mm. en el aire a condiciones normales de temperatura y presión. Las partículas son frenadas totalmente por un blanco de 6 micras de espesor de cualquier material cuya densidad sea igual a la unidad, por ejemplo el agua. El alcance máximo en aluminio es de  $0.21 \text{ mg/cm}^2$ , la energía de amarre del tritio es de 3.1 MeV, su momento magnético es de 2.9796 magnetones nucleares y su spin es  $1/2$ .

### 2.3 Cuadro de decaimiento del tritio.

Las cifras indican la fracción de tritio presente en la muestra después de un cierto tiempo.

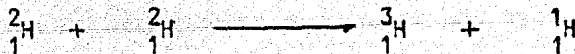
TABLA 3

Años	Meses					
	0	2	4	6	8	10
0	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95
1	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90
2	0.89	0.88	0.88	0.87	0.86	0.85
3	0.84	0.84	0.83	0.82	0.81	0.80
4	0.80	0.79	0.78	0.78	0.77	0.76
5	0.75	0.75	0.74	0.73	0.73	0.72
6	0.71	0.71	0.70	0.69	0.69	0.68
7	0.67	0.67	0.66	0.65	0.65	0.64
8	0.64	0.63	0.62	0.62	0.61	0.61
9	0.60	0.60	0.59	0.58	0.58	0.57
10	0.57	0.56	0.56	0.55	0.55	0.54
11	0.54	0.53	0.52	0.52	0.51	0.51
12	0.51	0.50	-	-	-	-

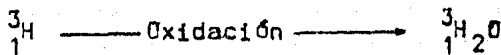
#### 2.4 Producción natural del tritio.

El tritio se produce en la naturaleza por efecto de fenómenos naturales y artificiales. Faltings y Harteck lo detectaron por primera vez en el hidrógeno atmosférico y posteriormente es estudiado en 1956 por Libby analizando aguas de lluvia.

Antes de las explosiones nucleares, se calculó que existía en la naturaleza una cantidad equivalente a 900 gramos de tritio, o sea aproximadamente 9 millones de Curies de tritio. Esta cantidad se produjo como resultado de diferentes reacciones nucleares inducidas por la radiación cósmica en la atmósfera superior, debido a colisiones de neutrones, protones y deuterones con las moléculas de algunos elementos, por ejemplo :



Los átomos de tritio que se producen en estas reacciones, se incorporan a las moléculas de agua por oxidación o intercambio :



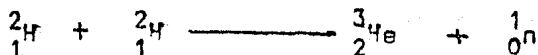
Las aguas de lluvia transportan al tritio desde la atmósfera hasta la superficie terrestre de una concentración de 20 a 60 microcuries, correspondiente a una masa de 2 a 6 Kg . Pero una fracción de 1% es en la forma de  $\text{HTO}$  en el aire y agua. La concentración relativa fraccional atómica para el hidrógeno ordinario es alrededor de  $4 \times 10^{-15}$  ( $\text{HT}/\text{H}_2$ ) en la atmósfera;  $8 \times 10^{-17}$  ( $\text{HTO}/\text{H}_2\text{O}$ ) como vapor en aire, y  $1 \times 10^{-18}$  en la superficie de agua .

En los últimos años, las explosiones nucleares han contribuido notablemente a la producción de tritio en la atmósfera terrestre .

## 2.5 Producción artificial del tritio.

El tritio se produce artificialmente de acuerdo con las reacciones que se ennumeran a continuación :

- Las primeras reacciones que se observaron:



y simultáneamente :



- Bombardeando Boro, Cobre, Flúor y otros elementos pesados, con Deuterones :



- En el ciclotrón, bombardeando blancos de Berilio con Deuterones :



- En el reactor, irradiando blancos de Litio:



Esta reacción que es la más eficiente, se observó por primera vez en 1935 con ayuda de la cámara de niebla.

La producción de tritio en gran escala, se realiza en los reactores nucleares, por irradiación de aleaciones del tipo :

"Litio-6/Magnesio" y "Litio-6/Aluminio" .

El Litio que se emplea es "enriquecido" previamente.

De acuerdo con la reacción "neutrón-alfa", se obtiene tritio, parte del cual escapa y parte del cual permanece en el mineral formando un metal tritiado.

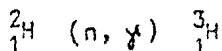
Posteriormente se trata el metal con ácido, desprendiéndose el tritio.

En fechas anteriores se ha sugerido la conveniencia de obtener pequeñas cantidades de tritio para utilizarlas en trabajos de radiotrazado, irradiando fluoruro de litio en los reactores nucleares.

El fluoruro irradiado se somete a una temperatura de 870 °C (punto de fusión) durante 15 minutos para liberar el tritio.

Por último, el tritio se obtiene del agua pesada que se utiliza en los reactores para la moderación de neutrones.

El tritio se forma en la reacción :



como un subproducto de los reactores nucleares.

## 2.6 Unidad de tritio.

Por convención se ha establecido que las lecturas de baja actividad del tritio, se reporten en unidades de tritio, cuya abreviatura es "T.U." .

Una unidad de tritio, (T.U.) está definida por la relación :

$$\frac{1 \text{ átomo de tritio}}{10^{18} \text{ átomos de hidrógeno}}$$

que es equivalente a  $3.3 \times 10^{-9} \mu\text{Ci/ml}$  de agua o aproximadamente a 7.2 desintegraciones por minuto por litro de agua.

La unidad de tritio es útil porque representa el orden de magnitud de tritio en las aguas naturales antes de que se iniciaran las pruebas nucleares, en el año de 1952 .

Además es el límite de detectabilidad de los sistemas de conteo que se consiguen en el mercado.

## 2.7 Peso de un Curie de tritio.

El tritio se puede conseguir isotópicamente puro, circunstancia que permite la formación de compuestos tritiados con una actividad específica alta.

El peso de un curie de un radioisótopo se calcula fácilmente a partir de la ecuación fundamental del decaimiento radiactivo :

$$- dN/dt = \lambda N \quad \text{ec. 1}$$

donde  $\lambda$  = constante del decaimiento radiactivo.

$N$  = número de átomos por curie.

$dN/dt$  rapidez con que se desintegra el radioisótopo.

$$\lambda = 0.693/t_{1/2} \quad \text{ec. 2}$$

$t_{1/2}$  = vida media del radioisótopo (para el tritio 12.43 años) .

Para calcular el peso de un Curie de tritio, se efectúan algunos cambios en la ecuación (1) :

$$- dN/dt = 0.693 N/t_{1/2} \quad \text{ec. 3}$$

pero  $N = W N_0 / M$

donde  $M =$  peso atómico .

$W =$  peso en gramos de un Curie.

$N_0 =$  número de avogadro =  $6.023 \times 10^{23}$

Por otra parte :

$$dN/dt = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps}$$

es decir  $dN/dt = 1 \text{ Curie} = \lambda N$

Por lo tanto la ecuación 3 se transforma en :

$$3.7 \times 10^{10} = \frac{0.693 \times W \times 6.023 \times 10^{23}}{(12.43 \times 365 \times 24 \times 3600) \times 3}$$

Por lo tanto :

$$W = 1.02 \times 10^{-4}$$

Peso de un Curie de tritio =  $1.02 \times 10^{-4}$  gramos .

## 2.8 Actividad específica del tritio.

Calculando la Actividad Específica en "Curies/gramo" :

$$\text{Actividad Específica} = (\text{dps/gramo}) = 0.693 N_0/t_{1/2} \times M$$

Substituyendolos :

$$\text{Act. Esp.} = \frac{0.693 \times 6.023 \times 10^{23}}{(12.43 \times 365 \times 24 \times 3600) \times 3 \times 3.7 \times 10^{10}}$$

$$\text{Act, Esp. Tritio} = 0.972 \times 10^4 \text{ Ci/g}$$

## 2.9 Seguridad radiológica del tritio.

Uno de los aspectos más importantes, relacionado directamente con la aplicación de radioisótopos en diferentes ramas de la industria e investigación científica, es la Seguridad Radiológica.

Es preciso aclarar que la humanidad siempre ha estado expuesta a la radiación ionizante, tanto de origen cósmico como de fuentes naturales que se localizan en el medio ambiente y dentro del cuerpo humano.

La exposición a la radiación natural presenta riesgos de radiación externa e interna.

La irradiación externa es ocasionada por rayos cósmicos y por rayos gamma que emiten los materiales radiactivos que se encuentran en el aire, agua y sobre o dentro de la tierra.

La irradiación interna proviene de la ingestión de alimentos, agua y aire que contienen materiales radiactivos.

Cualquier tipo de radiación ionizante puede producir un determinado daño biológico, pero la magnitud de la dosis necesaria para producir el mismo efecto, varía de un tipo a otro de radiación.

El efecto biológico de la radiación ionizante depende no solo en la cantidad de energía absorbida por gramo (en RADS, "Radiation Absorbed Dose").

El efecto de una dosis absorbida es consecuentemente expresado en términos de la "Dosis Equivalente" de la cual su unidad es el REM ("Radiation Equivalent in Man").

Si "D" es la dosis absorbida en Rads, las dosis equivalente "DE" en Rems es definida por :

$$DE \text{ (rems)} = D \text{ (rads)} \times QF \times MF$$

donde QF es el factor de calidad para una radiación dada y MF ("Modifying Factor").



Para exposiciones de radiación externa, el MF es generalmente ignorado, esto es, unitario a su valor.

Por lo tanto :

$$DE = D \times QF$$

El propósito del factor de calidad es para diferenciar el volumen de los tejidos del cuerpo dentro en la cual varias radiaciones depositan su energía.

El valor numérico del factor de calidad para una radiación particular es llamada como la transferencia de energía lineal (LET) en agua.

El LET es la velocidad de deposición de energía por unidad de longitud de la radiación y es generalmente expresado en KeV de energía por micrometro ( $10^{-6}$  m o  $\mu\text{m}$ ) de longitud de radiación, es decir,  $\text{KeV}/\mu\text{m}$ , medido en agua.

Los valores de QF y LET correspondientes son dados en la tabla siguiente:

TABLA 4

Radiación	QF	LET (KeV/ $\mu\text{m}$ en agua)
Rayos gamma, rayos X y partículas beta.	1	3.5 o menos.
Neutrones (10 KeV).	3	7.0
Neutrones (> 10 KeV).	10	53
Partículas alfa (internas).	10	175 o más.

El tritio es uno de los radioisótopos menos tóxicos, pero se debe tener cuidado durante su manejo porque en algunas circunstancias es más difícil controlarlo que a otros núclidos más tóxicos, en primer lugar porque se emplean cantidades relativamente grandes de tritio, del orden de curies; y en segundo lugar porque los procedimientos de detección son tediosos y en última instancia por la diversidad de compuestos de los que puede formar parte.

El tritio se utiliza en la mayoría de los estudios de radio trazado en forma de agua tritiada, por lo cual significa que puede ser absorbido rápidamente a través de la piel o los pulmones.

Los compuestos orgánicos intercambian con relativa facilidad su hidrógeno por tritio .

#### 2.9.1 Vida media efectiva, vida media biológica.

Para tomar en cuenta el decaimiento radiactivo de la sustancia que penetra al cuerpo (vida media radiactiva) y el tiempo en que el cuerpo humano elimina la mitad de la sustancia ingerida (vida media biológica), se define como la vida media efectiva.

La vida media efectiva está expresada en la siguiente ecuación :

$$T_e = \frac{T_b \times T_r}{T_b + T_r}$$

donde :  $T_e$  = vida media efectiva.

$T_b$  = vida media biológica.

$T_r$  = vida media radiactiva.

La vida media efectiva, es la medida del decrecimiento (en función del tiempo) de la radiactividad en el organismo.

La vida media biológica del tritio se observa de acuerdo con la admisión diaria de agua, donde la radiactividad en los fluidos del cuerpo humano, disminuye logarítmicamente si aumenta la admisión de agua por diferentes vías, por ejemplo:

Agua ingerida como bebida, en los alimentos o agua intercambiada entre el medio ambiente y la piel o pulmones.

Vida media biológica (Tb)	Admisión de agua.
10 días	2.7 L /día
9.3 a 13 días	a voluntad, al gusto
2.4 días	12.8 L /día
1.5 días	Forzando agua al organismo durante las 24 horas del día.

La vida media biológica del tritio es de 12 días aproximadamente. Tenemos una gráfica de vida media biológica en función de la admisión de agua (FIG. 12) :

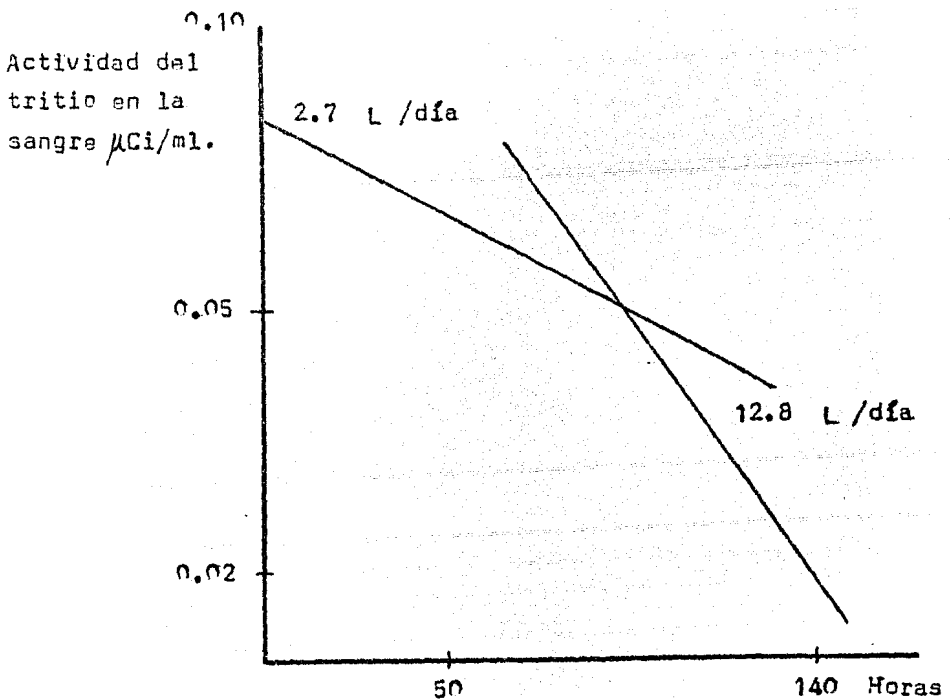


FIG. 12

### 2.9.2 Guías de Protección contra la Radiación (G.P.R.) para el tritio.

La política a seguir en cuanto a la exposición del hombre a la radiación, consiste en que las dosis que recibe, deben ser por su propia seguridad lo más bajas posibles; menores que las señaladas por las disposiciones legales.

El término que designa los niveles prescritos legalmente es "Máximos Permisibles" a continuación de la palabra o frase "Nivel", "Flujo", "Carga Corporal", etc.

Todos estos términos se han agrupado con una designación común: Guías de Protección contra la Radiación (G.P.R.) .

Los organismos gubernamentales prescriben las Guías de Protección contra la Radiación, en cada país, casi siempre con base en los trabajos de la "International Commission of Radiological Protection" (I.C.R.P.), "Federal Radiation Council" (E.U.A.), organismos cuyas funciones son estudiar y evaluar los daños ocasionados por la radiación en todos sus aspectos y sugerir de acuerdo con sus descubrimientos, los niveles apropiados de actividad, intensidad o dosis total.

#### a. Carga Corporal.

La máxima carga corporal permisible para exposiciones continuas con tritio, considerando el hombre normal, se obtiene con la expresión siguiente:

$$q = \frac{2.8 \times 10^{-3}}{E_{\text{efec.}}} \times m \times (G.P.R.) \quad \mu\text{Ci}$$

$\times f_2$

donde:  $m$  = masa del órgano crítico en gramos.

(G.P.R.) = Guía de Protección contra la Radiación  
en rems/semana .

$E_{\text{efec.}}$  = energía efectiva absorbida por desintegración.

$f_2$  = fracción de tritio depositada en el órgano crítico.

$q$  = cantidad de tritio en  $\mu\text{Ci}$  en el cuerpo total que produce una dosis de 0.1 rem/semana.

Para el tritio :

Carga Corporal Máxima Permissible.

i) para el cuerpo total  $q = 2000 \mu\text{Ci}$

ii) para tejidos  $q = 1000 \mu\text{Ci}$

b. Concentración en aire.

La expresión general para la guía de concentración de radiactividad en el aire, considerando inhalación continua (exposición profesional) de 40 y 168 horas, es la siguiente :

$$(\text{G.C.R.})_{\text{aire}} = \frac{0.693 \times q \times f_2}{2 \times 10^7 \times T_e \times f_a (1 - \exp. -0.693 t/T_e)}$$

donde ;  $f_a$  = fracción del radionúclido inhalado que se deposita en el órgano crítico.

$T_e$  = vida media efectiva.

$t$  = tiempo de exposición.

$(\text{G.C.R.})_{\text{aire}}$  = Guía de Concentración de Radiactividad en  $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$  (en el aire) .

Se ha calculado que el hombre talla normal respira  $2 \times 10^7 \text{ cm}^3$  de aire por día.

Para el tritio:

$(\text{G.C.R.})_{\text{aire}}$ cuerpo total ( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ )	$(\text{G.C.R.})_{\text{aire}}$ tejidos ( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ )
$2 \times 10^{-5}$ en 40 horas	$2 \times 10^{-5}$ en 40 horas
$7 \times 10^{-6}$ en 168 horas	$5 \times 10^{-6}$ en 168 horas

c. Concentración en agua.

Se calcula con una expresión similar a la  $(G.C.R.)_{\text{aire}}$  considerando que el hombre talla normal ingiere 2200 ml. de agua durante el día (24 horas) .

Para el tritio:

$(G.C.R.)_{\text{agua}}$ ( $\mu\text{Ci/ml}$ )	cuerpo total	$(G.C.R.)_{\text{agua}}$ ( $\mu\text{Ci/ml}$ )	tejidos
0.1 en 40 horas		0.2 en 40 horas	
0.03 en 168 horas		0.05 en 168 horas	

El Nivel Máximo Permissible, recomendado por la I.C.R.P. para agua potable es de  $0.003 \mu\text{Ci/ml}$  .

d. Concentración Máxima Permissible (C.M.P.) de tritio en aire y en agua son:

$$(C.M.P.)_{\text{aire}} = \frac{0.693 \times q}{[(\text{abs. piel/min})(\text{min/día}) + (\text{ml inh./día}) \times (\text{d. exp/s})] \times T_e}$$

donde: (abs. piel/min) = absorción en la piel por minuto.

(ml inh./día) = mililitros inhalados por día.

(d. exp/s) = días expuestos por semana.

entonces:

$$(C.M.P.)_{\text{aire}} = 1.1 \times 10^7 \text{ dpm-m}^3 \quad \text{o} \quad 4.95 \times 10^{-12} \mu\text{Ci/m}^3$$

$$(C.M.P.)_{\text{agua}} = \frac{0.693 \times q}{T_e \times (\text{Volumen de agua ingerida en ml/día})}$$

$$= 2.1 \times 10^8 \text{ dpm-L} \quad \text{o} \quad 9.455 \times 10^{-11} \mu\text{Ci/L}$$

Constantes para calcular las concentraciones internas de tritio.

$f_2$  = fracción que va de la región gastrointestinal a la sangre, o viceversa :

= 1.0

$f_a$  = fracción que se deposita en el órgano crítico:

. por ingestión = 1.0

. por inhalación = 0.75

$E_{\text{efec.}}$  = energía efectiva = 0.006 MeV .

Conc. del elemento por gramo de órgano en gramos = 0.1

Admisión diaria del elemento por ingestión = 250 g/día .

Vida media biológica = 12 días.

Vida media efectiva = 12 días.

vida media radiactiva = 12.43 años.

### 2.9.3 Concentración de tritio en los estudios de radiotrazado.

Las concentraciones de tritio que se emplean en los estudios de radiotrazado, son del orden de  $10^{-3}$   $\mu\text{Ci/ml}$  y las guías de protección contra la radiación (G.P.R.), señalan un valor de  $3 \times 10^{-1}$   $\mu\text{Ci/ml}$  para áreas restringidas, por lo tanto, las concentraciones de tritio que se emplean en los trabajos de campo petrolero, están por abajo de los límites legales permisibles.

En el método de centelleo líquido permite medir concentraciones del orden de  $5 \times 10^{-9}$   $\mu\text{Ci/ml}$ , que son menores que las concentraciones que señalan las guías de protección contra la radiación, es decir, no hay problema para detectarlos.

Si las G.P.R. para población en general es de  $3 \times 10^{-3} \mu\text{Ci/ml}$  en los estudios de radiotrazado, se pueden emplear concentraciones del orden de  $3 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/ml}$  sin problemas de detección ni de contaminación.

Algunos puntos importantes en los estudios de radiotrazado:

- La concentración en el fluido de inyección deberá ser del orden de las G.P.R. , sobre todo si el fluido constituye una fuente potencial de agua potable o para riego.
- Es preferible mantener la concentración en los fluidos de producción al mínimo, utilizando los instrumentos de detección más sensibles.
- Se debe efectuar el balance de materiales para tener la certeza de que todo el tritio inyectado se localiza en los fluidos de producción.
- Asegurar de que la dilución del tritio en los fluidos de inyección y producción esté dentro de los límites de detección de los instrumentos.



## CAPITULO III

### INFORMACION DEL YACIMIENTO EN ESTUDIOS DE RADIOTRAZADO.

#### 3.0 Importancia de la geología de explotación.

Puesto que la explotación de los yacimientos petrolíferos depende o está en relación del conocimiento más preciso de los factores que afectan la mecánica de los fluidos, es obvio que entre dichos factores se encuentran las características geológicas del yacimiento.

Si por ejemplo, en un sistema de inyección de agua, la eficiencia del radiotrazado, además de otras condiciones requiera un conocimiento sobre los posibles caminos que habrán de seguir los fluidos al desplazarse, y esto solamente se consigue mediante un estudio de la permeabilidad y/o porosidad del yacimiento.

La geología de explotación es una rama de la geología petrolera, cuyo objetivo es servir de auxiliar en algunas fases de la explotación de los yacimientos petrolíferos, proporcionando la información de carácter geológico que se requiere, tal como :

- Clasificación de los yacimientos:  
desde el punto de vista litológico.  
desde el punto de vista de trampas de hidrocarburos.
- Preparación de cortes compuestos y detallados de cada pozo.
- Preparación e interpretación de secciones estratigráficas y estructurales.

- Preparación de planos de configuración :
  - . de isopacas i isócoras.
  - . de contactos de fluidos del yacimiento.
  - . de avance de fluidos de inyección .
  
- Estudios relativos a las rocas almacenadoras.
  
- Estudios de zonas de fracturas, plegamientos, etc.
  
- Zonificación vertical y segmentación lateral de los yacimientos de acuerdo con sus características geológicas generales, para estudios acerca de la mecánica de los fluidos del yacimiento.

### 3.1 Recuperación secundaria de hidrocarburos.

La recuperación secundaria comprende una serie de técnicas y procedimientos que se aplican con el propósito de obtener aceite en aquellos pozos que no producen espontáneamente, una posibilidad, consiste en inyectar agua a presión, desde un pozo llamado de inyección, de manera que force al aceite residual de los yacimientos para que fluya hacia los pozos productores.

En la recuperación secundaria de hidrocarburos debe apoyarse forzosamente en modelos geológicos de yacimientos, porque en la descripción geológica del yacimiento requerida en esta etapa de la explotación, debe incluir principalmente los siguientes aspectos :

- Tipo de estructura y fallas geológicas.
- Presencia de fracturas.
- Porosidad y permeabilidad.
- Zonificación del yacimiento.

Esta información debe tomarse en cuenta para el correcto desarrollo de los estudios de recuperación secundaria.

A continuación se da un breve estudio sobre las rocas almacenadoras y sus propiedades :

Las características generales que deben tener las rocas almacenadoras son simples: deben tener suficientes espacios porosos para poder almacenar un volumen apropiado de hidrocarburos y las facilidades de almacenamiento deben ser tales que, los fluidos contenidos descarguen cuando el yacimiento ha sido perforado para los fines de explotación,

Generalmente, la mayor parte de los fluidos se encuentran en areniscas o rocas carbonatadas, simplemente porque éstas son las rocas más comunes que llenan las condiciones de buenas rocas almacenadoras en el subsuelo.

Una roca almacenadora debe tener un mínimo de porosidad y un espesor mínimo para poder ser explotable y tener un considerable volumen de hidrocarburos, el valor de estos mínimos depende de las condiciones geológicas locales.

Muchas de las rocas en un yacimiento productor, tiene porosidades mayor del 10 % y espesor mayor de 30 metros.

La porosidad es un factor definitivo ya que controla la capacidad de inyección de agua, es necesario que tenga buena porosidad y permeabilidad y que se mantengan, por lo menos del pozo inyector al productor.

En rocas carbonatadas heterogéneas, en donde se tiene un amplio rango de permeabilidad, es probable que se presenten canalizaciones del agua de inyección del pozo inyector al productor, a través de las secciones altamente permeables, quedando los hidrocarburos atrapados en las zonas de menor permeabilidad.

La elección del arreglo de los pozos y de los intervalos de inyección y de producción se hará con más bases, ya que para ello se tomaría en cuenta también la zonificación del yacimiento.

Después de definir una zonificación de valores de porosidad o permeabilidad, la recuperación secundaria debe programarse o adaptarse con base en las subzonas dentro del yacimiento. Ya que por medio del estudio geológico, se conocerá la posición que guardan los pozos estructuralmente, las características de los mismos, y los pozos que deben ser inyectores y los que deben ser productores.

### 3.2 Tipos de modelos de campo petrolero.

Cuando un campo petrolero es involucrado en un programa de recuperación secundaria, que es una práctica muy común, especialmente en estudios de radiotrazado de un modelo de campo petrolero a base de inyección de agua; se ensayan y se hacen diferentes arreglos de pozos de inyección y de producción en modelos regulares, formando así un sistema de instalaciones compuestas y alternados entre sí.

Históricamente el primer tipo de sistema de instalación regular que se ensayó fue el de un arreglo de pozos lineales, como se ilustra en la FIG. 13 .

Allí se observa que los pozos de inyección y de producción son colocados con espaciado igual y regular y paralelos entre sí.

El modelo siguiente que se ilustra esquemáticamente en la FIG. 14 es un arreglo formado por un sistema de instalación regular de una línea de cinco pozos, en la cual se observa que el pozo productor está rodeado de 4 pozos inyectores.

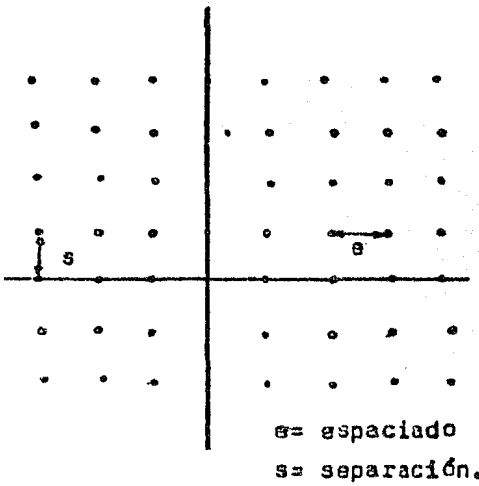


FIG. 13  
Representación de un sistema de instalación de pozos lineales.

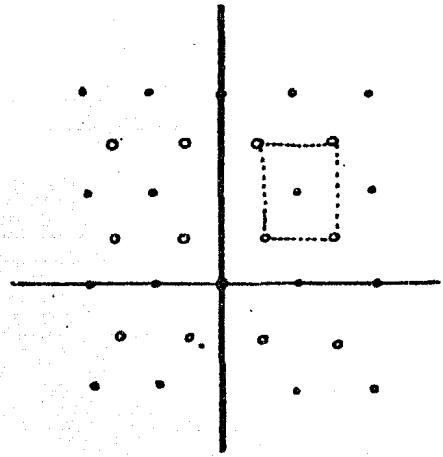


FIG. 14  
Sistema de instalación de cinco pozos lineales y alternados.

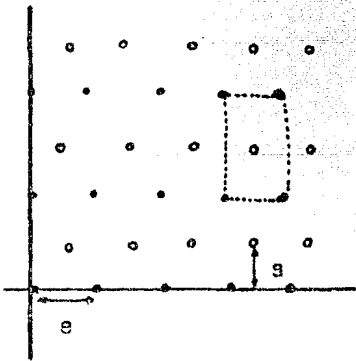


FIG. 15  
Representación esquemática de un sistema de instalación de cinco pozos alternados entre sí.

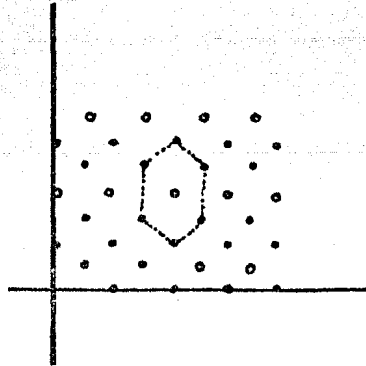


FIG. 16  
Sistema de instalación de pozos en forma hexagonal.

En la FIG. 15 se observa como un modelo especial llamado "alternados entre sí", en donde las líneas de este tipo de arreglo son cambiadas paralelamente por la mitad del espaciado entre pozos dentro de la línea recta, y la separación de la línea es también la mitad del espaciado entre pozos. Esta forma de arreglo de cinco pozos alternantes, cada pozo inyector esta uniformemente rodeado por cuatro pozos productores.

Esta es una forma de arreglo más comunmente usado, no obstante, hay un modelo de arreglo de pozos que se usa en los campos petroleros para un estudio de radiotrazado, es una forma hexagonal (7 pozos alternantes), como se ilustra en la FIG. 16 donde se observa que el pozo inyector está de centro y mientras los otros seis pozos son productores.

Este modelo de arreglo de pozos se usa actualmente en estudios de radiotrazado de un campo petrolero.

### 3.3 Información requerida del yacimiento para la planeación de un estudio de radiotrazado.

Es preciso reunir la mayor cantidad posible de información del campo o región donde se planea realizar estudios de radiotrazado.

A continuación se anota una lista completa de las características principales del yacimiento y en general del campo petrolero que se recomiendan estudiar cuidadosamente antes de realizar cualquier estudio de radiotrazado.

#### Características del yacimiento:

- Litología (arenas, areniscas, etc.).
- Porosidad (en por ciento).
- Permeabilidad (máxima, mínima, promedio).
- Saturación de agua (en por ciento).
- Espesor del yacimiento (efectivo y total).
- Área y volumen del yacimiento.
- Condiciones de presión.

#### Mapas y Diagramas:

- Diagrama del sistema de inyección.
- Diagrama de un pozo típico de inyección.
- Diagrama de un pozo típico de producción.
- Mapas estructurales y de isopacas.
- Mapa de la región.
- Mapa del campo petrolero incluyendo caminos de acceso a los pozos.

**Información general del campo:**

- Tiempo aproximado de tránsito del fluido de inyección entre el pozo inyector y los productores.
- Inyectividad por pozo (inicial y estabilizada).
- Número de pozos productores.
- Número de pozos inyectores.
- Patrón de inyección.
- Mediciones de producción del campo:
  - . inyección mensual de agua.
  - . producción mensual de aceite.
- Análisis de los fluidos de inyección y de producción.
- Análisis radiactivo del agua de inyección y de producción.
- Información de datos completos sobre posibles experimentos con radioisótopos efectuados con anterioridad.



## CAPITULO IV

## RADIOTRAZADO DE UN MODELO DE CAMPO PETROLERO.

4.0 Radiotrazado entre pozos petroleros con agua tritiada. El empleo del tritio en los estudios del desplazamiento de fluidos a través de medios porosos, reviste importancia en la explotación petrolera.

Uno de los problemas que acapara la atención de investigadores y técnicos, es lograr una mayor recuperación de hidrocarburos.

Para esto es indispensable conocer una gran cantidad de datos con una exactitud razonable, de las características de la formación y del desplazamiento de fluidos.

El empleo del tritio presenta algunas ventajas en comparación con otros trazadores :

- Bajo costo.
- Seguridad durante su manipulación (en vista de la baja energía de su radiación beta).
- Toxicidad ligera.
- Disponibilidad. (Se consigue fácilmente en el mercado tanto en forma líquida como gaseosa, en concentraciones tan altas como sea necesario).
- El agua tritiada es químicamente idéntica al agua corriente.

El tritio se utiliza en forma de agua tritiada, porque posee todas las propiedades físicas y químicas del agua de inyección. Además puede viajar a través de medios porosos, sin sufrir absorciones, sedimentaciones o intercambios iónicos de magnitud considerable.

El agua tritiada se introduce en uno o varios de los pozos de inyección, de tal manera que fluya a través de la formación junto con los fluidos del yacimiento y los de inyección para medir el tiempo de tránsito de los fluidos entre los puntos de inyección y los pozos productores.

El trazador (agua tritiada) se debe diluir hasta conseguir una concentración relativamente baja de tritio, de manera que al mezclarse con un volumen grande del fluido de inyección, la concentración sea aún más baja, del orden de  $\mu\text{Ci/ml}$  para evitar el máximo los riesgos si se presentan canalizaciones por fracturamiento entre el punto de inyección y los pozos productores.

Después de la inyección se recolectan muestras de los fluidos de producción en los pozos cercanos o en aquellos en que se supone que tiene alguna relación o conexión con el punto de inyección y se mide la cantidad de tritio (concentración) en cada una de las muestras.

Con esta información, es posible conocer el tiempo de tránsito del trazador y de algunas propiedades del yacimiento, en función de la dilución que experimenta el trazador. Los resultados (concentración del tritio en las muestras) se grafican en función del tiempo transcurrido a partir de la fecha de inyección.

La interpretación de la forma de las curvas de concentración contra tiempo, permitiría obtener un mejor conocimiento del desplazamiento del fluido de inyección a través del yacimiento y confirmar o desechar la influencia de los patrones de flujo.

Si la curva es un pulso de forma regular, se deduce que la formación a través de la cual se desplazan los fluidos es homogénea, por el contrario, si el trazador se difunde o diluye en un volumen muy grande de fluidos en el yacimiento, significa que hay una probabilidad alta de canalizaciones o bien que la formación es heterogénea, como se muestran en la siguiente FIG. 17 .

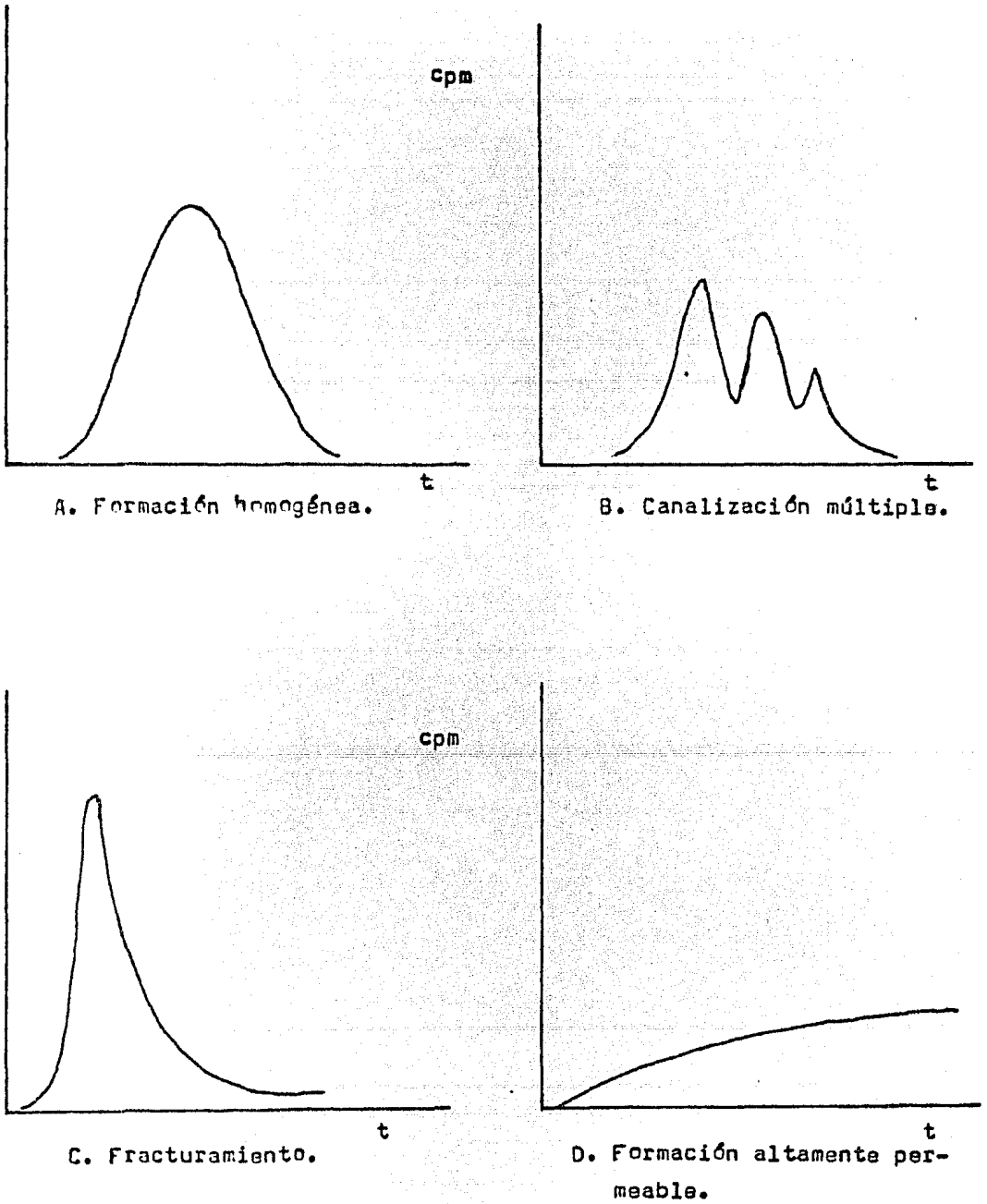


FIG. 17 Curvas de Producción.

4.1 Aspectos importantes en los programas de radiotrazado. A continuación se ennumera una serie de recomendaciones que es preciso cumplir para la realización práctica de un radiotrazado. Desde luego las características particulares de cada experiencia pueden modificar notablemente el proyecto inicial. Por lo tanto en esta sección se establecerán únicamente lineamientos generales, como punto de partida en la planeación de un trabajo específico.

La elección del trazador es un requisito previo e indispensable para cualquier aplicación. Tanto el radioisótopo como su forma química, se deben elegir tomando en cuenta la función que desempeñará.

La elección, en última instancia, está vinculada estrechamente con su vida media, actividad específica, tipo y energía de la radiación y finalmente con su comportamiento físico-químico.

#### - Vida media.

La vida media debe ser lo suficientemente grande para que permita la detección del radioisótopo todo el tiempo que dure la prueba, pero de tal modo que una vez concluida la experiencia la actividad decaiga a niveles por abajo de los permisibles, después de un tiempo razonable.

Se recomiendan una vida media comprendida entre los siguientes valores:

$$\begin{array}{l} \text{Tiempo requerido} \\ \text{para la experiencia} \end{array} \leq 4 t_{1/2} \leq \begin{array}{l} \text{Tiempo transcurrido entre dos} \\ \text{experiencias} \\ \text{consecutivas} \end{array} .$$

- Actividad específica.

Es una característica importante, porque las muestras que se obtienen en un estudio de radiotrazado, deben poseer una actividad que permita un conteo con un error estadístico aceptable y de manera que su comportamiento físico-químico no ofrezca dudas.

- Tipo y energía en la radiación.

Estas características están relacionadas directamente con las necesidades de detección y con el equipo de conteo.

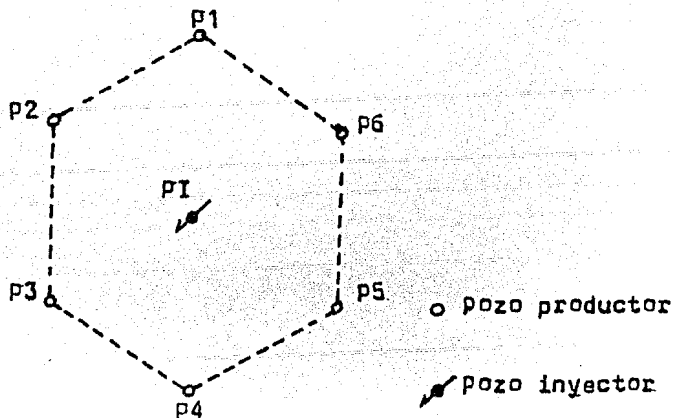
- Comportamiento físico-químico.

La forma química del trazador y su comportamiento físico-químico son características importantes que dependen en gran parte de las propiedades del material que se desea "trazar".

4.1.1 Patrón de inyección.

Se tiene un tipo de distribución de pozos petroleros en forma hexagonal.

Aproximación para cálculo:



## 4.2 Equipo de inyección de agua y dispositivos.

Comprenden una batería de inyección de agua, árboles de válvulas (terminales de pozos) y dispositivos para inyección y recolección de muestras.

### 4.2.1 Batería de inyección de agua.

Las instalaciones de inyección se dividen en cuatro sistemas principales: captación, tratamiento, bombeo y distribución.

El diagrama mecánico de flujo se presenta en la FIG. 18 .

#### Captación.

Consiste en pozos profundos equipados con bombas verticales tipo turbina, accionados con motores eléctricos, con sus correspondientes desarenadores.

#### Tratamiento.

Comprende de una batería de filtros de presión de grava y arena para la eliminación de sólidos suspendidos, así como de dosificadores de reactivos para bactericidas, inhibidores de corrosión y surfactantes.

#### Bombeo.

Comprende una serie de bombas de alta presión accionadas por turbinas.

#### Distribución.

Finalmente, se tiene una red de distribución para cada campo petrolero, que consiste de un acueducto troncal de acero, distribuidos a los pozos de captación (inyectores). La FIG. 19 muestra una red de distribución de un modelo de campo petrolero.

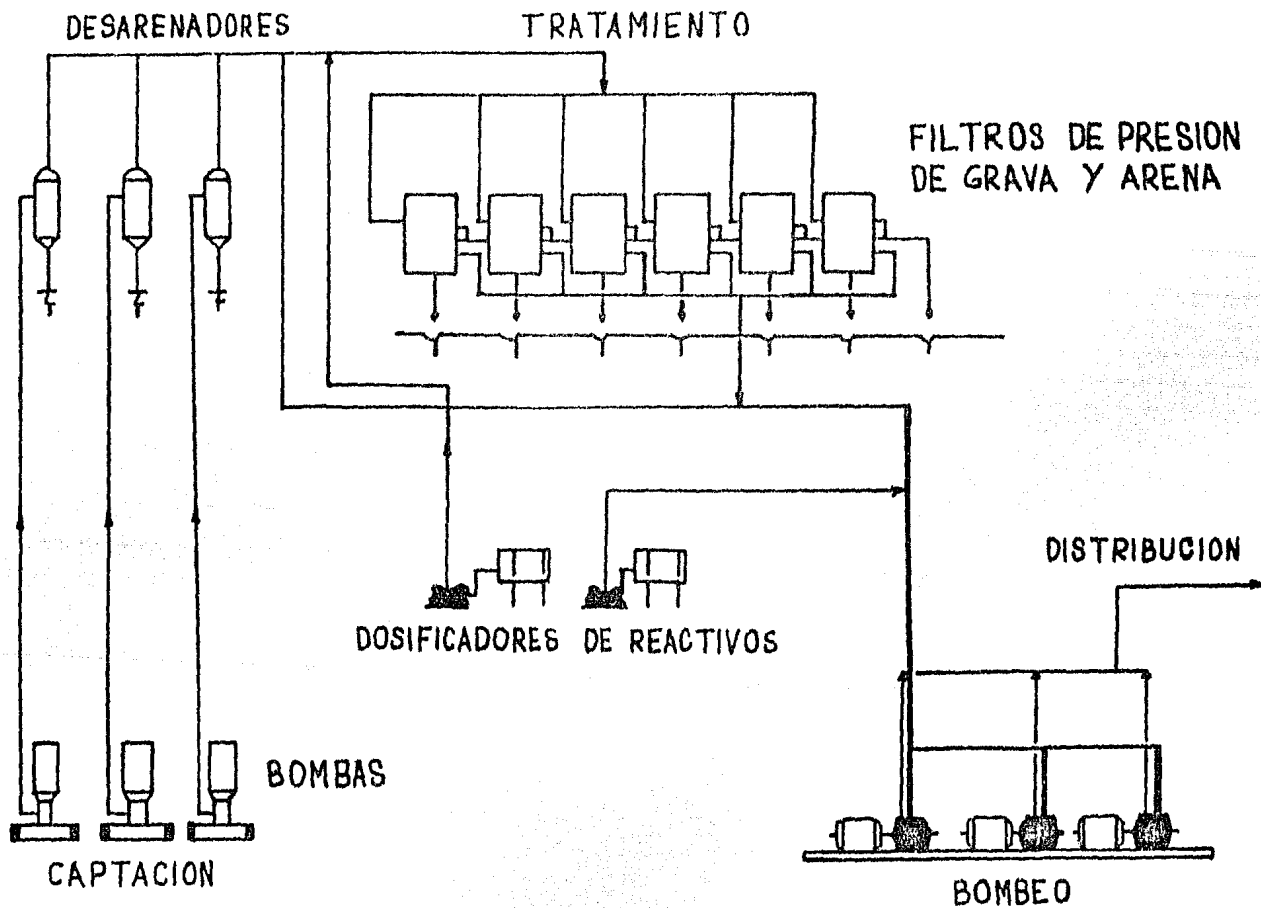


FIG.18  
 DIAGRAMA MECANICO DE FLUJO DE UNA BATERIA DE INYECCION DE AGUA.

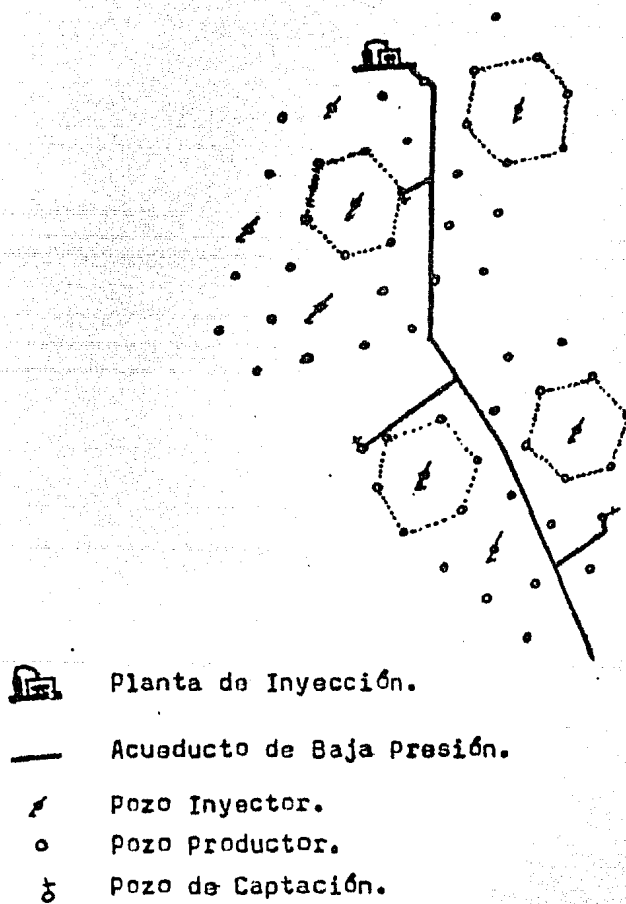


FIG. 19

Red de distribución de agua de un modelo de campo petrolero.



#### 4.2.2 Arbol de válvulas (pozos).

Cada campo petrolero tienen instalados árboles de válvulas o pozos terminales llamados pozo inyector y pozo productor.

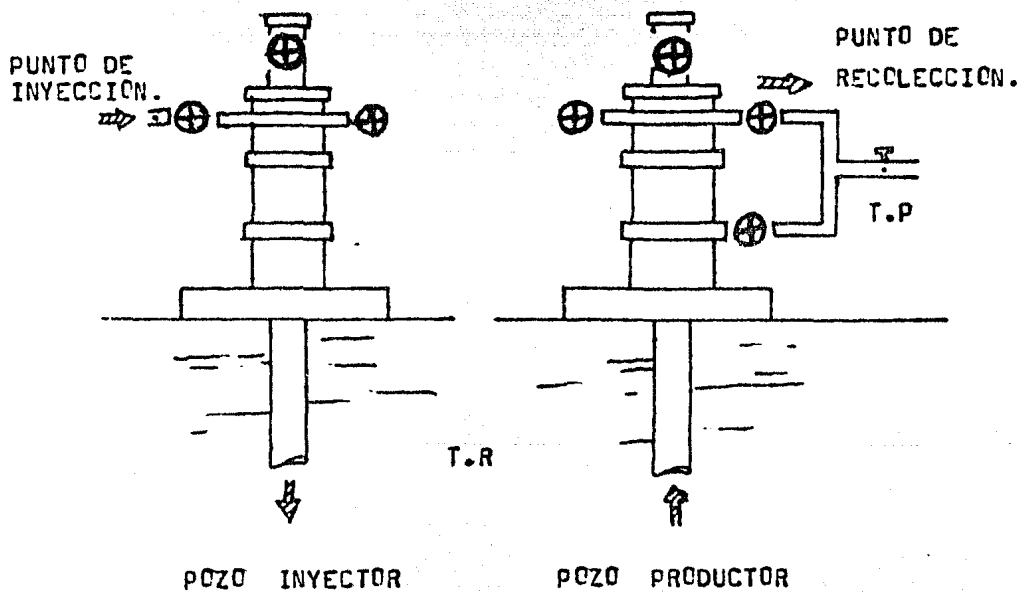


FIG. 20

T.P. = Tubería de producción.

T.R. = Tubería de revestimiento.

#### 4.2.3 Dispositivos para inyección.

Los dispositivos de inyección no presentan problemas desde el punto de vista de diseño o construcción.

Los principales requisitos que deben satisfacer son los siguientes:

- Efectividad durante la operación.
- Simplicidad en el diseño, construcción y sobre todo en la operación.
- Seguridad para evitar posibles accidentes en vista de las presiones altas y de la peligrosidad de los fluidos que se manejan.
- Compacto para que sea transportado fácilmente de un sitio a otro en los campos petroleros.
- Resistente con el fin de que soporte el tránsito por caminos en mal estado y manipulaciones poco cuidadosas.

En la FIG. 21 se muestra un diagrama de dispositivo de inyección del trazador.

El equipo de inyección consta de las partes principales:

- Un tanque de almacenamiento de un volumen aproximado de 100 litros de capacidad, va instalado con un indicador de niveles con el objeto de vigilar el desplazamiento del fluido durante la inyección.

- Después del tanque hay una válvula de paso y un filtro (1 micrón) para eliminar partículas sólidas que puedan obstruir los conductos de la bomba dosificadora.

- Un rotámetro colocado antes de la bomba dosificadora y un manómetro (después de la bomba) que son necesarios para una información completa del gasto y presión de inyección del trazador.

- Una bomba dosificadora que dosifica la cantidad de trazador durante un período predeterminado y se obtiene la presión de inyección que cada caso requiere.

- Una válvula "CHECK" para prevenir posibles bloqueos durante la inyección o flujos imprevistos del pozo hacia la bomba.

- El dispositivo de inyección se deberá probar a condiciones normales de trabajo antes de inyectar el trazador radiactivo, utilizando un compuesto fluorescente diluido en un fluido similar al de inyección. En caso de existir alguna fuga en el sistema, se detecta y corrige fácil y rápidamente.

#### 4.2.4 Dispositivos para recolección de muestras.

En realidad no hace falta diseñar un dispositivo especial para el muestreo.

Es posible utilizar cualquier recipiente de volumen apropiado, construido con materiales resistentes e impermeables, que pueden ser botellas de plástico.

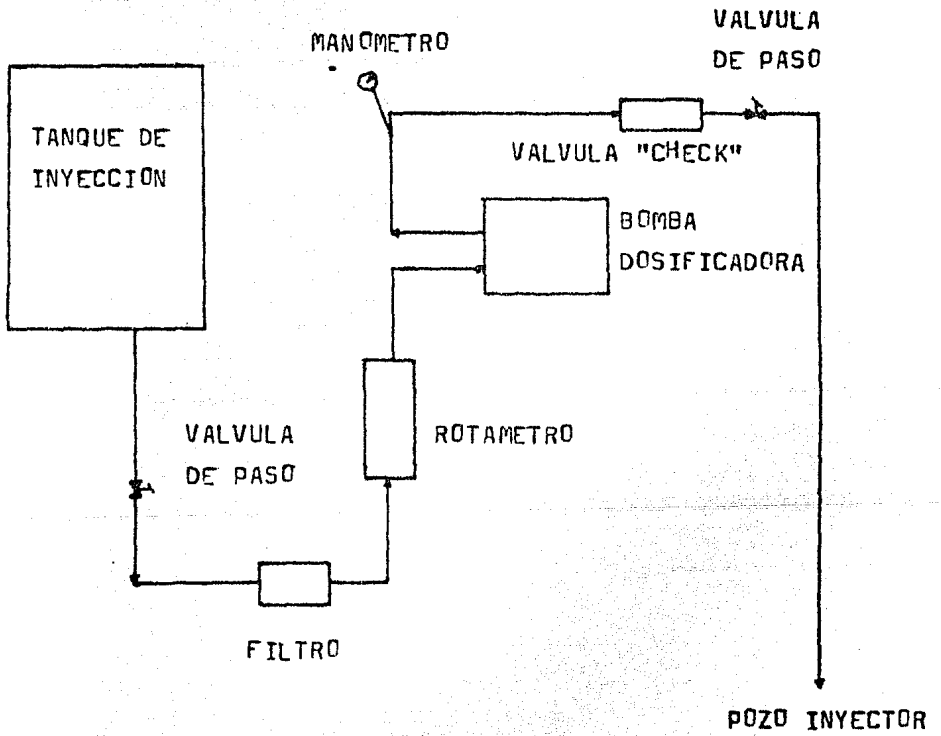


FIG. 21

Diagrama de Dispositivo de Inyección del Trazador.

#### 4.3 - Elección del punto de inyección:

El trazador se inyecta en el o los pozos seleccionados de antemano de acuerdo con la información que se busca.

Además en cada experiencia se eligen los pozos de inyección tomando en cuenta la disposición de los pozos productores vecinos.

El punto de inyección se escoge lo más cerca posible de la cabeza del pozo (árbol de válvulas) para evitar contaminaciones en la tubería, válvulas, bombas y demás equipo o accesorios.

Simultáneamente se reducen o evitan los riesgos en caso de presentarse algún accidente, como por ejemplo, fugas o roturas en las líneas de inyección.

Se recomiendan instalar una válvula "CHECK" en la línea, antes del punto de inyección, para evitar que el fluido regrese en caso de que la presión de inyección cese repentinamente o porque la formación no acepte más agua, el trazador se añade al fluido de inyección mediante una bomba de dosificación calibrada de manera que solo suministre unos pocos mililitros por minuto.

En la mayoría de los casos se agrega al trazador un colorante soluble en agua, del tipo "fluorescein" con el propósito de detectar posibles fugas del sistema.

El período de inyección del trazador es función del espaciamiento entre pozo de inyección y productores, de la porosidad y permeabilidad del yacimiento y del trayecto que recorre el trazador.

Generalmente se elige un período de inyección de un día o de dos de acuerdo con los resultados de trabajos experimentales.

No se aconsejan períodos largos a menos que se inyecten cantidades extremadamente pequeñas de radiotrazador y que el período de inyección se prolongue durante un período semejante al tiempo de tránsito del trazador entre el pozo de inyección y el productor.

4.3.1 Elección de los pozos para recolección de muestras. Se recolectarán muestras en los pozos productores más cercanos al punto de inyección y además en aquellos que de acuerdo con los datos de producción guarden una cierta relación con el pozo de inyección.

Desde luego es obvio que el muestreo se debe efectuar en los pozos alejados del pozo de inyección en los que la producción de agua aumente bruscamente en fecha posterior a la inyección del radiotrazador, en cuyo caso, el muestreo debe ser más frecuente y abarcar todos los pozos en que se detecte dicho aumento.

El período de recolección de muestras en los pozos productores cercanos se planea de acuerdo con las características particulares de cada campo, pero es conveniente establecer un programa básico, que con ciertas modificaciones sea aplicable en la mayoría de los casos :

- La semana inmediata posterior a la fecha de inyección del radiotrazador, el muestreo deberá ser frecuente, por lo menos dos veces al día.
- La segunda semana se recolectará una muestra diaria.
- Posteriormente durante un período mínimo de dos meses, se recolectarán 3 muestras a la semana.
- Finalmente se recolectará una muestra semanal hasta finalizar el estudio de radiotrazado.

#### 4.3.2 Volumen de las muestras.

Se considera conveniente que el volumen de las muestras sea de 1000 ml. con el objeto de disponer de la cantidad suficiente de agua, para repetir los análisis en casos de duda.

De cada muestra recolectada, se envía al laboratorio de Radioquímica en la Cdad. de México 20 ml., el resto del agua se almacena un tiempo razonable en el mismo recipiente, hasta que se conozcan los resultados de los análisis radiactivos. La muestra debe ser representativa, tomada directamente de la línea de producción (I.P.) y no del volumen muerto en la cabeza del pozo productor.

#### 4.4 Diagrama de etapas de un estudio de radiotrazado.

En la FIG. 23 muestra los pasos necesarios para un estudio de radiotrazado de un modelo de campo petrolero.

En la formulación de requisiciones para la obtención del tritio en forma de agua tritiada, se adquiere por conducto del "Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares" (ININ), la cual solicita directamente a los centros de producción de radioisótopos en el extranjero, a petición expresa del usuario, uno o varios radioisótopos de acuerdo con las cantidades autorizadas previamente por la "Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias" .

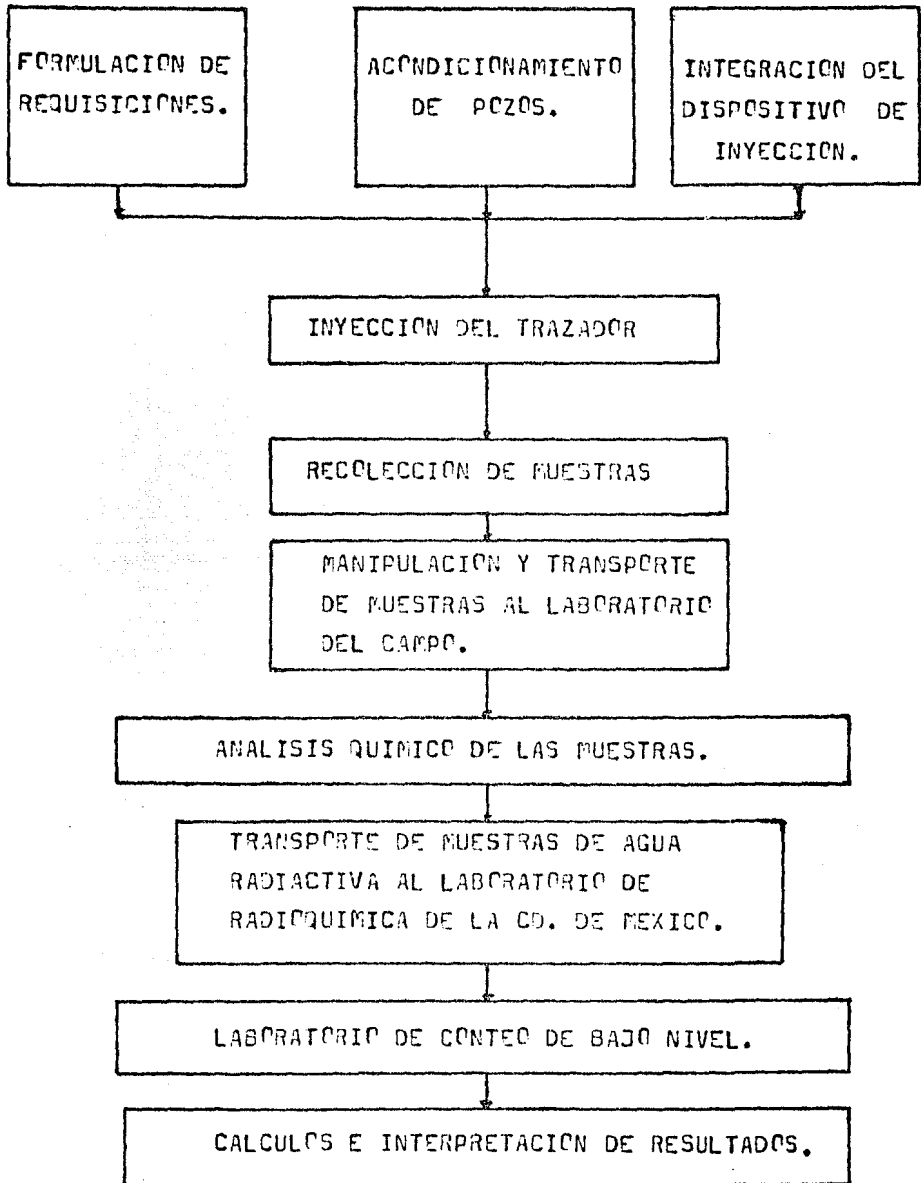


FIG. 23

Diagrama de Etapas de Radiotrazado de un Campo Petro-  
lero.



#### 4.5 Análisis de las muestras.

##### 4.5.1 Laboratorio del campo petrolero.

Las muestras de los pozos de producción, generalmente están constituidas por una emulsión que contiene agua y aceite en diferentes proporciones.

Un laboratorista recolectará las muestras de crudo en el campo y efectuará las manipulaciones del caso para separar agua y aceite.

El laboratorista determinará el porcentaje de agua, la salinidad en ppm (partes por millón) y el pH en todas las muestras recolectadas durante el estudio, se lleva un registro de control de recolección de muestras y finalmente antes de enviar las muestras al laboratorio de Radioquímica se etiquetan frascos de 20 ml. de agua de manera que fuera posible identificarlas fácil y rápidamente.

##### 4.5.2 Laboratorio de radioquímica.

Las muestras de agua que se reciben del campo petrolero generalmente contienen sólidos en suspensión (sulfatos, carbonatos, cloruros, etc.) que impiden se obtenga una mezcla homogénea entre la muestra y el centellador líquido con la consiguiente reducción en la eficiencia del detector, por esta razón todas las muestras se deberán destilar antes de contarlas.

El laboratorio de Radioquímica cuenta una serie de destiladores, cuyos dispositivos son:

- Bomba de vacío.
- Manómetro tipo "U" .
- Calentadores de placa con control de temperatura por termóstato.

- Botellas para destilación (destiladores).
- Matraces erlenmeyers.
- Válvulas y conectores de vidrio.
- Estructuras de soporte.

La destilación se debe efectuar lentamente para eliminar la mayor cantidad de sales y dentro de un sistema cerrado para evitar fugas de vapores con concentraciones muy pequeñas de tritio, que pudieran aumentar el valor de la radiación de fondo en el laboratorio.

La separación se realiza dentro del recipiente (destilador) al que se aplica un vacío moderado para bajar la presión de vapor y el punto de ebullición del agua.

También se lleva un registro de control de muestras de aguas radiactivas.

#### 4.5.3 Laboratorio de conteo de bajo nivel.

Para contar las muestras de agua radiactiva se dispone un laboratorio de conteo de bajo nivel del Departamento de Aplicación de Tecnología Nuclear en el Instituto Mexicano del Petróleo.

El equipo de detección del Departamento de Aplicación de Tecnología Nuclear consiste esencialmente de un detector de centelleo líquido marca "Packard TriCarb 460-C" con capacidad para 460 muestras de 20 ml. cada una, la operación del detector es totalmente automática.

El sistema "Packard TriCarb 460-C", consiste de las siguientes partes:

- Detector de centelleo (2 tubos fotomultiplicadores).

- Portamuestra automática.
- Espectralizador.
- Sistema de control de manejo.
- Programas de conversación
- Video, y
- Procesadora de datos en papel.

En relación con la determinación del contenido de tritio en las muestras de agua, se establecen algunos lineamientos generales :

- Se preparan simultáneamente varias muestras destiladas previamente mezclándolas con el centellador marca Instagel (10 ml. de agua y 10 ml. de centellador) y depositándolas en los contenedores de polietileno de 25 ml. que se colocan en el portamuestras del detector.

- En el tablero de control del detector se selecciona el tiempo de conteo o bien un número mínimo de cuentas.

- Las muestras son transportadas por una banda hasta la celda de conteo y después de la medición son retiradas automáticamente, los resultados de las mediciones se pueden expresar en dpm o cpm (desintegraciones por minuto o cuentas por minuto).

- Con una máquina eléctrica de escribir se imprimen los resultados automáticamente y demás información necesaria en una hoja especial, por ejemplo :

Número de programa.

Número de muestra (dentro del programa).

Tiempo de conteo.

cpm/K y % de desviación en la región A.

cpm/K y % de desviación en la región B.

Actividad de la muestra en dpm y cpm .

Donde :  $K$  = Factor de división (depende del núcleo)  
para el tritio  $K = 1.00$

$$\text{cpm}/K = \text{Cuentas} - \text{Fondo}/\text{Tiempo}$$

$$\% \text{ Desviación} = 200/\sqrt{\text{total de cuentas}} = 2\sigma\%$$

$$\sigma = 1/\sqrt{\text{cuentas}}$$

- Con el propósito de tener un control estricto acerca del funcionamiento del detector y para calcular la eficiencia del sistema de detección, se estableció un programa de conteo para intercalar un estándar por cada tres o cuatro muestras de agua.

$$E = \text{cpm}_s - \text{Fondo} / \text{dpm}_s$$

donde  $E$  es la eficiencia,  $\text{cpm}_s$  las  $\text{cpm}$  del estándar y  $\text{dpm}_s$  las  $\text{dpm}$  del estándar.

- Finalmente se lleva un registro de datos de  $\text{cpm}$  y  $\text{dpm}$  de cada muestra en una hoja de control de muestras.

- Los resultados de conteo se llevan al departamento de cómputo para la elaboración de gráficas, en la cual se interpretarán los patrones de flujo.

La forma de la curva de las gráficas de concentración del trazador, indicará el tipo de formación por la que se desplazó el trazador (formaciones homogéneas, fracturadas, altamente permeables, etc.).

Desde luego es posible calcular la velocidad de desplazamiento en la formación (desplazamiento del trazador), deducir las características de permeabilidad de la formación y determinar canalizaciones de la formación.

HOJA DE CONTROL DE MUESTRAS  
EN EL CAMPO PETROLERO .

CONTROL DE MUESTRAS

CAMPO: \_\_\_\_\_

Muestra No.	Pozo No.	Fecha	Hora	Volumen (mls. )	H <sub>2</sub> O (%)	Salinidad (PPM.)	PH	Laboratorista	Observaciones



HOJA DE CONTROL DE CONTEO DE BAJO NIVEL.

LABORATORIO DE CONTEO DE BAJO NIVEL

CAMPO : \_\_\_\_\_

Muestra No.	Pozo No.	Fecha	CONTEO		OBSERVACIONES
			cpm	dpm	

## CAPITULO V

## INTERPRETACION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

## 5.0 Cálculos de un estudio de radiotrazado.

Para interpretar los resultados de cálculo de la actividad del radiotrazador, se consideran todos los aspectos relacionados de una forma u otra en el estudio de radiotrazado.

Supóngase que se desea estudiar la zona de influencia de un pozo inyector de un modelo de campo petrolero, que tiene los datos siguientes :

- No. de pozos productores ..... 6 pozos  
(P1,P2,P3,P4,P5,P6)
- No. de pozos de inyección ..... 1 pozo (PI)
- Espaciamiento promedio entre pozo de inyección y pozo productor ..... 500 metros.
- Espesor efectivo del yacimiento (promedio) ..... 50 metros.
- Porosidad (promedio) ..... 16 %
- Gasto de inyección ..... 300 m<sup>3</sup>/dfa
- Producción promedio de agua en los pozos ..... 1 m<sup>3</sup>/dfa



### 5.1 Datos del radiotrazador.

Forma físico-química ..... agua tritiada .  
 Cantidad total de tritio ..... 50 Curies .  
 Volumen total (ampolleta) ..... 10 ml .  
 Concentración total ..... 5 Curies/ml .

### 5.2 Dilución del trazador.

La concentración inicial de tritio es alta comparada con la concentración final de las muestras.

El trazador experimenta una gran dilución, primero porque el agua tritiada que se recibe de los centros de producción de radioisótopos, en concentraciones, del orden de 5 Ci/ml, que se diluye en 100 L de agua que es el volumen del tanque del dispositivo de inyección, es decir que la concentración desciende a :

$$\begin{aligned} \text{Concentración} &= \frac{5 \text{ Ci/ml} \times 1 \times 10^6 \mu\text{Ci/Ci}}{100 \text{ L} \times 1000 \text{ ml/L}} \\ &= 50 \mu\text{Ci/ml} \end{aligned}$$

Al inyectar los 100 litros de agua tritiada dentro de la formación del yacimiento durante un período mínimo de 24 horas, si el gasto de inyección es de 300 m<sup>3</sup>/día, la concentración alcanza valores tan bajos como :

$$\begin{aligned} \text{Conc.} &= \frac{5 \text{ Ci/ml} \times 1 \times 10^6 \mu\text{Ci/Ci}}{(300 \text{ m}^3 \times 1000 \text{ L/m}^3 \times 1000 \text{ ml/L}) + (100 \text{ L} \times 1000 \text{ ml/L})} \\ &= 1.6 \times 10^{-2} \mu\text{Ci/ml} \end{aligned}$$

### 5.3 Actividad Mínima Detectable (A.M.D.).

Es necesario conocer la A.M.D. de las muestras de agua triada recolectadas en los pozos productores.

La Actividad Mínima Detectable se obtiene de acuerdo con las características del equipo de centelleo líquido, el tiempo de conteo y el volumen de las muestras.

Datos del equipo de centelleo líquido "Packard TriCarb 460-C":

- Volumen máximo de muestra ..... 10 ml .
- Fondo promedio ( $\bar{F}$ ) del detector  
en un período de 30 minutos ..... 900
- Tiempo máximo de conteo para  
cada muestra ..... 30 minutos .
- Eficiencia del detector ..... 5 %
- Límites permisibles de detección  
de concentración de la muestra .....  $5 \times 10^{-9} \mu\text{Ci/ml}$

Por lo tanto si  $\bar{F} = 900$  cuentas o desintegraciones (en 30 min.), la desviación estándar será :

$$\sigma = \sqrt{\bar{F}/t_{\text{máx.}}} = \sqrt{900/30}$$

$$\sigma = 5 \text{ dpm}$$

De la ecuación 16 del inciso 1.13.3 , la Actividad Mínima Detectable es :

$$\text{A.M.D.} = \frac{2 \sigma}{3.7 \times 10^{10} \text{ dps/Ci} \times 60 \text{ seg/min} \times \text{Ci}/1 \times 10^6 \mu\text{Ci} \times E V}$$

donde E = eficiencia del detector.

V = volumen de la muestra.

$$\text{A.M.D.} = 9.0 \times 10^{-7} (\sigma/E V) \mu\text{Ci/dpm}$$

$$(\sigma/E V) = 5 \text{ dpm}/0.05 \times 10 \text{ ml} = 10 \text{ dpm/ml}$$

$$\begin{aligned} \text{A.M.D.} &= 9.0 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/dpm} \times 10 \text{ dpm/ml} \\ &= 9.0 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/ml} \end{aligned}$$

Este valor permite detectar en el "Packard TriCarb 460-C" que tiene un límite de detectabilidad del orden de  $5 \times 10^{-9} \mu\text{Ci/ml}$ , por lo que está dentro de los límites permisibles de detección.

#### 5.4 Actividad del tritio en el punto de inyección.

Una vez establecida la A.M.D., se calcula la cantidad del tritio que debe inyectarse para obtener lecturas (en las muestras) del orden señalado anteriormente.

Para ésto es preciso conocer las características de la formación, dilución del trazador, tiempo de tránsito del trazador entre el punto de inyección y el punto de "muestreo".

##### a. Tiempo de tránsito.

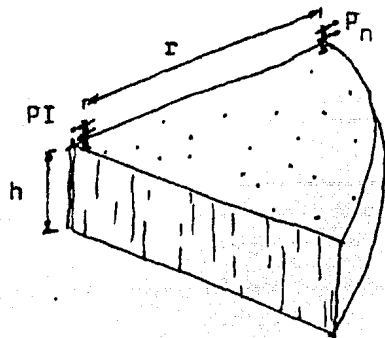
Suponiendo que los 6 pozos productores están situados simétricamente con respecto al punto de inyección, el tiempo de tránsito ( $T_t$ ) estará dado por la siguiente expresión :

$$T_t = \frac{V \varphi}{Q}$$

donde  $V = \frac{\pi r^2 \times h}{n}$

por lo tanto:

$$T_t = \frac{\pi r^2 \times h \times \varphi}{n \times Q}$$



Formación del yacimiento

$r$  = Distancia promedio entre pozos.

$h$  = Espesor efectivo de la formación.

$\phi$  = Porosidad promedio.

$Q$  = Gasto de inyección diario.

$n$  = Número de pozos productores.

$$T_t = \frac{\pi \times (500)^2 \times 50 \times 0.16}{300 \times 6}$$

$$= 3490 \text{ días.}$$

Con base en una serie de experiencias de laboratorio y de trabajos de campo, se estableció que el tiempo que tarda en fluir el radiotrazador por un pozo productor, es aproximadamente igual a un cuarto del tiempo de tránsito del fluido entre el punto de inyección y el pozo productor:

$$T_F \cong 1/4 T_t = 1/4 \times 3490 = 872.5$$

Donde  $T_F$  = tiempo que tarda el trazador en fluir por el pozo productor.

$$T_F = 873 \text{ días.}$$

b. Actividad Mínima para Inyección.

La actividad mínima para inyección (A.M.I.) está relacionada por :

$$A.M.I. = \text{Producción/dfa} \times n \times T_F \times A.M.M$$

De la ec. 17 del inciso 1.13.3 , la actividad mínima medible es;

$$A.M.M. = \frac{10\sigma}{3.7 \times 10^{10} \text{ dps/Ci} \times 60 \text{ seg/min.} \times \text{Ci}/1 \times 10^6 \mu\text{Ci} \times \text{EV}}$$

$$= 4.5 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/dpm} (\sigma / \text{EV})$$

como  $(\sigma / \text{EV}) = 10 \text{ dpm/ml.}$

entonces  $A.M.M. = 4.5 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/ml.}$

Por lo tanto la actividad mínima medible por metro cúbico es:

$$A.M.M. = 4.5 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/ml} \times 1 \times 10^6 \text{ ml/m}^3$$

$$= 45 \mu\text{Ci/m}^3$$

Ahora calculando la Actividad Mínima para Inyección :

$$A.M.I. = 1 \text{ m}^3/\text{dfa} \times 6 \times 873 \text{ días} \times 45 \mu\text{Ci/m}^3$$

$$= 23.57 \times 10^4 \mu\text{Ci} = 235.7 \text{ mCi}$$

Para tener un margen de seguridad en la detección del radioisótopo es conveniente inyectar una cantidad 3 veces mayor que la calculada :

$$A.M.I. = 3 \times 235.7 = 707.13 \text{ mCi}$$

### 5.5 Corrección por decaimiento.

Las muestras de agua tritiada se recolectarán después de que transcurran entre 6.33 y 7.9 años. La vida media del tritio es de 12.43 años, por esta razón es preciso incluir en los cálculos un factor de corrección por decaimiento.

Del cuadro de decaimiento del tritio del inciso 2.3 se tiene que la cantidad original del tritio después de 7.9 años disminuye el 35%, permaneciendo sin decaer el 65% de la cantidad inicial.

O sea que una vez transcurridos 7.9 años existirán únicamente 460 milicuries en lugar de los 707 milicuries. Entonces se desea que al finalizar la experiencia exista una actividad total equivalente a 707 milicuries, se inyectarán 1005 milicuries.

$$\begin{aligned} (\text{A.M.I.})_{\text{corregidos}} &= 1005 \text{ mCi} \\ &= 1.005 \text{ Curies} . \end{aligned}$$

### 5.6 Concentración del tritio en el fluido de inyección.

Si el período de inyección del trazador es de 24 horas, significa que los 1005 milicuries se diluyen en  $300 \text{ m}^3$  :

$$\begin{aligned} \text{Concentración} &= \frac{1005 \text{ mCi} \times 1 \times 10^3 \mu\text{Ci/mCi}}{300 \text{ m}^3 \times 1 \times 10^6 \text{ ml/m}^3} \\ &= 3.35 \times 10^{-3} \mu\text{Ci/ml} \end{aligned}$$

De igual forma, si el período de inyección es de 48 horas:

$$\begin{aligned} \text{Concentración} &= \frac{1005 \text{ mCi} \times 1 \times 10^3 \mu\text{Ci/mCi}}{(2 \times 300 \text{ m}^3) \times 1 \times 10^6 \text{ ml/m}^3} \\ &= 1.66 \times 10^{-3} \mu\text{Ci/ml} \end{aligned}$$

Por lo tanto la Concentración Máxima Permisible de tritio en agua para áreas restringidas según las guías de protección contra la radiación (G.P.R.) señalan un valor de  $3 \times 10^{-1} \mu\text{Ci/ml}$ , por lo que las concentraciones del tritio en el fluido de inyección están por abajo de los límites permisibles.

### 5.7 Inyección del trazador.

a. Concentración de tritio en el tanque de inyección con A.M.I. corregidos :

Vol. del tanque de inyección = 100 litros.

(A.M.I.)<sub>corregidos</sub> = 1005 milicuries .

$$\begin{aligned} \text{Concentración} &= \frac{1005 \text{ mCi} \times 1 \times 10^3 \mu\text{Ci/mCi}}{100 \text{ L} \times 1000 \text{ ml/L}} \\ &= 10.05 \text{ Ci/ml} \end{aligned}$$

b. Gasto de inyección:

Para período de inyección de 24 horas.

$$Q_{\text{iny.}} = \frac{100 \text{ L} \times 1000 \text{ ml/L}}{24 \text{ horas} \times 60 \text{ min/hora}} = 69.44 \text{ ml/min} .$$

Para período de inyección de 48 horas.

$$Q_{\text{iny.}} = \frac{100 \text{ L} \times 1000 \text{ ml/L}}{48 \text{ horas} \times 60 \text{ min/hora}} = 34.74 \text{ ml/min} .$$

c. Flujo de tritio en el tanque de inyección:

$$F = \frac{10.05 \mu\text{Ci/ml}}{69.44 \text{ ml/min}} = 0.1447 \mu\text{Ci/min} \quad (\text{en 24 horas})$$

$$F = \frac{10.05 \mu\text{Ci/ml}}{34.74 \text{ ml/min}} = 0.2892 \mu\text{Ci/min} \quad (\text{en 48 horas})$$

d. Presión máxima de descarga de la bomba dosificadora:

$$P_d = 5000 \text{ Lb/in}^2 \quad \text{o} \quad 340.25 \text{ Kg/cm}^2$$

## TABLA DE RESULTADOS

Datos finales para un estudio de radiotrazado de un modelo de campo petrolero :

CONCEPTO	VALOR CALCULADO
Concentración total del tritio.	5 Ci/ml
Dilución del trazador en el tanque de inyección.	50 $\mu$ Ci/ml
Dilución del trazador con el fluido de inyección.	$1.6 \times 10^{-2}$ $\mu$ Ci/ml
Actividad Mínima Detectable (A.M.D.)	$9.0 \times 10^{-6}$ $\mu$ Ci/ml
Tiempo de tránsito del fluido.	873 días.
Actividad Mínima para Inyección corregido (A.M.I.) <sub>corr.</sub>	1005 mCi
Concentración del tritio en el fluido de inyección.	$3.35 \times 10^{-3}$ $\mu$ Ci/ml (24h.) $1.66 \times 10^{-3}$ $\mu$ Ci/ml (48h.)
Concentración del tritio en el tanque de inyección con (A.M.I.) <sub>corr.</sub>	10.05 $\mu$ Ci/ml
Periodo de gasto de inyección en el tanque de inyección.	69.44 ml/min. (24h.) 34.74 ml/min. (48h.)
Flujo de tritio en el tanque de inyección con (A.M.I.) <sub>corr.</sub>	0.1447 $\mu$ Ci/min. (24h.) 0.2892 $\mu$ Ci/min. (48h.)



Los valores calculados anteriormente están relacionados estrechamente con la información que se espera obtener como resultado de la aplicación de las técnicas de radiotrazado, por lo que tanto el período de inyección como la cantidad total del trazador que se utiliza en trabajos de radiotrazado, debe estar por encima de los valores calculados después de considerar las condiciones más severas.

El programa completo de radiotrazado, comprende no solamente la inyección del radioisótopo y su detección en las muestras de agua recolectadas en los pozos productores, una parte importante del programa es la interpretación de la información que se obtiene durante toda la experiencia.

## CONCLUSIONES

El refinamiento de los equipos electrónicos permite detectar concentraciones de tritio del orden de 10 unidades de tritio por litro de agua.

Además en caso de que la concentración sea menor, existe la posibilidad de emplear técnicas de enriquecimiento, por ejemplo :

- Electrólisis.
- Difusión térmica.
- Destilación o separación cromatográfica .

Para la aplicación inmediata de estas técnicas, se debe considerar lo siguiente :

- Se requiere un grupo de técnicos que domine perfectamente lo relacionado con la manipulación de los radiotrazadores en el laboratorio (dilución del radioisótopo) y en el campo (inyección del trazador y recolección de muestras).

- Se debe tener un conocimiento completo de la geología de la región, del campo petrolero que se estudia y del yacimiento en particular.

- Aplicación de otros radiotrazadores como por ejemplo Iridio-192, para observar el comportamiento del desplazamiento del fluido a través del yacimiento.

La información que se obtiene durante la experiencia, debe ser analizada cuidadosamente, por el grupo de técnicos responsables de la planeación y ejecución del proyecto. .

La planeación de los trabajos de campo y la interpretación de los resultados estará a cargo de un grupo de técnicos de Pemex y del Instituto Mexicano del Petróleo constituido en la siguiente forma :

- Un ingeniero del Departamento de Aplicación de Tecnología Nuclear.
- Un geólogo de explotación.
- Un ingeniero petrolero especialista en ya cimientos.

El departamento de Aplicación de Tecnología Nuclear de I.M.P. coordinará los trabajos de campo y laboratorio.

El ingeniero petrolero y el geólogo (Pemex) deberán conocer con detalle el campo donde se realicen los estudios de radio trazado.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el tritio es el trazador indicado en estudios de radiotrazado entre pozos relacionados con la recuperación secundaria por inyección de agua.

La vida media del tritio (12.43 años), permite realizar estudios a largo plazo, pues aún después de transcurrir varios años, se detecta con relativa facilidad. Esta característica del tritio, lo convierte en uno de los pocos traza dores realmente útiles en la determinación de patrones de flu jo y de las relaciones que existen entre los pozos de injec ción y de producción.

El tritio emite partículas Beta de muy baja energía, lo cual permite manipularlo con facilidad; no es necesario utilizar blindajes como protección contra irradiación externa, pues las partículas Beta son frenadas totalmente por una lámina de 5 micras de espesor de cualquier material cuya densidad sea igual a la unidad.

Los principales riesgos son la irradiación interna, es decir por ingestión de agua tritiada, por inhalación de vapores tri tiados y por absorción de tritio a través de la piel y pulmo- nes. El máximo riesgo externo, se presenta cuando se sumer-

Gen las manos en agua tritiada y consiste en quemaduras de la piel.

De todos los métodos conocidos para determinar el contenido de tritio en los fluidos de producción, el que presenta mayo ras ventajas, es el de centelleo líquido, sobre todo cuando se desea contar un gran número de muestras.

El detector de centelleo líquido es caro, pero aún así, un solo programa de radiotrazado, justifica la inversión.

En general el método de radiotrazado proporcionará información útil para diferentes estudios; además el grupo técnico puede proporcionar datos o descubrir otras aplicaciones a los datos que se obtienen en un estudio de radiotrazado entre pozos, de acuerdo con las características o particularidades de los campos petroleros.

Los trazadores radiactivos son herramientas valiosas en la solución de problemas complicados en Ingeniería y tiene importancia como técnicas auxiliares en diferentes ramas de la investigación petrolera.

En la Industria Petrolera, los radioisótopos tienen un campo de aplicación muy grande. En varios casos, las técnicas se han desarrollado en instalaciones petroleras, desde la explo ración superficial, perforación, exploración del subsuelo, producción, transporte de hidrocarburos, refinación y procesos petroquímicos hasta el control de calidad de los productos elaborados.

Actualmente, en los países productores de petróleo, en aquellos que los refinan y en los que trabajan con derivados se utilizan dispositivos nucleares, técnicas de radiotrazadores y fuentes de radiación en gran escala, las razones son muy simples :

ECONOMIA Y CONFIABILIDAD de las técnicas radioisotópicas.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 . Manual de instrucción programada.  
Pruebas NO-destructivas. Vol. I Origen y Naturaleza  
de la Radiación. 1a. ed. 1981, Pívico S.A.
- 2 . Nuclear Radiation Detection.  
William J. Price . 2nd. ed. Mc. Graw-Hill, N.Y. 1964 .
- 3 . The atomic nucleus.  
Evans Robley D. 2nd. ed. Mc. Graw-Hill, N.Y. 1955 .
- 4 . Física Nuclear.  
W. E. Burcham. Ed. Reverté imp. Spain, 1974 .
- 5 . Radioisotope Measurement Applications in Engineering.  
Gardner Ely . Reinhold Publishing Corp., 1967 .
- 6 . Principles of Radioisotopes Methodology.  
Chase G. Rabinowitz J. Burgess Publishing Co., 1965.
- 7 . Radiological Health Handbook.  
U.S. Department of Health, Education, and Welfare .  
Washington 25, D.C. 1960 .
- 8 . Notes on Radioactivity and Radiation Detectors.  
H. R. Ciancaglini . International Atomic Energy Agency  
Vienna, Sept. 1974 .
- 9 . Nuclear Reactor Engineering.  
Samuel Glasstone and Alexander Sesonske.  
3a. ed. Van Nostrand Reinhold Co. 1976 .

10. Liquid Scintillation Counting of Tritium.  
Royal W. Benson and Robert L. Maute .  
Analytical Chemistry . Vol. 34, No. 9, August 1962,  
pp. 1122-1124 .
11. The Application of Spectral Analysis in Liquid Scin-  
tillation Counting.  
J. G. Ring. , D. C. Nguyen, L. J. Everett.  
Packard Instrument Co, Inc. 1978 .
12. A Universal Liquid Scintillation Cocktail for Aqueous  
and Nonaqueous Samples. Insta-gel .  
Packard Instrument Co., Inc. 1978 .
13. Method for Counting Tritium in Tritiated Water.  
James Wing , W. H. Johnston .  
Science, Vol. 12, 5May. 1955, pp. 574-576 .
14. Liquid Scintillation Counting of Tritiated Organic  
Compounds.  
Marvin L. Whisman, Burton W. Eccleston, F. E. Armstrong .  
Analytical Chemistry , Vol. 32, No. 4, April 1960, pp.  
484- 485 .
15. The Statistics of Radioactivity Measurement.  
J. Chem. Educ., 36, 128 (1959) .
16. How to Apply Statistics to Nuclear Measurements.  
Nuclear Chicago Technical, Bulletin No. 14, 1972 .
17. Specific Activities and Half Lives of Common Radionuclides.  
Goldstein. G., and Reynolds, S.A.  
Nuclear Data A, Vol. 1, No. 5 (July 1966) pp. 435-452 .

18. Isotopic Analysis of Tritiated Water.  
Claude Genty and Guy Reversat.  
Analytical Chemistry, Vol. 45, No. 9 (August 1973)  
pp. 1710-1715 .
19. Large-scale Utilization of Tritium in Hydrologic Studies.  
Erik Erikson.  
International Meteorological Institute, Stockholm, Sweden.
20. The Production Rate of Natural Tritium.  
Harmon Craig and Devendra Lal.  
Tellus XIII, 1961, 1 .
21. The Geochemistry of Tritium.  
Bruno J. Giletty, Fernando Bazán.  
Transactions, American Geophysical Union, October 1956,  
pp. 807-818 .
22. Tritium Instrumentation for Environmental and Occupational Monitoring.  
Robert J. Budnitz.  
Health Physics, Vol. 26, (Feb. 1974), pp. 165-178 .
23. Quantitative Determination of Tritium in Natural Waters.  
C. M. Hoffman and G. L. Stewart.  
Radiochemical Analysis of water, 1966, Washington.
24. Survey of Systems for Concentration and Low Background Counting of Tritium in Water.  
J. F. Cameron.  
International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 543-573 ,  
SM-87/25 . 1972
25. Determination of Natural Tritium.  
A. E. Bainbrigde . The Review of Scientific Instruments,  
Vol. 36, No. 12, Dec. 1965, pp. 1779-1783 .

26. Tritium Protection.  
Baker , Isotonic, Enero 1956 .
27. Guía General de Seguridad Radiológica para Usuarios de Materiales Radiactivos.  
C.N.E.N. , Dir. Gral. de Seg. Rad., 1976 .
28. Principles of Radiation Protection.  
Eaves. , Ilife Books, 1964 .
29. Sistematización de los Trabajos de Geología de Explotación para Estudios de Yacimientos.  
Martínez Ríos M.  
Ingeniería Petrolera, Vol. 3, No. 2, Julio 1962 .
30. Recuperación Secundaria por Inyección de Agua.  
James G. Tanner .  
Ingeniería Petrolera, Vol. VIII, No. 8, Agosto 1968 .
31. Importancia del Conocimiento Geológico de los Yacimientos Petrolíferos para su Mejor Explotación.  
Subdirección de Tecnología de Explotación, I.M.P.
32. La Geología como Auxiliar en la Explotación de los Yacimientos Petrolíferos .  
Perez Matus J. D. Tesis 1965 IPN .
33. Geología de Subsuelo Aplicada a la Industria Petrolera.  
Castillón S. Tesis 1969 UNAM.
34. Physical of Oil Production.  
Secondary Recovery, Chap. 12, pp. 645-680, 1968 .



**Sitios en donde se obtuvo Información Bibliográfica:**

- Biblioteca de la Subdirección del Desarrollo Personal.
- Departamento de Aplicación de Tecnología Nuclear.

Instituto Mexicano del Petróleo.