

07.68.03

C. N. E. A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 3	Año 1968

EN- 1/6

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

DETECCION DE MATERIALES A LA SALIDA DE UNA PLANTA INDUSTRIAL
MEDIANTE EL USO DE TRAZADORES RADIACTIVOS

- ESTUDIO DE VIABILIDAD -

Antonio C. Castagnet - Hector Rodolfo Gomez - Alberto H. Lammirato
Departamento de Aplicación

Buenos Aires - septiembre 1968

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

DETECCION DE MATERIALES A LA SALIDA DE UNA PLANTA INDUSTRIAL
MEDIANTE EL USO DE TRAZADORES RADIACTIVOS

- ESTUDIO DE VIABILIDAD -

Antonio C. Castagnet - Hector Rodolfo Gomez - Alberto H. Lammirato
Departamento de Aplicación

Buenos Aires - septiembre 1968

CONTENIDO

<u>SECCION</u>	<u>PAG.</u>
1.0.0 OBJETIVO, BASES Y FUNDAMENTO DEL ESTUDIO	2
2.0.0 SELECCION DEL TRAZADOR RADIOACTIVO	3
3.0.0 TECNICAS DE MARCACION	5
4.0.0 TECNICAS DE DETECCION	8
5.0.0 RESULTADOS Y CONCLUSIONES	13

NOTA: Ilustraciones y gráficos al final del texto.

RESUMEN

A solicitud de una empresa local se estudió la posibilidad de implantar en una fábrica, - dentro de razonables condiciones técnicas, económicas y de seguridad, - un sistema rutinario de control basado en el uso de radioisótopos, para detectar a distancia la salida de determinados materiales transportados sin autorización.

Los materiales considerados en el presente trabajo fueron: el mercurio contenido en instrumentos de medición y control y las cañerías de cobre de instalaciones fijas de la planta industrial.

El estudio incluyó la selección del trazador radiactivo más adecuado, la evaluación experimental de las técnicas de marcación y las bases de diseño e instalación del sistema de detección.

Se adoptó finalmente ^{110m}Ag para la marcación de ambos materiales incorporándola como amalgama en el caso del mercurio (actividad específica $0,5 \mu\text{c/g Hg}$) y como nitrato sobre el caño de cobre en zonas localizadas cuya superficie fué previamente decapada para facilitar la fijación de la plata metálica por desplazamiento "redox". La actividad incorporada en este último caso fué de $5 \mu\text{c/cm}$.

Las actividades mínimas detectables en las condiciones supuestas a la salida de planta resultaron de $150 \mu\text{c}$ para el Hg (300 g) y $50 \mu\text{c}$ para el cobre, aconsejándose en este último caso efectuar una marcación localizada cada metro de tubería.

Como sistema de detección se adoptaron baterías de 6 tubos G.M. conectadas a integradores electrónicos y circuitos de alarma individuales. Las baterías de detección se instalarían a la salida de la planta, frente a los relojes fichadores del personal, desde que la operación de fichar brinda una situación favorable (tiempo y distancia fuente-detector) para la medición.

Los niveles de actividad requerida y condiciones en que dicha actividad quedaría incorporada a los productos marcados, son compatibles con las normas de seguridad exigidas por la CNEA.

El costo de construcción e instalación de un sistema como el descripto, con 2 baterías de detección, incluyendo la marcación de los materiales, ha sido estimado en unos m\$ 1.500.000.-

1.0.0 OBJETIVO, BASES Y FUNDAMENTO DEL ESTUDIO

El presente estudio tiene por objetivo evaluar las posibilidades técnico-económicas de desarrollar e instalar en una planta industrial un sistema de control, basado en el uso de radioisótopos, para detectar a distancia la salida de determinados materiales transportados sin autorización.

Los materiales a marcar son mercurio metálico y caños de cobre. El mercurio es tá incorporado a equipos de control y registro, mientras que los caños de cobre son par te integrante de instalaciones fijas complementarias.

Las bases consideradas para seleccionar el radioisótopo, técnica de marcación y detección, fueron establecidas por la empresa que solicitó y contrató este estudio. Que dan aquí sintetizadas:

- La masa mínima de mercurio metálico a detectar en la salida de la fábrica es de 300 gr.
- La longitud mínima de cañería de cobre a detectar en la salida de la fábrica es de 1 m.
- El tiempo mínimo de detección ha sido fijado en 2 segundos.
- La masa de mercurio y la longitud de cañería a marcar será establecida, de común acuerdo, en caso de concretarse el servicio solicitado. Existen en fábrica aproximadamente 50 equipos de control con una masa de mercurio com prendida entre tres y seis kilos por equipo. Las cañerías de cobre a marcar están instaladas en lugares de difícil acceso y alejadas de los locales habitu ales de trabajo permanente.

La empresa que solicitó este estudio ha descartado, en principio, la posibilidad de aplicar otras técnicas distintas a las nucleares para resolver el problema plantea do; por esa razón no han sido confrontadas dichas técnicas con las nucleares.

2.0.0 SELECCION DEL TRAZADOR RADIOACTIVO

La naturaleza y las características físico-químicas de los materiales a controlar e identificar, conjuntamente con las condiciones y posibilidades de detección y medición, son factores asociados decisivos en la selección del radioisótopo a emplear como trazador radiactivo.

El radioisótopo elegido y la forma química que lo contiene deben responder satisfactoriamente a las siguientes consideraciones:

- a) Debe lograrse identidad y/o unión íntima entre el trazador radiactivo y su soporte, base o producto a marcar. Las pruebas de fijación destinadas a comprobar el grado de unión y estabilidad del conjunto mencionado, han de estar en relación con el uso, destino y las condiciones operativas previstas que pudieran, concebiblemente, alterar dicha unión.
- b) El radioisótopo debe emitir radiación gamma para facilitar la detección a distancia aún en bajas concentraciones. Existe un nexo cuantitativo entre la energía y la actividad a emplear con la distancia prevista "detector-fuente de radiación" y espesores de las masas interpuestas. La relación es directa. Este compromiso se resuelve con pruebas experimentales, planificadas de acuerdo a las condiciones operativas reales o previstas.
- c) El período de semidesintegración debe ser compatible con la duración de la experiencia.
- d) La concentración de actividad y su incorporación al compuesto marcado deben cumplimentar las normas de seguridad radiológica, establecidas por la CNEA.

Razones de disponibilidad y costo completan esta lista de consideraciones.

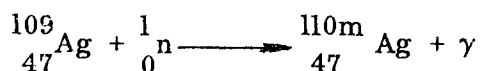
La ^{110m}Ag , emisor de radiación γ de mediana energía y 253 días de período de semidesintegración fue elegido entre otros radioisótopos ya que responde satisfactoriamente a las exigencias mencionadas. Por otra parte las propiedades físico químicas de la Ag se adaptan a las necesidades de la marcación prevista (Sección 3.0.0 y siguientes).

2.1.0 OBTENCION DEL TRAZADOR

Los radioisótopos artificiales empleados como trazadores en la industria, se producen, en la mayoría de los casos, en los reactores nucleares irradiando con neutrones blancos de materiales adecuados. También se obtienen algunos radioisótopos de los productos de fisión derivados del Uranio 235 ($^{235}_{92}\text{U}$) que se usa como

combustible en dichos reactores.

La ^{110m}Ag elegida en el presente estudio para marcar el mercurio y los caños de cobre, se obtuvo en el reactor R.A.1 de la CNEA irradiando alambres de plata de alta pureza. La reacción producida se puede simbolizar así:



$^{109}_{47}\text{Ag}$, Isótopo estable de la plata: abundancia relativa 47 %

${}^1_0\text{n}$, Neutrón térmico incidente sobre el blanco

$^{110m}_{47}\text{Ag}$, Radioisótopo obtenido y empleado como trazador

γ , Fotón de radiación gamma.

Irradiando la plata en un reactor se obtiene, al cabo de un tiempo t la siguiente actividad:

$$A = N' \lambda = N \phi \sigma (1 - e^{-0,693t/T_{1/2}}) \quad \left(\frac{\text{desintegraciones}}{\text{seg}} \right)$$

A , Actividad producida al final de la irradiación (des/seg)

N' , Número de átomos radiactivos formados durante el tiempo t

λ , Constante de desintegración del núclido formado (1/seg)

N , Número de átomos del blanco irradiado

ϕ , Flujo de partículas bombardeantes (neutrones térmicos) ($\text{n/cm}^2 \text{ seg}$)

σ , Sección eficaz de activación (Barns) $1 \text{ Barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$

$T_{1/2}$, Período de semidesintegración (seg).

La actividad específica de ^{110m}Ag producida en el reactor R.A.1 de la CNEA (Centro Atómico Constituyentes) con un flujo superior a $10^{12} \text{ n/cm}^2 \text{ seg}$ es del orden de 3,9 mc/g de Ag para una semana de irradiación y 14 mc/g de Ag para 4 semanas de irradiación.

Dos alternativas pueden preverse para adquirir la ^{110m}Ag necesaria para la posible marcación futura de los materiales a controlar e identificar: producirla en el reactor R.A.1 de la CNEA o bien importarla.

Las actividades específicas que pueden lograrse en el país han sido mencionadas. En el exterior con flujos superiores podría alcanzarse una actividad específica diez veces mayor. En este último caso deberá contemplarse el mayor costo de irradiación por unidad de tiempo y el costo de transporte adicional.

La actividad específica de ^{110m}Ag (mc/g de Ag) necesaria para marcar los materiales considerados aquí es fácil de alcanzar, con pocas semanas de irradiación, en el reactor R.A.1.

3.0.0 TECNICAS DE MARCACION

El núclido elegido como trazador, ^{110m}Ag , es isótopo de un metal con elevado potencial de reducción, que por otra parte se amalgama con cierta facilidad. Estas circunstancias sugirieron directamente las técnicas que podrían ser empleadas para marcar los ítems de mayor interés: el mercurio y el cobre.

3.1.0 MARCACION DEL MERCURIO

Se decidió preparar el núclido ^{110m}Ag por irradiación neutrónica de plata pura, de la especificada en joyería como "plata 1000". Para simplificar el manipuleo, se prefirió emplear alambre en vez de granallas o láminas, dado que, siendo de sección uniforme, se facilita el corte de trozos de masa constante. Para facilitar su disolución se aumentó su superficie laminando el alambre hasta obtener una cinta de plata, de unos 2 mm de ancho y unos 0,3 mm de espesor.

En el reactor R.A.1 se irradiaron trozos de dicha cinta, de peso conocido, del orden de 0,2 gramos cada uno. Luego de salir del reactor, la actividad de cada trozo resultó ser de unos 1.500 μc .

Para irradiar la cinta de plata se colocaron los trozos en cartuchos de aluminio, de los normalmente empleados con tal fin (Fig. 3.1).

En la Fig. 3.2 se puede observar el equipo destinado a la apertura de dichos recipientes de aluminio, que ofrece adecuada protección contra las radiaciones.

El traslado de los tubos ya abiertos se efectuó con recipientes blindados y un carro transportador especial (Fig. 3.3) diseñados ambos en este Departamento de Aplicación.

Para la marcación se pensó en principio disolver muestras de plata en mercurio, en condiciones de temperatura ambiente. Como este proceso dura algunos días (según ensayos conducidos con cinta no irradiada) hubo que recurrir a la disolución a mayor temperatura. Bajo campana y blindaje de plomo, se montó un sencillo aparato para calentar el mercurio hasta ebullición con reflujo. En esta forma se logró el completo ataque de la plata apenas el líquido comenzó a hervir.

En 90,7 gramos de mercurio se disolvieron así 0,2150 gramos de plata irradiada (3 mc). A los mencionados 90,7 gramos de mercurio se los diluyó hasta un total de 770 gramos, que contenían una actividad de 3 mc, y luego se trabajó con una dilución de actividad específica del orden de 1 $\mu\text{c/g}$ para los ensayos de detección (Sección 4.2.0).

3.2.0 MARCACION DEL COBRE

Se decidió marcar el cobre por desplazamiento redox, aprovechando que la plata tiene mayor potencial de reducción. Se buscó así resolver el problema de marcar tubería de cobre decapando ciertas zonas con un producto comercial, y depositando luego solución de nitrato de plata radiactiva.

Para preparar la solución trazadora se disolvieron tiras de plata radiactiva (3.1.0) en la cantidad estequiométrica de ácido nítrico comercial. Si bien se ensayó la posibilidad de que la simple aplicación de una o dos gotas de la solución resultante permitiera depositar unos 50 μc , se comprobó que una solución muy concentrada de Ag NO_3 , daba lugar a depósitos gruesos y esponjosos de plata y óxido de cobre pulverulentos, fácilmente desprendibles. También se constató que la adherencia y uniformidad de los depósitos mejoraba notablemente, si la solución se aplicaba con pincel en vez de gotero.

Finalmente en 3 ml de ácido nítrico concentrado se disolvieron 0,2115 gr de plata a la que se le amalgamó la superficie para facilitar su ataque a baja temperatura (evitándose calentar y reponer el agua perdida por evaporación). La solución así obtenida, con actividad de 1400 μc , se diluyó con cuatro veces su volumen, y a cada probeta se le aplicaron 0,5 ml de dilución, que contenían unos 50 μc .

En la Fig. 3.4 se ilustra una probeta marcada mediante la técnica descripta.

3.2.1 Eficiencia de la fijación

Las probetas marcadas tal como se detalla en la sección precedente (3.2.0) fueron frotadas enérgicamente con papeles de filtro. Se midió luego la actividad retenida en estos últimos, verificándose que las marcas obtenidas depositando gotas perdían un elevado porcentaje de su actividad con las primeras pasadas de papel. En cambio, extendiendo la solución con un pincel, se lograron resultados satisfactorios.

La actividad de la probeta y la actividad retenida por los papeles de filtro fueron medidas con geometría fija, mediante un cristal de centelleo de NaI (Tl) y fotomultiplicador asociados a un espectrómetro gamma. Los resultados de este ensayo se indican en la Tabla 3.1.

TABLA 3.1 ENSAYOS DE CONTAMINACION POR FROTAMIENTO EN SECO

Muestra	Cuentas por minuto
Probeta intacta	150.700
Actividad retenida en un papel de filtro (pasado una sola vez, a lo largo de toda la superficie de la probeta)	3.474
Idem, en otro trozo de papel (pasando 5 veces)	2.550
Idem, en otro trozo de papel (pasando 8 veces)	1.530

Se observa que la actividad perdida por la probeta es relativamente baja, incluso cuando se la someta a condiciones de frotamiento difícilmente alcanzables en la práctica. También se realizaron ensayos de arrastre de la actividad, luego de sumergir la probeta sucesivamente en agua y aguarras, con el fin de comparar las condiciones ya estudiadas con las que existirían luego de una lluvia, o del derrame accidental de solvente para pinturas, respectivamente.

Estos ensayos fueron practicados en forma similar a los realizados con probetas secas, pero teniendo la precaución, entre pasadas sucesivas, de sumergir la probeta en el líquido (agua o aguarras) para mantener mojada su superficie. La Tabla 3.2 resume los datos obtenidos en este segundo ensayo.

TABLA 3.2 ENSAYOS DE CONTAMINACION POR FROTAMIENTO, MOJANDO CON AGUA O AGUARRAS

Muestra	Cuentas por minuto
Actividad retenida en un papel de filtro, pasado una sola vez a lo largo de la probeta mojada con agua	354
Idem, con otro trozo de papel de filtro (10 pasadas, probeta mojada con agua)	772
Idem, con otro trozo de papel de filtro (1 pasada probeta mojada con aguarras)	109
Idem, con otro trozo de papel de filtro (10 pasadas, probeta mojada con aguarras)	294

La actividad total así desprendida es de 1.529 cuentas por minuto. Como la que quedaba en la probeta al comenzar los ensayos con probeta húmeda era de 121.386 cuentas por minuto, la actividad total retenida por los papeles de filtro es de apenas el 1,26 % de la actividad fijada en el caño de cobre.

4.0.0 TECNICAS DE DETECCION

La detección de los elementos marcados debiera reunir las siguientes características:

- 1) Ser sensible a muy baja actividad para diferentes posiciones de la fuente radiactiva.
- 2) Tener alta velocidad de respuesta.
- 3) Ser confiable a través de largos períodos de tiempo.

El costo del sistema que se adopte, además, tiene que ser económicamente compatible con la magnitud de los beneficios que de él se esperan obtener.

La operación de los equipos, por otra parte, debe ser lo suficientemente simple como para no requerir personal calificado.

Estas condiciones se contraponen unas con otras y obligan a establecer un compromiso entre las características que finalmente debe reunir el sistema de detección. Así por ejemplo es posible medir muy bajas actividades si se dispone del suficiente tiempo de medición.

Los sistemas de detección gamma de alta sensibilidad (cristal de centelleo y fotomultiplicador) son en general más complejos, más costosos y menos confiables que los basados en el uso de tubos Geiger Müller.

4.1.0 SISTEMA DE DETECCION CON TUBOS G. M.

El sistema de detección considerado en este estudio se compone de las siguientes unidades funcionales (Fig. 4.1)

- Unidad de detección.
- Unidad de medición.
- Unidad de control.

4.1.1 Unidad de detección

La función de esta unidad es la de proveer una señal eléctrica proporcional a la intensidad de radiación que eventualmente pueda incidir sobre ella. Se ha pensado utilizar como unidad de detección una batería de tubos G.M. de especificaciones similares a las que se indican en la Tabla 4.1.

TABLA 4.1 ESPECIFICACIONES DE LOS TUBOS G.M.

Longitud total	18 3/4"
Diámetro	13/32"
Longitud activa	17"
Material del cátodo	Acero inox.
Gas de llenado	Ne, A, halógeno
Plateau	200 V
Voltaje de operación	700 - 900 V
Temperatura de operación	-40 a + 150 C

Los tubos G.M. convierten la radiación detectada en pulsos eléctricos de una frecuencia proporcional a la intensidad de radiación. Estos pulsos son transmitidos a la unidad de medición mediante un cable coaxil.

4.1.2 Unidad de medición

Su objeto es convertir la señal entregada por los detectores, en una señal útil a los propósitos de la medición. En este caso se ha adoptado un integrador electrónico que transforma la frecuencia de impulsos provenientes de los G.M. en una señal de corriente continua, de características adecuadas ya sea para su medición directa en un instrumento de aguja, su representación en un registro gráfico o su utilización para comandar una unidad de control que acciona a su vez una alarma.

El mismo integrador permite variar su constante de tiempo (RC) y también sus características de circuito para obtener la misma señal de salida frente a diferentes frecuencias de pulsos en la entrada, lográndose así flexibilidad de operación para distintas condiciones de medición (intensidad de radiación detectada y tiempo disponible para su lectura).

4.1.3 Unidad de control

La unidad de control recibe la señal del integrador, y actúa en función de dicha señal, para el accionamiento de una alarma visual y/o auditiva. Cuando la señal del integrador sobrepasa un valor prefijado, la unidad de control energiza un relay operando la alarma.

4.2.0 EFICIENCIA DE DETECCION

Para el diseño del sistema es fundamental determinar la eficiencia de detección definida aquí como la relación entre la señal que entrega un tubo G.M. y la actividad presente en el objeto marcado. De acuerdo a esta definición la eficiencia de detección (E) se expresará en las siguientes unidades:

$$\text{Eficiencia} = E = \frac{\text{No. cuentas}}{\text{seg. tubo G.M.}} = \frac{\text{cuentas}}{\mu\text{c} \cdot \text{seg}} \quad (4.1)$$

micro curie ^{110}mAg

La eficiencia, expresada de esta forma, dependerá tanto de las características del detector G.M. y de la fuente radiactiva, como de la disposición geométrica de ambos elementos. Será pues necesario presuponer determinadas condiciones de medición. En el presente estudio se ha partido de los siguientes supuestos compatibles con lo que podría ser una situación real del problema:

- 1) El tubo G.M. del tipo especificado en la Tabla 4.1 y la fuente radiactiva (^{110}mAg) pueden estar a distintas alturas sobre ejes verticales distanciados a 60 cm uno del otro.
- 2) La fuente, en un caso, está diluída en una masa de Hg de unos 300 g contenida en un recipiente de material plástico, y en el otro, adherida a la superficie de un tubo de cobre.

Para calcular las variaciones de eficiencia de detección en función de las alturas relativas "producto marcado-detector", se hicieron registros gráficos de la intensidad de radiación para tres posiciones distintas de los objetos marcados (a 10, 100 y 145 cm de altura), variando para cada posición de la fuente la altura del detector, de 20 en 20 cm, mediante el dispositivo ilustrado en la Fig. 4.2a y b.

A fin de estudiar en el caso del mercurio, la influencia de la autoabsorción de radiación en la muestra, el mismo ensayo se repitió para dos recipientes de distinta forma (Fig. 4.3).

Se midió además la atenuación de radiación provocada por la interposición del cuerpo humano entre el objeto marcado y el detector, ambos a la altura de 100 cm.

Los registros gráficos así obtenidos, permitieron determinar los valores de la ec. 4.1 para los distintos casos considerados, dividiendo la frecuencia de impulsos por la actividad de la muestra. Debido a las fluctuaciones estadísticas de la radiación detectada (Sección 4.3.0), la frecuencia se obtuvo en cada caso, como promedio de 3 minutos de registro.

Los resultados de estos ensayos han sido representados gráficamente en las Figs. 4.3a y b y 4.4. El eje vertical de los diagramas corresponde a la altura del tubo G.M. y las abscisas a la eficiencia de detección, habiéndose identificado las curvas, de acuerdo a la altura de los objetos marcados.

Estas curvas permiten calcular en cada caso el número de cuentas por segundo que es posible obtener por uc para una dada cantidad de tubos G.M. en una determinada posición (Sección 5.2.0).

Fijada la cantidad de tubos G.M. que han de integrar la unidad de detección, la altura de cada uno se elige utilizando dichas curvas, para obtener aproximadamente la misma eficiencia de detección independientemente de la posición de los objetos marcados (Sección 5.1.0).

Conociendo la eficiencia de la batería de tubos, se calcula entonces la mínima actividad total necesaria para que el sistema provea una señal discernible de las fluctuaciones estadísticas, en el breve tiempo disponible para la medición.

4.3.0 LIMITE DE DETECCION

La radiactividad es un proceso discontinuo en el espacio y en el tiempo por cuanto afecta a núcleos atómicos individuales que se transforman (decaen) espontáneamente, según una determinada probabilidad por unidad de tiempo.

La consecuencia de todo esto es que si se tiene un material con cierta cantidad de átomos radiactivos, y se mide repetidamente el número de transformaciones ocurrido durante un determinado intervalo de tiempo (constante para todas las mediciones), se obtendrán valores diferentes en cada observación, aunque el número de átomos radiactivos haya permanecido prácticamente invariable durante el experimento.

Denominando N al promedio entre todas las mediciones, se observa que las determinaciones individuales oscilan alrededor de dicho valor promedio, de tal forma que aproximadamente el 70 % de ellas cae entre $N \pm \sqrt{N}$ y el 100 % entre $N \pm 3 \sqrt{N}$.

Si ΔT seg es el intervalo empleado en cada medición, la frecuencia de transformaciones radiactivas (n) también oscilará alrededor de:

$$n = \frac{N}{\Delta T} \quad \frac{\text{transformaciones}}{\text{seg}}$$

Las desviaciones (Δ) observadas en la actividad medida (n), respecto al promedio $n = \frac{N}{\Delta T}$, serán en general (99,7 % de las mediciones efectuadas) inferiores a

$$\pm 3 \frac{\sqrt{N}}{\Delta T} \quad \frac{\text{transformaciones}}{\text{seg}}$$

Por lo tanto, podemos suponer:

$$\Delta \text{ max} = \pm 3 \frac{\sqrt{N}}{\Delta T} = \pm 3 \sqrt{\frac{N}{\Delta T} \cdot \frac{1}{\Delta T}} = \pm 3 \sqrt{\frac{n}{\Delta T} \frac{\text{transform.}}{\text{seg}}} \quad (4.2)$$

Del mismo modo, la intensidad I de radiación medida en cuentas por segundo a cierta distancia de la fuente radiactiva, será también un valor fluctuante dentro de una desviación máxima:

$$\Delta \text{ max} = \pm 3 \sqrt{\frac{I}{\Delta T}} \quad \text{cuentas/seg}$$

Se observa que la desviación en valor absoluto será tanto mayor, cuanto menor sea el tiempo ΔT utilizado para computar la frecuencia de impulsos, es decir, cuanto menor sea el tiempo disponible de medición.

En los integradores electrónicos como el utilizado en este estudio, el tiempo de medición ΔT equivale a dos veces la constante de tiempo RC del circuito del integrador:

$$\Delta T = 2 RC \quad \text{seg}$$

Para un determinado nivel promedio de cuentas por segundo I , la indicación del instrumento y por lo tanto el registro gráfico de la intensidad de radiación detectada durante un intervalo de tiempo $t \gg 2 RC$, fluctuá entre $\pm 3 \sqrt{\frac{I}{2 RC}}$ cuentas/seg-

Esta es la razón de las oscilaciones que se observan en los registros gráficos de las medidas de radiactividad.

De lo expuesto se deduce que para poder discernir inequívocamente dos valores de intensidad de radiación muy próximos entre sí, I e $(I + \delta I)$, en una medición con integrador, se requiere que la diferencia δI entre ambos niveles de radiación sea igual o mayor que la suma de los valores absolutos de las máximas fluctuaciones estadísticas de cada nivel.

Si δI es pequeño frente a I resultará $3 \sqrt{\frac{I}{2 RC}} \simeq 3 \sqrt{\frac{I + \delta I}{2 RC}}$ es decir

$\Delta \text{max} (I + \delta I) \simeq \Delta \text{max} (I)$. Por lo tanto, la condición para discernir entre dos valores muy próximos de intensidad de radiación, será:

$$\delta I \geq 2 \times 3 \sqrt{\frac{I}{2 RC}} = 6 \sqrt{\frac{I}{2 RC}} \quad \text{cuentas/seg} \quad (4.3)$$

Otra consecuencia de la constante de tiempo RC del integrador, es que si se produce un cambio brusco en el nivel de radiación detectado, digamos de I_0 a I_1 , la respuesta del instrumento no será instantánea sino que tenderá al valor final (I_1) según la ley:

$$I = I_0 + (I_1 - I_0) e^{-t/RC} \quad \text{cuentas/seg} \quad (4.4)$$

siendo:

t = tiempo transcurrido desde el cambio de intensidad
(Cuando $t \gg RC$ será $I = I_1$)

La diferencia $\Delta = I - I_0$ vale

$$I - I_0 = (I_1 - I_0) e^{-t/RC} \quad \text{cuentas/seg} \quad (4.5)$$

y de acuerdo a la ec. 4.3 sólo será discernible cuando:

$$\Delta = (I - I_0) = (I_1 - I_0) e^{-t/RC} \geq 6 \sqrt{\frac{I}{2RC}} \quad \text{cuentas/seg} \quad (4.6)$$

Por lo tanto

$$I_1 \geq I_0 + \frac{6 \sqrt{\frac{I_0}{2RC}}}{1 - e^{-t/RC}} \quad \text{cuentas/seg} \quad (4.7)$$

Esta ecuación nos dice cual debe ser el valor de I_1 para obtener en un dado tiempo t a partir de la presencia de la fuente radiactiva, una señal discernible del fondo natural de radiactividad I_0 , utilizando un integrador de característica RC conocida.

De las curvas de eficiencia, con el valor más desfavorable, podemos entonces calcular cuál debe ser la mínima actividad total A de la muestra para que el sistema actúe dentro del tiempo de control disponible.

$$A_{\min} = \frac{I_1}{E_{\min}} \quad \text{micro curies} \quad (4.8)$$

5.0.0 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los ensayos experimentales, consideraciones teóricas e hipótesis abarcadas por el presente estudio, permiten establecer las bases para el diseño de un sistema de detección y alarma técnica y económicamente viable, conforme a los siguientes lineamientos:

5.1.0 SISTEMA DE DETECCION

En principio se propone el uso de dos baterías de 6 tubos G.M. con las especificaciones de la Tabla 4.1. Cada batería estaría formada por dos columnas (caños de aluminio de $\varnothing = 40$ mm) en cuyo interior se alojarían 3 tubos G.M. colocados a las alturas de 30, 80 y 115 cm.

Estas alturas se han determinado en base a las curvas de las Figs. 4.3 y 4.4 para obtener una eficiencia de detección más o menos uniforme independientemente de la localización de la fuente radiactiva, como se indica en la Tabla 5.1 de la Sección 5.2.0.

Las columnas que integran las baterías de detección estarían ubicadas a ambos lados de los relojes marcadores, en la forma ilustrada en la Fig. 5.1.

Con esta disposición, una misma batería controlaría simultáneamente dos pasajes. Clausurando temporariamente los dos pasajes extremos de la salida, se tendría con este sistema el control de la totalidad de los operarios.

Para la instalación de las unidades de detección se ha elegido la zona adyacente a los relojes, porque frente a ellos el personal se detiene siquiera breves instantes para fichar, brindando así una oportunidad favorable para la medición.

Cada batería de detección va asociada a su respectivo integrador y circuito de alarma.

Desde el punto de vista económico en cuanto a equipos utilizados y costo de instalación, el sistema propuesto tiene la ventaja de limitar a dos la cantidad de integradores y baterías de G.M. (Eventualmente convendría contar con un tercer integrador para reemplazo en caso de fallas).

En lo que hace a su operación, en cambio, el sistema ofrece la desventaja de que requiere clausurar dos de los pasajes existentes y que la alarma puede implicar en sospecha a dos personas en lugar de una, debido a que la misma unidad controla simultáneamente dos relojes.

5.2.0 ACTIVIDAD NECESARIA

El fondo de radiactividad natural I_0 medido con una batería de 6 tubos G.M. como los utilizados en este estudio es, aproximadamente:

$$I_0 = 12 \quad \text{cuentas/seg}$$

Con este dato, la ec. 4.7 nos permite calcular cual debe ser la mínima intensidad de radiación I_1 para que un integrador de constante de tiempo $RC = 0,5$ seg nos dé una variación de señal discernible sobre las fluctuaciones estadísticas del fondo en un tiempo de medición $t = 2$ seg. (Se ha estimado en 2 seg. el tiempo empleado por una persona para fichar a la salida de planta).

$$I_1 = \frac{12 + 6\sqrt{\frac{12}{1}}}{1 - e^{-2/0,5}} \quad \approx \quad 33 \quad \text{cuentas/seg}$$

De las curvas de las Figs. 4.4 y 4.5 determinamos la eficiencia total de la unidad de detección para la disposición de tubos G.M. adoptada (Tabla 5.1).

TABLA 5.1 EFICIENCIA PARA 6 G.M. (cuentas/seg.µc)

Posición fuente (altura en cm)	Mercurio		Cobre
	frasco	tubo	
10	0,350	0,370	0,820
100	0,432	0,526	1,120
145	0,340	0,340	0,806

La mínima eficiencia para mercurio es de 0,340 cuentas/seg.µc y ocurre para el frasco a 10 y 145 cm del suelo. Para el caso del cobre la mínima eficiencia es de 0,806 cuentas/seg.µc y corresponde a una altura del trozo marcado de 145 cm. Sin embargo, en las condiciones reales de medición, estos valores pueden ser aún más reducidos debido a la eventual atenuación de la radiación proveniente de la muestra, por interposición del cuerpo u otros absorbentes. El factor de reducción es difícil de calcular por las múltiples variables que intervienen. A los fines del presente estudio se adoptarán como valores de eficiencia los mínimos de la Tabla 5.1, reducidos en un 30 %, es decir 0,240 cuentas/seg.µc para el mercurio y 0,564 cuentas/seg.µc para el cobre.

Dividiendo I_1 por las eficiencias calculadas según el procedimiento anterior, de terminamos finalmente (ec. 4.8) la actividad mínima necesaria en las respectivas muestras para posibilitar su detección bajo las condiciones de medición supuestas. Los resultados se indican en la Tabla 5.2.

TABLA 5.2 ACTIVIDAD DE ^{110m}Ag NECESARIA

Producto	Actividad total necesaria por muestra (µc)
Mercurio (Frasco 300 g)	140
Cobre (trozo)	60

Suponiendo para el caso del mercurio que se transporta individualmente un promedio de 300 g, la actividad específica con que habría que marcar el stock es de unos 0,5 µc/g.

Para el cobre hemos supuesto que se hace una marcación localizada de 60 µc, por cada metro de tubería.

Como se observa, el sistema de detección adolece necesariamente de un inconveniente intrínseco: puede llegar a ser no efectivo si las cantidades sustraídas individualmente no totalizan la actividad de radiación mínima para el cual el sistema

fué diseñado. Nótese, sin embargo, que inconvenientes similares se presentarían en cualquier otro sistema basado en principios diferentes de detección.

5.3.0 TECNICAS DE MARCACION

5.3.1 Mercurio

Se aconseja seguir el método de la desolución de Ag metálica descripto en este estudio (Sección 3.1.0) para preparar una solución de ^{110m}Ag en Hg, de alta actividad específica, por ej. de $40 \mu\text{c/g Hg}$.

A cada instrumento se incorporaría una parte de esa solución, proporcional a la masa de mercurio presente, para alcanzar la actividad específica calculada de $0,5 \mu\text{c/g Hg}$.

La marcación de Hg. parece no ofrecer ningún problema adicional a los del simple manipuleo de la solución marcada, para extraer las partes alícuotas que corresponda agregar a los instrumentos en cada caso.

5.3.2 Cobre

La técnica de marcación más apropiada dentro de los métodos considerados en el presente estudio es la deposición de plata metálica sobre la tubería de cobre a partir de una solución de nitrato, según se describe en la Sección 3.2.0. La deposición debe efectuarse con pincel para homogeneizar el depósito. Conviene que la actividad específica de la plata para preparar la solución sea del orden de $14 \mu\text{c/Ag}$ (es decir dos veces mayor que la actividad específica de la plata utilizada en los ensayos de este estudio), a efectos de restringir a unos 5 cm la extensión de la zona marcada.

La marcación debería repetirse cada metro en toda la longitud de tubería que se quiere controlar.

Como la zona de deposición de plata toma una coloración negra fácilmente identificable, sería necesario pintar a soplete y con color toda la longitud de la tubería marcada a fin de hacer invisibles dichas señales.

Este requisito, por un lado quizás inconveniente, tiene la ventaja de cubrir la zona radiactiva con una película de laca celulósica, que contribuye eficazmente a disminuir los riesgos de contaminación.

Para asegurarse de que se deposita realmente la actividad mínima necesaria para su posterior detección, la operación de marcación puede controlarse con un monitor portátil de radiaciones, calibrado en una geometría fija contra una muestra de actividad standard.

La geometría de medición tiene que ser fácilmente reproducible durante la deposición de la solución radiactiva.

Como se observa el procedimiento de marcación del cobre es bastante más complejo que en el caso del mercurio, pues requiere operaciones complementarias al simple manipuleo de la solución radiactiva.

Además, la ubicación de las tuberías a controlar (muchas en lugares poco accesibles) permite anticipar dificultades operativas adicionales para concretar la marcación "in-situ".

5.4.0 SEGURIDAD RADIOLOGICA

Los niveles de actividad y las condiciones en que dicha actividad quedaría incorporada a los materiales considerados, son compatibles con las normas de seguridad exigidas por la CNEA.

No obstante, y para prevenir cualquier circunstancia extrema, sería necesario en caso de decidirse la implantación del sistema propuesto, colocar carteles de advertencia, bien visibles y adecuadamente distribuidos, informando sobre la presencia en planta de las sustancias marcadas. Las mínimas exigencias en tal sentido serían.

- a) Para los instrumentos que contienen mercurio marcado: Un cartel en cada instrumento con la siguiente leyenda:
"El mercurio de este instrumento contiene para su identificación y control material radiactivo. No permanecer en las proximidades del mismo si no se está expresamente autorizado".
- b) Para las tuberías de cobre: Varios avisos en lugares de concentración habitual del personal, con el siguiente texto:
"Las cañerías de cobre de los sectores de la planta, han sido marcadas para su identificación y control, con material radiactivo. Dichas cañerías no deberán ser desplazadas de su ubicación actual, sin autorización superior".

La o las personas de planta encargadas de la supervisión de instrumentos e instalaciones afectadas por la marcación radiactiva deberán recibir instrucción adecuada sobre las normas de protección radiológica y tramitar los permisos individuales e institucionales exigidos por la CNEA para el uso de radioisótopos.

Por último, cabe señalar que todas las operaciones de manipulación de material radiactivo y sus soluciones, para la marcación de los productos, deberán ser efectuados por personal idóneo debidamente autorizado por la CNEA, de acuerdo con sus "Normas básicas de seguridad radiológica y nuclear".

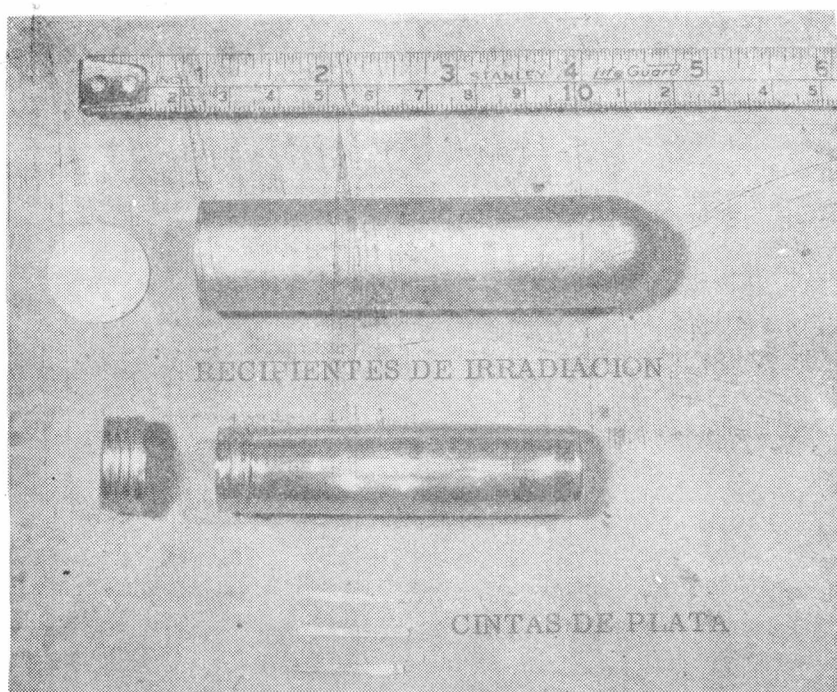


Fig. 3.1 Muestra de plata y recipientes para su irradiación.

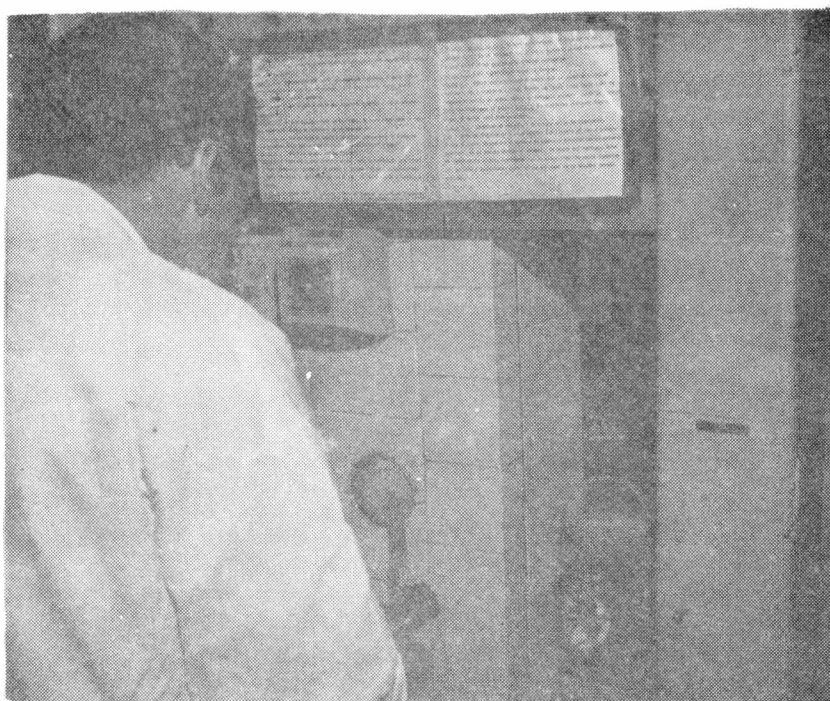


Fig. 3.2 Apertura de los cartuchos.



Fig. 3.3 Transporte de la plata irradiada.

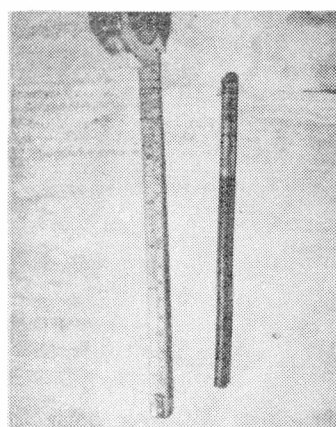
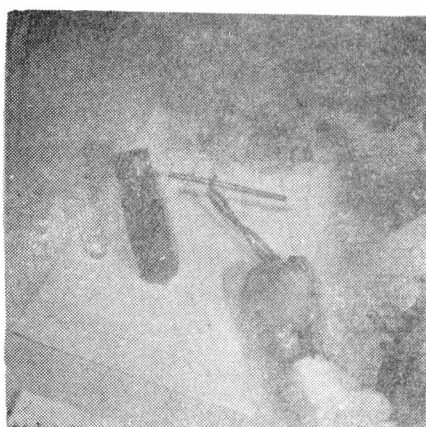


Fig. 3.4 Marcación del caño de cobre

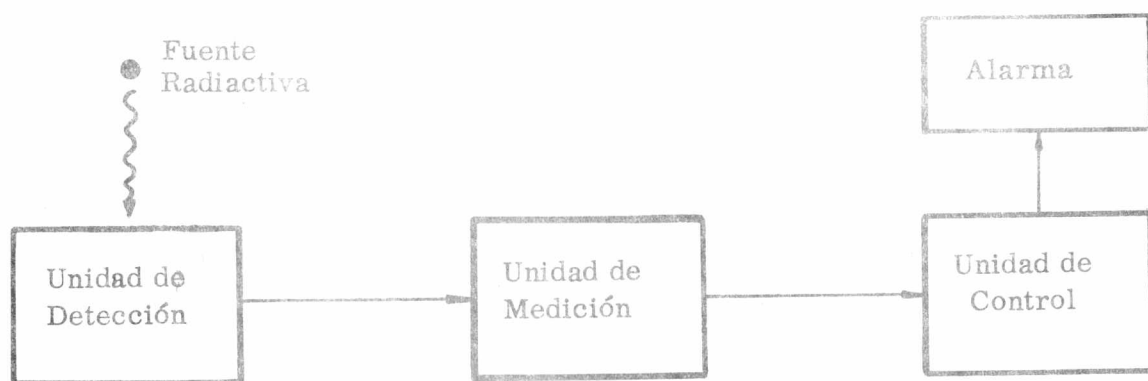
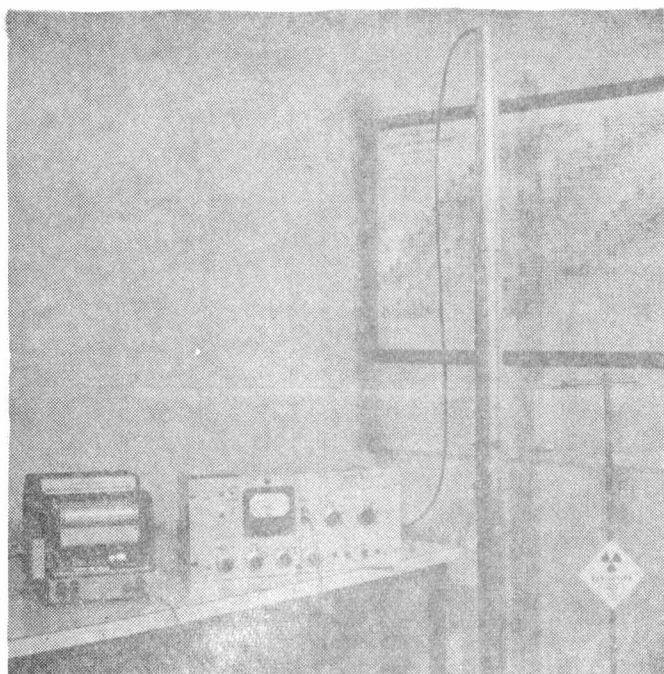
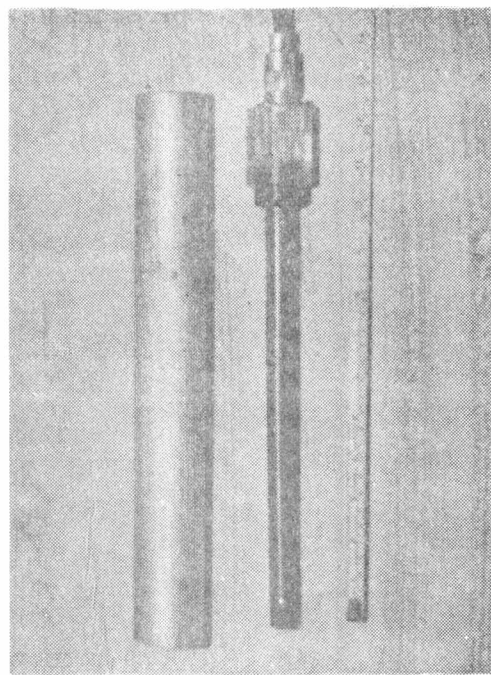


Fig. 4.1 SISTEMA DE DETECCION



a)



b)

Fig. 4.2 Dispositivo experimental para determinar la eficiencia de detección en función de las alturas relativas fuente-detector. a) conjunto; b) sonda detectora para un tubo G.M.

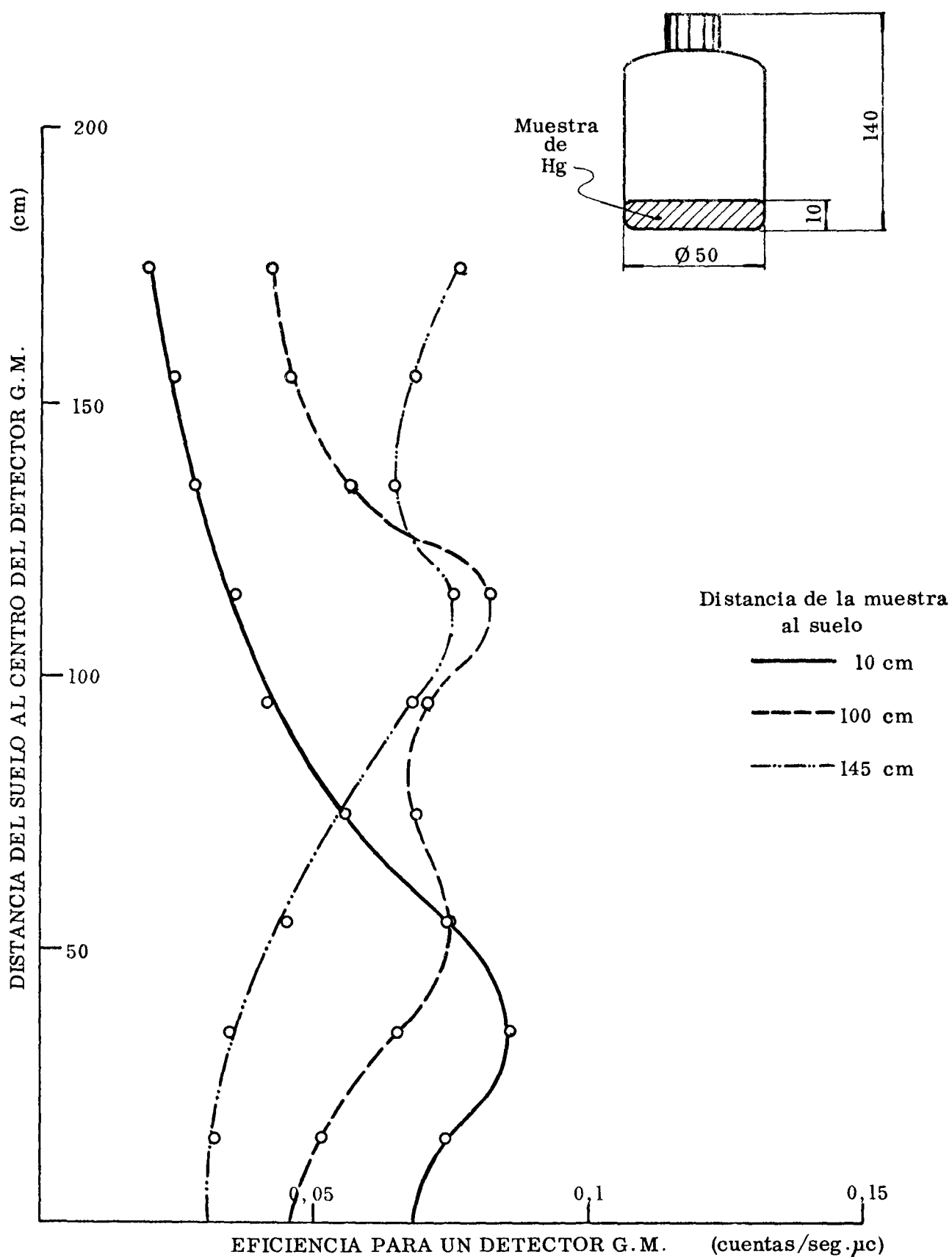


Fig. 4.3a Curvas de Eficiencia referidas a un detector G.M. para 230 g de mercurio marcado con $194\text{ }\mu\text{c}$ de ^{110}mAg contenidos en un frasco de plástico, en función de la altura de la muestra marcada y del detector. Distancia muestra-detector en el plano horizontal: 60 cm.

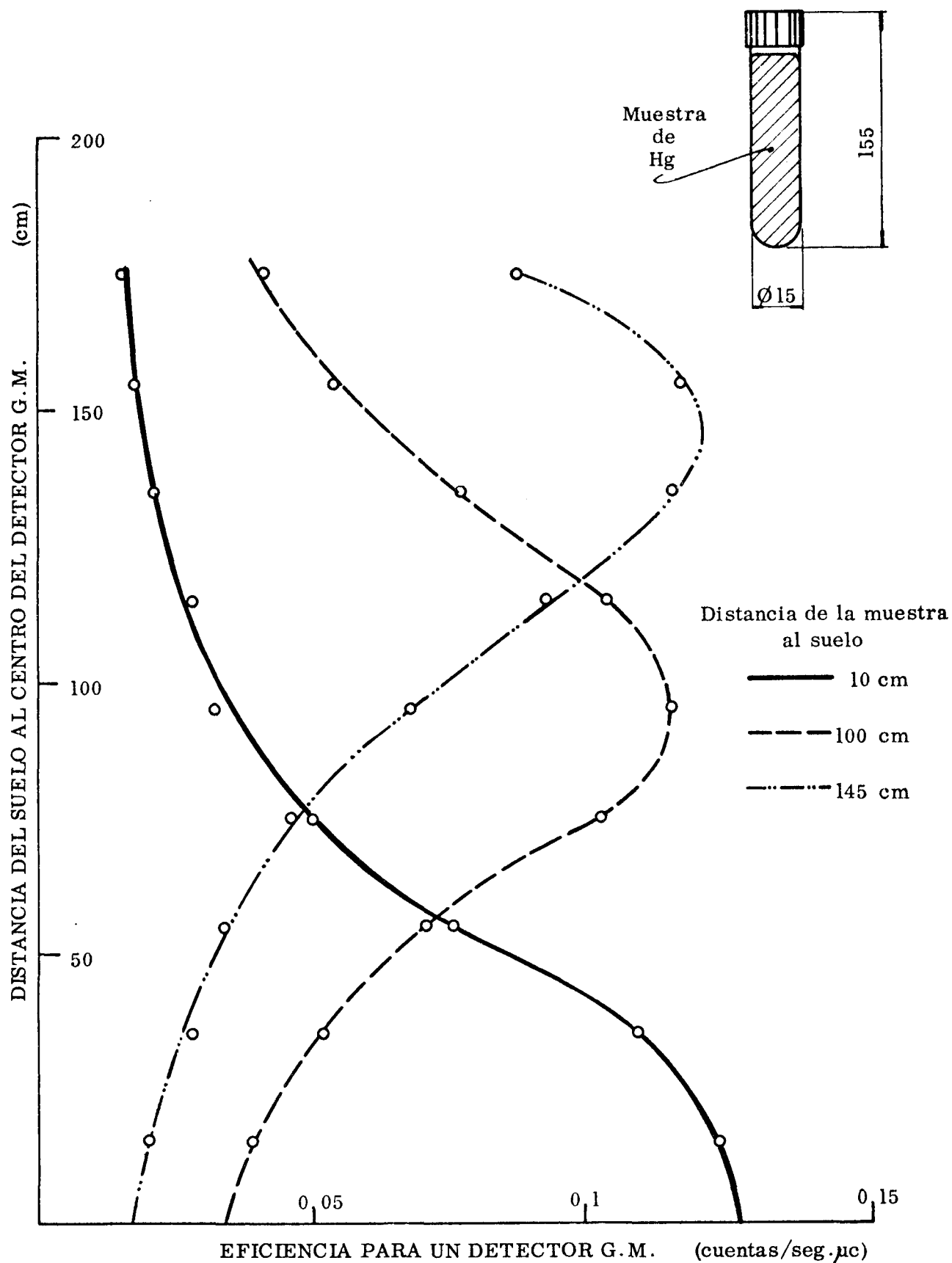


Fig. 4.3b Curvas de Eficiencia referidas a un detector G.M. para 230 g de mercurio marcado con 194 µc de ^{110m}Ag contenidos en un tubo de plástico, en función de la altura de la muestra marcada y del detector. Distancia muestra-detector en el plano horizontal: 60 cm.

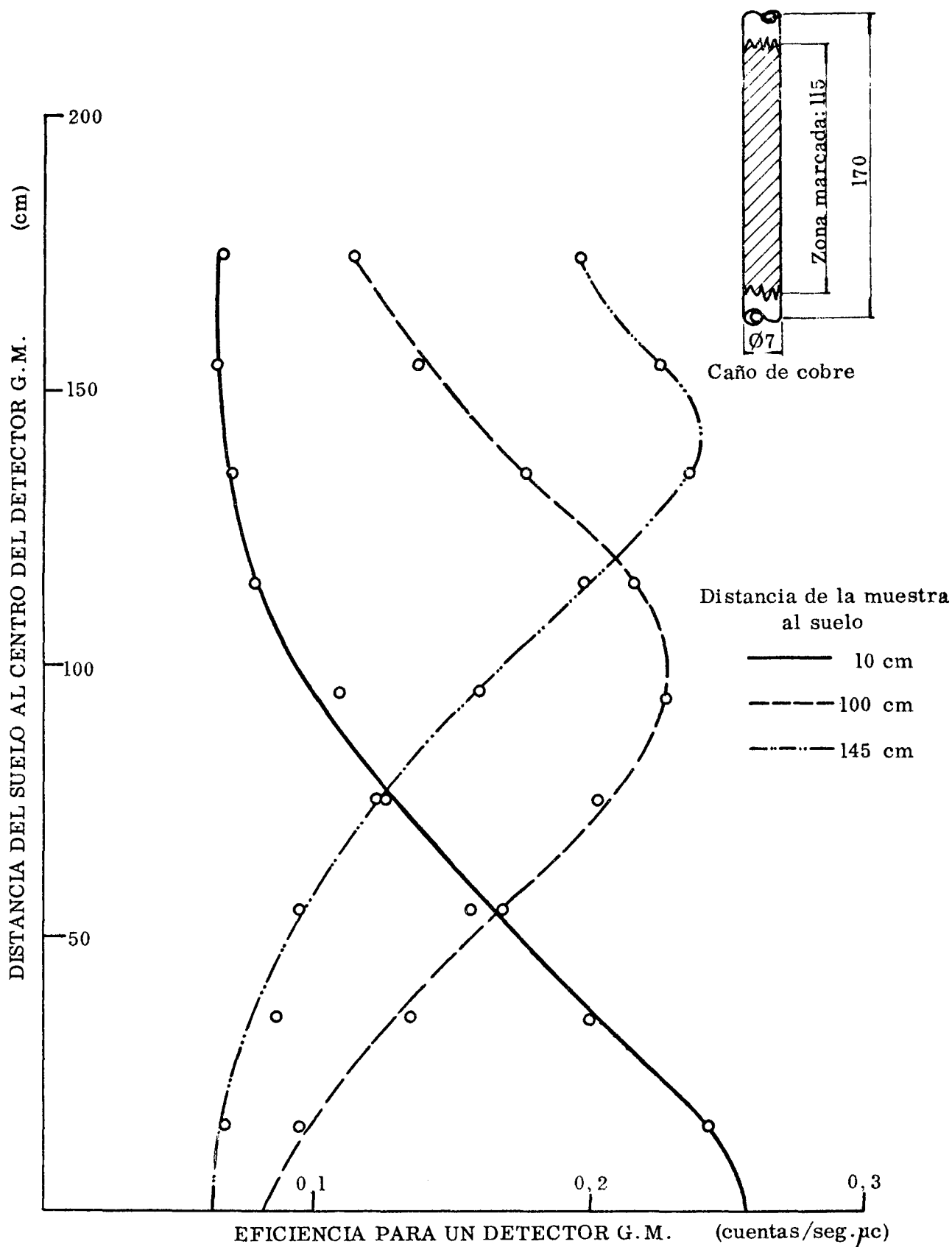
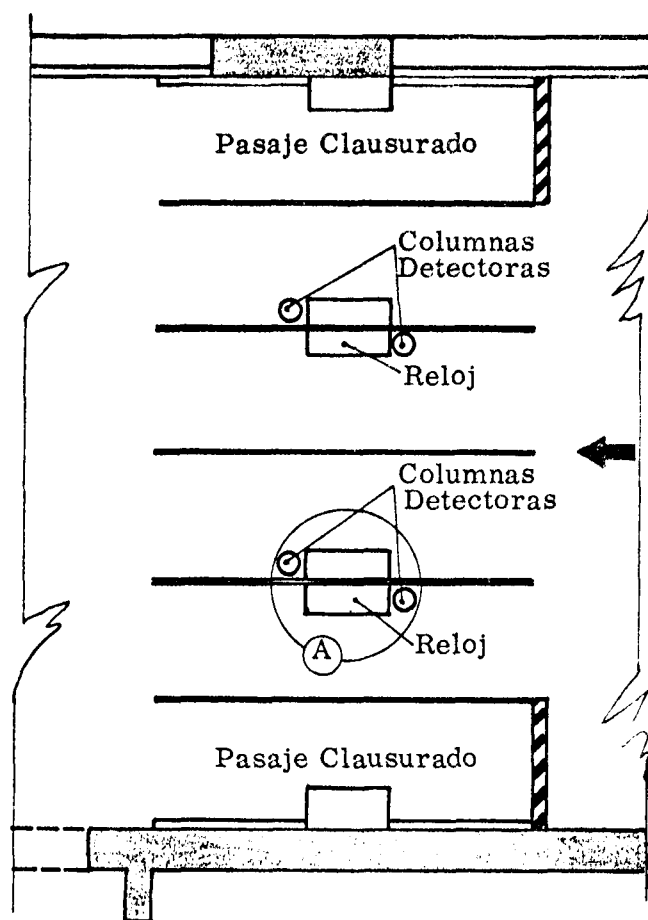
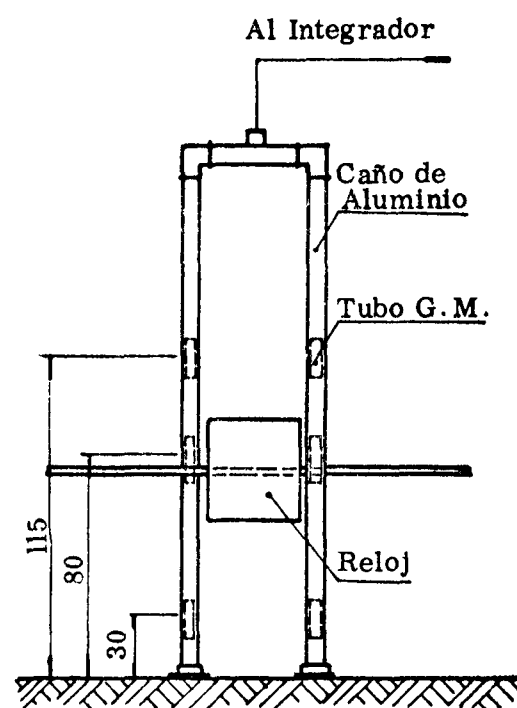


Fig. 4.4 Curvas de eficiencia referidas a un detector G.M. para caño de cobre marcado con 50 µc de ^{110}mAg , en función de la altura de la muestra marcada y del detector. Distancia muestra-detector en el plano horizontal : 60 cm.



Esquema en planta de la salida de personal.



Detalle A (vista en elevación).

Fig. 5.1 Ubicación de las unidades de detección.