

APLICACION DE LOS ISOTOPOS RADIATIVOS A LA MEDIDA DE CAUDALES SUPERFICIALES DE AGUA

Por E. BAONZA
Ing. de Caminos, Canales y Puertos
A. PLATA
Lic. en Ciencias Químicas
J. STEIN
Lic. en Ciencias Físicas
P. TORRES
Ayudante de Obras Públicas

Este trabajo es compendio del titulado "Informe sobre el estudio y ensayo de las aplicaciones de los isótopos radiactivos a la medida de caudales superficiales de agua", también realizado por el Gabinete de Aplicaciones Nucleares del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, y al cual remitimos a quienes deseen conocer con detalle la preparación y realización de las experiencias de aforo con radioisótopos que han sido llevadas a cabo.

I. PARTE GENERAL.

1. Introducción.

El conocimiento de los caudales de las corrientes de agua que discurren por la superficie terrestre es de un interés básico en el proyecto de obras hidráulicas, tales como las destinadas a la producción de energía eléctrica y abastecimiento de agua en general, sobre todo, en países, como el nuestro, de limitados recursos hidráulicos.

Los principales métodos para aforar corrientes abiertas son:

- Aforos por vertedero.
- Aforos por molinete.
- Aforos con trazadores químicos.
- Aforos con trazadores radiactivos.

El primero, recomendable siempre que se deseen medidas sistemáticas y de gran exactitud, tiene su principal inconveniente en la elevada inversión que significa la construcción del vertedero. El segundo, encierra grandes dificultades para el aforo del caudal de avenidas, pues, tanto la determinación de la sección transversal de la corriente como la de la velocidad en sus diversos puntos, no ofrecen las necesarias garantías en estos casos.

Por ello, los sistemas más prácticos son los que utilizan trazadores, ya sean éstos químicos o radiactivos. El empleo de trazadores químicos se remonta al año 1863, y, desde un principio, los productos más utilizados fueron cloruro só-

dico, dicromato sódico, nitritos alcalinos y fluoresceína. El método llevaba, en general, a determinar la concentración máxima correspondiente al régimen permanente establecido mediante una larga inyección a caudal constante. En los momentos actuales son dos los principales procedimientos de aforo químico utilizados: inyección continua e integración.

a) *Método de dilución o de inyección continua.* — El método tradicional de dilución consiste en inyectar en el río un caudal constante q , perfectamente conocido, de una solución concentrada de dicromato, de concentración C_1 , durante un tiempo suficiente para obtener un pico constante de concentración C_2 en la sección de aforo del río. Esta sección debe estar suficientemente alejada del lugar de inyección para asegurar una mezcla homogénea de la solución con el caudal Q , objeto del aforo.

En estas condiciones se verifica:

$$q \cdot C_1 = (Q + q) C_2,$$

igualdad en la que son conocidos C_1 , C_2 y q , con lo que puede calcularse Q . La concentración C_1 debe ser tal que C_2 no sea muy inferior a 1 miligramo/litro. Siendo normalmente q despreciable frente a Q , resulta:

$$Q = q \frac{C_1}{C_2}.$$

b) *Método de integración.* — Se inyecta un volumen conocido V de una solución de dicromato sódico de concentración C_1 . Se realizan tomas durante todo el tiempo, T , de paso de la

ola de dicromato por un punto situado a distancia conveniente del de inyección, de modo que la mezcla sea uniforme en toda la sección de toma de muestras.

Si llamamos C_2 a la concentración media de las n muestras tomadas durante el tiempo T , se tiene:

$$V \cdot C_1 = Q \cdot T \cdot C_2 = Q \int_0^T c \cdot dt,$$

de donde:

$$Q = \frac{V \cdot C_1}{\int_0^T c \cdot dt}.$$

2. Aforo con isótopos radiactivos.

En principio, los métodos de aforo con radioisótopos no difieren de los que utilizan solucio-

a) *El método de inyección continua.* — Está basado en la comparación de concentraciones en la solución inyectada y en la sección de aforo.

Este fundamento, válido cuando se utilizan soluciones salinas, es igualmente cierto si se usan isótopos radiactivos y bastará comparar actividades en lugar de las concentraciones de sal.

La solución del trazador se añade a la corriente, a caudal constante, durante un cierto período de tiempo. La concentración que se observará en un punto de la corriente, situado aguas abajo a una distancia del punto de inyección suficientemente grande para que se produzca una mezcla uniforme, variará en función del tiempo según la curva 2 de la figura 1.^a. Se alcanza un *plateau* o valor constante de la concentración cuya longitud depende del tiempo que dura la inyección y de la distancia entre las estaciones de inyección y de medida.

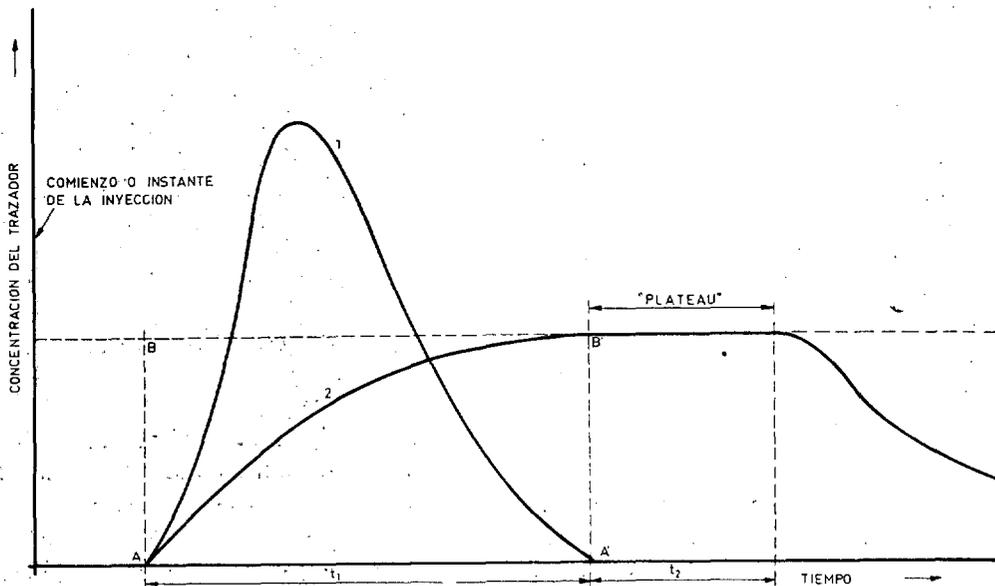


Fig. 1.^a. — Curvas comparativas de las cantidades necesarias de isótopos en los métodos de inyección continua y de integración.

nes salinas, existiendo, al igual que cuando se usan éstas, los dos métodos fundamentales de dilución e integración. Realmente, son ambos de dilución, pero difieren tanto en la forma de realizar la inyección del trazador como en las técnicas empleadas para medir las concentraciones.

Si llamamos Q al caudal de la corriente a determinar, q al caudal constante con que se inyecta el trazador y C_1 y C_2 a las concentraciones en la solución inyectada y en la corriente de agua, se cumplirá:

$$q \cdot C_1 = Q \cdot C_2, \quad (1)$$

siendo C_1 y q conocidos y determinándose C_2 mediante toma de muestras de agua o por medida directa.

Una vez establecido el *plateau*, la concentración del trazador debe ser la misma en todos los puntos de la sección de la corriente en que se efectúa la toma de muestras, lo que implica la distribución uniforme del trazador en dicha corriente y, por tanto, es preciso separar suficientemente las estaciones de inyección y de toma de muestras. Esta distancia debe reducirse al mínimo para abreviar el tiempo de la inyección con el consiguiente ahorro de trazador. Es necesario, asimismo, que la cantidad de trazador por unidad de tiempo que atraviesa la sección de medida o de toma de muestras sea igual a la cantidad de trazador que por unidad de tiempo se inyecta aguas arriba, y que, por tanto, no existan fugas o aportaciones de caudal en el tramo que separa las estaciones de inyección y de toma, así como ausencia de terrenos que retengan el isótopo.

b) *El método de integración.* — También llamado de cuentas totales, consiste en añadir a la corriente, de una sola vez, en un punto cualquiera de ella, una cantidad determinada de trazador radiactivo, de actividad A . El tiempo invertido en la adición del isótopo a la corriente puede ser cualquiera, puesto que no tiene influencia en el proceso, pero conviene que no sea largo. La adición del producto marcador se puede realizar en uno o en varios puntos de una misma sección transversal, siendo preferible hacerlo en la segunda forma para lograr una mezcla homogénea.

En los puntos de la corriente situados aguas abajo del anterior, a una distancia suficiente para que se haya verificado la dilución homogénea del producto marcador en el agua, la concentración variará con el tiempo, según una ley que dependerá del tiempo empleado en el vertido del isótopo, la distancia entre los puntos considerados y las características de la corriente (curva 2 de la figura 1.^a).

La fórmula que da el caudal es:

$$Q = K \frac{A}{N}, \quad (2)$$

en la cual representan:

K = factor de eficacia de contaje del detector, que depende del isótopo utilizado, detector empleado, posición del contador en la corriente de agua, etc.

A = cantidad total de isótopo añadida a la corriente.

N = número de cuentas registradas.

El cálculo de K se lleva a cabo midiendo la velocidad de contaje del equipo, en régimen hidrostático, en un volumen determinado de agua con concentración determinada de trazador, en unas condiciones idénticas a las existentes en la corriente de agua.

Otra fórmula, equivalente a la anterior, para obtener el caudal es:

$$Q = \frac{A}{\int c \cdot dt} = \frac{\text{curios}}{\frac{\text{curios}}{\text{litro}} \cdot \text{segundo}} = \frac{\text{litro}}{\text{segundo}}, \quad (3)$$

en la cual c es la concentración del trazador, función del tiempo t de paso de la ola.

3. Procedimientos de medida.

Utilizando la fórmula $Q = \frac{A}{\int c \cdot dt}$; como A es conocido, el problema se reduce al cálculo de $\int c \cdot dt$, para lo cual existen diferentes procedimientos:

a) *Toma de muestras a intervalos conocidos.* — Durante el paso de la ola de trazador por la estación de medida, se toman muestras periódicas de un volumen suficiente para que sea posible una medida cómoda de la concentración. Las concentraciones obtenidas en las diferentes muestras se representan en función del tiempo y se determina a continuación la superficie limitada por la curva, cuyo valor es el de $\int c \cdot dt$. Todas las muestras deben tomarse en el mismo punto de la corriente.

b) *Toma continua de muestras a caudal constante.* — Durante el paso de la ola se extrae, de un mismo punto de la corriente, una pequeña muestra con un caudal constante, que se va acumulando en un único recipiente. Si es M la masa total de trazador inyectada, Q el caudal de la corriente, m la masa que se colecta con un caudal derivado q , se tiene:

$$\frac{Q}{q} = \frac{M}{m} \text{ de donde } Q = \frac{M}{m} q. \quad (4)$$

c) *Detector sumergido en la corriente.* — El trazador radiactivo se mide *in situ*. Para ello, en un punto de la estación de medida se sumerge un detector, generalmente de centelleo, conectado a una escala.

Durante el paso de la ola, dicho detector proporcionará una velocidad de recuento que dependerá de la concentración media del trazador existente en el agua que rodea al detector. El número total de impulsos acumulados, N , durante el paso de la ola, y que será una medida de la integral $\int c \cdot dt$, es decir:

$$N = K \int c \cdot dt;$$

$$Q = \frac{A}{\int c \cdot dt} = \frac{A}{N:K} = K \frac{A}{N}.$$

El valor de K se determina introduciendo el detector, con una disposición geométrica igual a la que tenía en la corriente, en un tanque lleno de una solución trazadora de concentración conocida y determinando la velocidad de recuento. Las dimensiones del tanque tienen que ser suficientemente grandes para que se alcance el llamado volumen de saturación, es decir, para que un volumen mayor de solución radiactiva de igual concentración no modifique la velocidad de recuento en más de 1 por 100.

Este método, como puede apreciarse, tiene el gran inconveniente del calibrado, pues el tanque que se requiere para alcanzar el volumen de saturación resulta excesivamente grande y es, por tanto, difícil de transportar.

d) *Derivación de una corriente a través de un recipiente.* — En este método el detector no está sumergido en la corriente, sino en un recipiente a través del cual se bombea agua. Si el caudal que proporciona la bomba es tal que el agua del recipiente se renueva varias veces por minuto, la concentración de trazador en dicho recipiente será prácticamente igual a la existente en la corriente.

Para el cálculo se emplea la fórmula (2). La determinación de K es más fácil que en el método anterior. Basta llenar el recipiente con una solución del trazador de concentración conocida y determinar, en régimen estático, la velocidad de recuento. El cociente entre ésta y la concentración del trazador será el factor K .

Si el caudal derivado representa una fracción m del caudal Q de la corriente, por el recipiente pasarán un caudal mQ y una actividad mA . Por tanto:

$$N = \frac{m \cdot A}{m \cdot Q} \cdot K \quad F = \frac{A}{Q} K,$$

con lo que el número de cuentas acumuladas será, paradójicamente, independiente del caudal que se derive a través del recipiente.

4. Comparación de los métodos de inyección continua y de integración.

Ambos métodos conducen a buenos resultados, pero admiten una comparación entre sí desde los puntos de vista de su dificultad experimental y de la cantidad necesaria de trazador.

a) *Inyección.* — El procedimiento de inyección continua exige el empleo de una bomba dosificadora que sea capaz de inyectar en la corriente, a caudal constante, la solución trazadora. Esta solución tiene que ser preparada *in situ*, lo que suele ocasionar trastornos y pérdidas de tiempo y puede conducir a la irradiación del personal y a la contaminación de los instrumentos.

En el método de integración, por inyectarse el trazador de una sola vez, éste puede llevarse preparado desde el laboratorio sin tener que realizar manipulaciones en el campo.

La inyección simultánea del trazador en varios puntos de la corriente presenta problemas prácticos cuando la operación se efectúa a caudal constante.

b) *Toma de muestras.* — El método de integración exige unos equipos y medios más perfeccionados que los precisos en el método de inyección continua, para la derivación de corriente o tomas periódicas en varios puntos de una misma sección. En la estación de toma son menores las precauciones a adoptar en la manipulación del trazador, ya que éste se encuentra en concentraciones mucho menores.

c) *Cantidad de trazador a inyectar.* — Consideremos las curvas de la figura 1.^a, que reflejan el paso del trazador por la estación de toma o de medida.

La curva 1 corresponde al método de integración, y la curva 2 al de inyección continua.

En el primer caso, desde el momento en que aparece el trazador en la estación de toma puede iniciarse la medida. No así en el segundo caso, en que es necesario esperar a que se establezca el régimen permanente, es decir, el *plateau* de la curva. Antes de alcanzarse el *plateau* y después de éste, estará pasando solución trazadora que no es aprovechable para el aforo. También se deduce matemáticamente que

la cantidad de trazador necesaria para aforar un mismo caudal es mayor con el método de inyección continua que con el de integración. Experimentalmente se ha demostrado que con el método de inyección continua, ésta cantidad es de 1,2 a 2 veces superior a la del método de integración.

5. Trazadores radiactivos.

Las características que deben reunir los trazadores radiactivos para que sean utilizables en la medida de caudales son:

- a) Fidelidad de marcado.
- b) Solubilidad en agua.
- c) Baja radiotoxicidad.
- d) Al ser detectados *in situ* conviene que sean emisores de radiación gamma o de partículas beta de baja energía.
- e) Corto período de semidesintegración.
- f) Posibilidad de ser preparados con elevada actividad específica.
- g) Facilidad de adquisición y precio reducido.

Pueden ser utilizados como posibles trazadores los isótopos siguientes: sodio-24, fósforo-32 (en forma de fosfato), cromo-51 (en forma de $^{51}\text{Cr-EDTA}$), bromo-82, itrio-90, iodo-131, oro-198 y tritio.

Los que más se aproximan a las condiciones ideales para ser empleados para la medida de caudales son el iodo-131 y el tritio en forma de agua tritiada.

El iodo que dispone de un período ideal de semidesintegración, 8,05 días, permite efectuar su medida *in situ* y son grandes sus posibilidades de adquisición, ya que en nuestro país es elevado su consumo en Medicina.

El mayor inconveniente del iodo estriba en su algo inseguro comportamiento químico por pasar a estados de oxidación distintos del ión yoduro. Ello obliga a efectuar una reducción del mismo cuando se quiere precipitar como yoduro de plata.

El tritio proporciona un marcado perfecto, su comportamiento químico y físico son iguales a los del agua normal, y no ofrece riesgo alguno de manipulación, aunque su período es muy largo, ya que se emplea en cantidades insignificantes. Este largo período significa una gran ventaja en caso de realizarse varios aforos, pues-

to que puede adquirirse una gran cantidad de tritio y emplearlo en fracciones sin que experimente disminución su actividad específica, con el consiguiente abaratamiento.

La mayor desventaja del tritio se halla en la necesidad de disponer de un costoso equipo para realizar su medida. No obstante este inconveniente, considerando los múltiples empleos del tritio en hidrología, puede asegurarse trabajo continuado al equipo, con lo cual, también desde este punto de vista resulta recomendable su utilización.

II. PARTE EXPERIMENTAL

1. Introducción.

A pesar de la todavía escasa difusión que el empleo de los radioisótopos ha alcanzado para el aforo de grandes caudales, son varias sus ventajas, ya que, principalmente, puede realizarse este tipo de aforos con un volumen mínimo de solución trazadora. Además, según hemos visto, ofrecen la posibilidad de realizar los aforos *in situ*.

Una justificación de este poco uso puede hallarse en la prevención contra todo lo concerniente al uso de radioisótopos, por el riesgo de irradiación y contaminación. En el caso de aforo de caudales estos riesgos son totalmente despreciables.

El Gabinete de Aplicaciones Nucleares a las Obras Públicas ha llevado a cabo, durante más de dos años, una serie ininterrumpida de ensayos con vista a la puesta a punto de un método de aforo con isótopos radiactivos que pudiera ser utilizado de una manera rutinaria por el personal encargado de los aforos en las Confederaciones y presentara ventajas con respecto a los métodos clásicos actualmente en uso.

Nuestras experiencias han sido orientadas con los propósitos siguientes:

- a) Estudio comparativo de los diferentes métodos de aforo con trazadores.
- b) Selección de los trazadores más adecuados.
- c) Desarrollo de técnicas de trabajo y equipos aptos para efectuar los aforos sin riesgos y sin precisar el concurso de especialistas del campo nuclear, salvo en un primer período de adiestramiento.

d) Establecimiento de métodos prácticos y puesta a punto de un método rutinario.

Se han realizado ensayos de aforo con productos químicos en cauces pequeños (1 a 30 metros cúbicos/segundo), empleando, tanto el método de inyección continua como el de integración. La experiencia adquirida ha servido para el desarrollo de equipos adecuados para el aforo con trazadores radiactivos y evaluar las posibilidades y limitaciones de los trazadores químicos.

Con trazadores radiactivos sólo se ha hecho uso del método de integración, ya que, aparte las razones expuestas en la primera parte de este informe, es el que ofrece más posibilidades para un empleo en gran escala. El método de inyección continua ha sido desechado, para las experiencias con radioisótopos, por no resultar fácil el desarrollo de un procedimiento de inyección a caudal constante que ofrezca condiciones de total garantía. Ello se debe a que la inyección del trazador tiene que prolongarse durante un período de tiempo relativamente largo,

lo que implica, a su vez, la necesidad de emplear grandes volúmenes de solución trazadora que deberán prepararse *in situ*, a menos que se utilicen envases de plomo demasiado pesados y molestos para el transporte.

La preparación de la solución radiactiva a inyectar, así como la de la muestra necesaria para el calibrado del equipo de medida, deben llevarse a cabo en el laboratorio, para evitar cualquier manipulación peligrosa. Con ello se facilita la realización de los aforos por personal no especializado en el campo nuclear.

2. Inyección del trazador.

Se ha podido observar que una inyección múltiple (en cuatro o cinco puntos de la corriente) facilita considerablemente el mezclado del trazador y permite reducir la distancia que separa las estaciones de inyección y de medida o toma de muestras.

Han sido desarrollados los dos métodos de inyección que se describen a continuación:

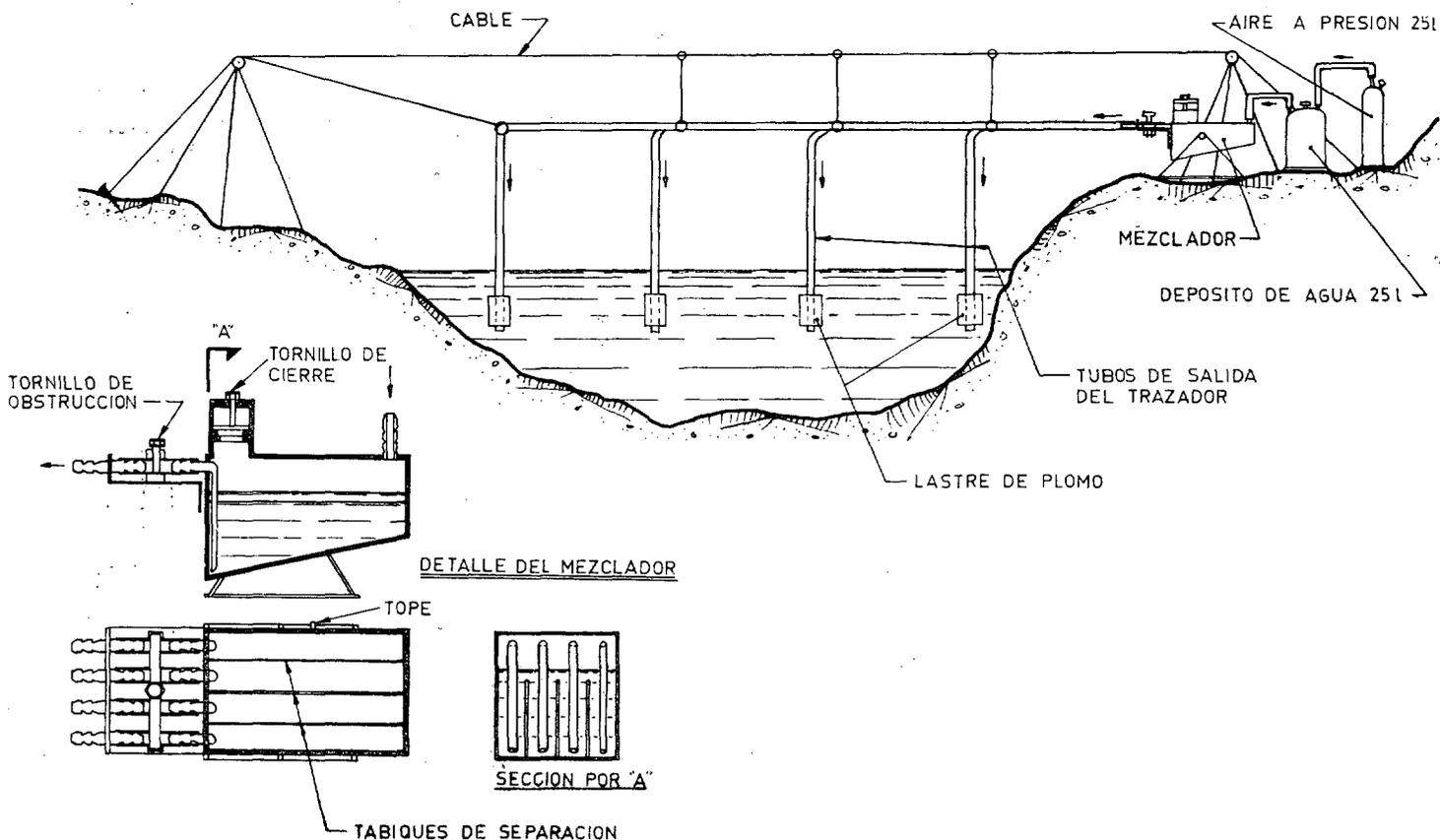


Fig. 2.^a. — Esquema del procedimiento de inyección del trazador con agua a presión que permite su distribución en partes iguales (igual actividad, en cuatro puntos de la corriente).

2.1. Inyección en cuatro puntos de la corriente.

Para inyectar cuatro fracciones del trazador de igual actividad en otros tantos puntos de una sección transversal del cauce, se ha diseñado el equipo esquematizado en la figura 2.^a. El recipiente mezclador de acero inoxidable consta de cuatro compartimentos iguales, comunicados por su parte superior. Cada compartimento dispone de una salida a la que se une el correspondiente tubo de plástico que conduce el trazador a la corriente. Los cuatro tubos van provistos de sendos lastres de plomo que se sumergen en la corriente en el punto y profundidad deseados, y van suspendidos de un cable de acero tendido entre ambas orillas.

La inyección se realiza dando paso al aire a presión (3 ó 4 atmósferas) contenido en el recipiente correspondiente. Este aire impulsa los 25 litros de agua contenidos en un depósito auxiliar hacia la corriente a través del mezclador,

arrastrando la solución trazadora y lavando el mezclador y los tubos de plástico.

La principal ventaja consiste en la garantía de que el trazador queda distribuido entre los diversos puntos en proporciones iguales. Los puntos deben distribuirse de forma tal que los porcentajes de trazador que se inyectan en cada punto sean, según el criterio del operador, aproximadamente proporcionales a los caudales parciales de los sectores en que los puntos de inyección dividen a la corriente.

Debido a las manipulaciones del radioisótopo en el campo (dilución del mismo y su vertido al mezclador) este procedimiento no es demasiado adecuado para ser realizado por personal de bajo nivel de adiestramiento.

2.2. Inyección en cinco puntos de la corriente.

El equipo utilizado para esta segunda técnica de inyección viene representado en la figura 3.^a. Consta de un recipiente de acero inxi-

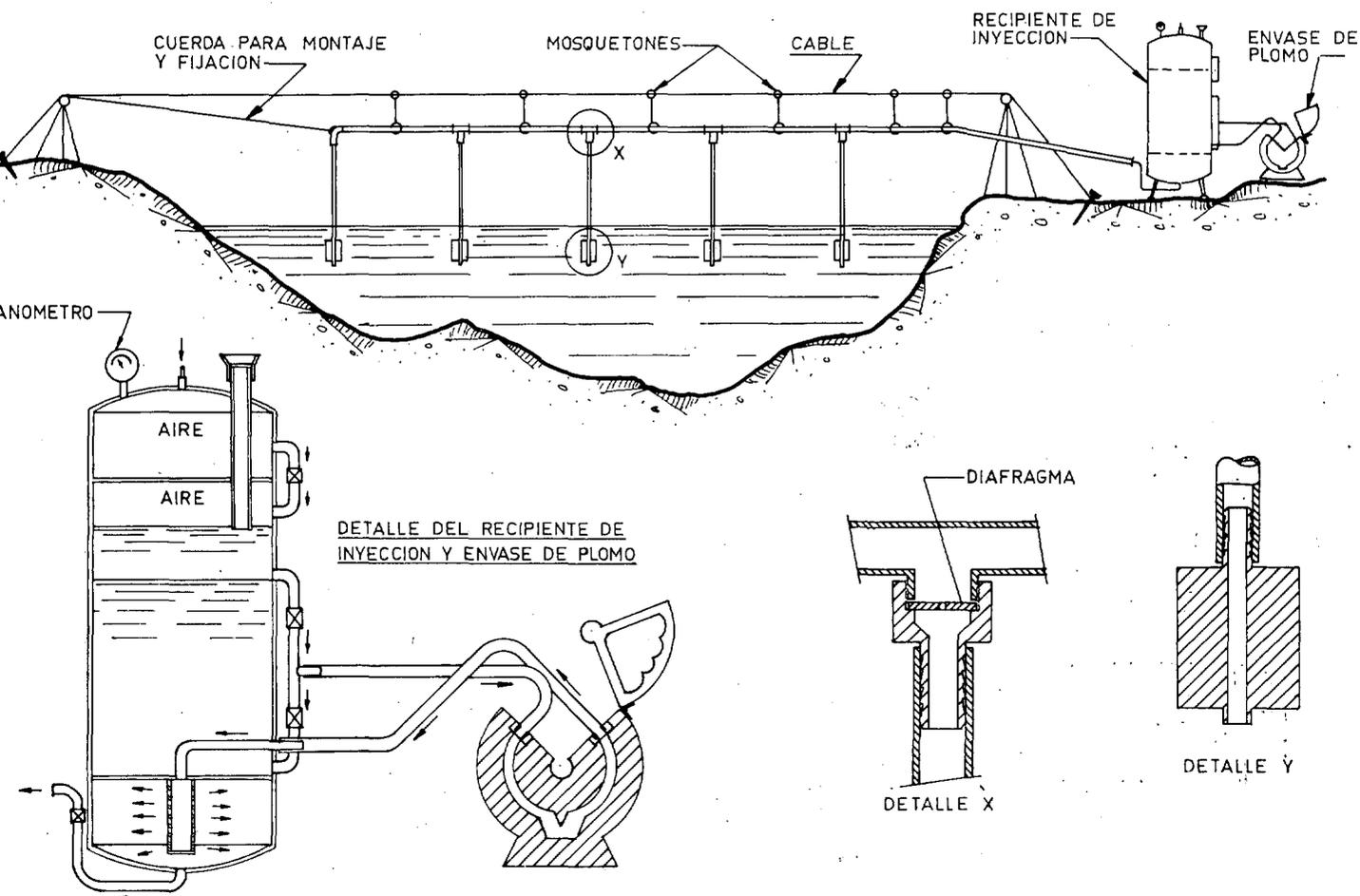


Fig. 3.^a. — Esquema de funcionamiento del sistema de inyección mediante línea simple con múltiples salidas laterales.

dable, para el aire a presión y el agua, un envase de plomo, que contiene el isótopo a inyectar, y una línea de inyección con cinco salidas laterales.

El recipiente de acero está dividido en tres compartimentos (A, B y C). El compartimento C se llena de agua a través de 10, el B hasta L_1 a través de 1 y el A con aire a presión (5-10 atmósferas). La parte superior de B también se llena de aire a través de la válvula 3.

para efectuar la inyección se levanta la tapa y se extraen los tapones metálicos colocando en el lugar de ellos los racores para adaptar las tuberías de plástico que se conectarán al recipiente de acero inoxidable en los puntos 5 y 7.

La línea de inyección consiste en una serie de tubos de plástico resistentes a 10 atm., que se empalman entre sí por medio de piezas metálicas en "T". De cada una de las "tes" y del codo final parten líneas laterales que se sumer-

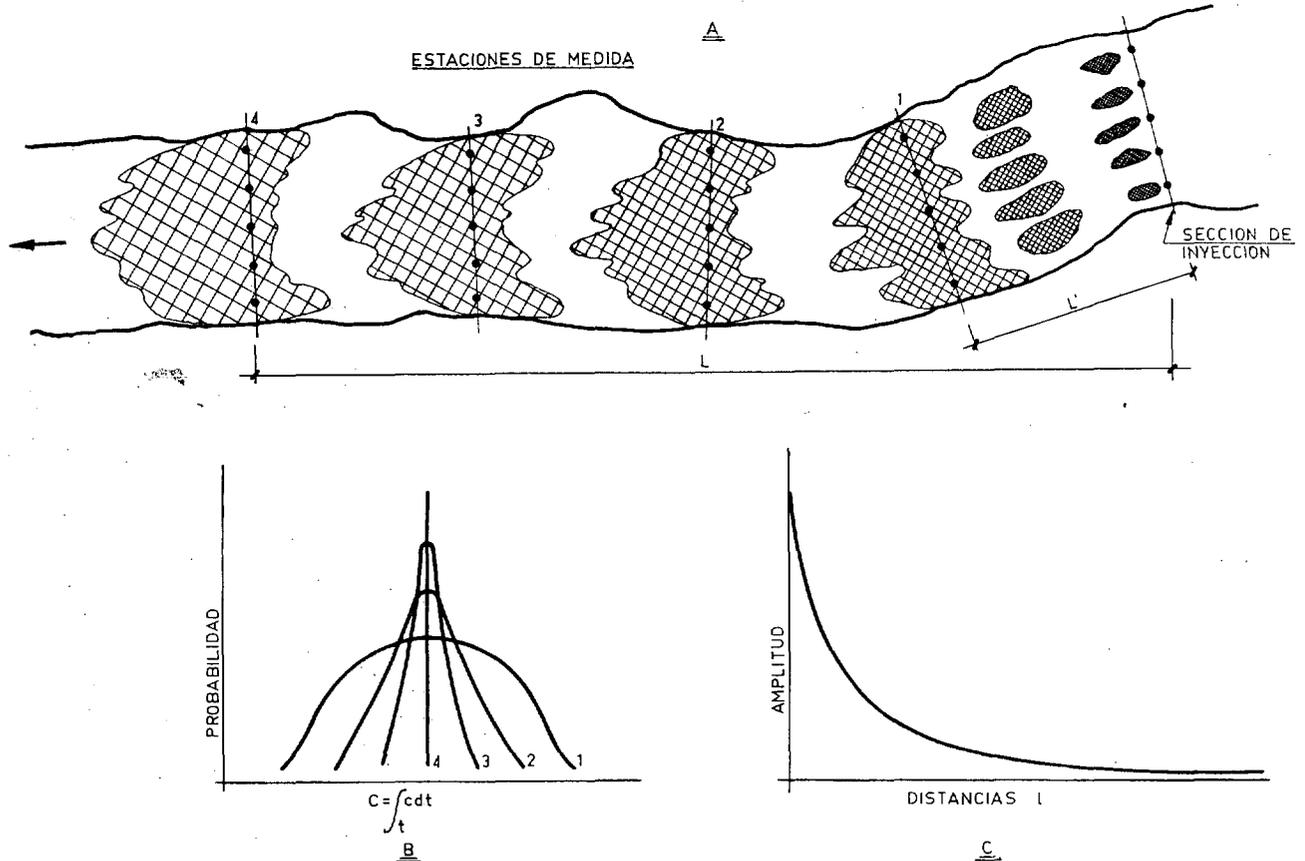


Fig. 4.ª. — Representación esquemática del proceso de mezclado del trazador mediante inyección en 5 puntos.

El envase con blindaje de plomo sirve para el transporte del material radiactivo al lugar de la experiencia y para efectuar su inyección en la corriente. El medio de transporte puede ser cualquiera, incluso público. Este recipiente dispone de una cavidad interior cilíndrica en la que se introduce la solución a inyectar. Los dos extremos se cierran mediante tapones metálicos. La tapa en V dispone de un asa para el transporte y en la parte inferior del vértice queda una cavidad en la que se coloca la muestra de calibrado. Recibido el envase desde el laboratorio,

gen en la corriente, convenientemente lastradas. En las "tes" y en el codo se adaptan unos diafragmas (detalle X) de orificio central regulable con objeto de conseguir que el trazador salga en igual cantidad por las cinco bocas. Toda la línea va suspendida de un cable de acero, tendido previamente de orilla a orilla, mediante mosquetones.

Para efectuar la inyección se conectan la línea de inyección y el recipiente de plomo al recipiente de acero inoxidable. En primer lugar se abren las válvulas 10 y 4, con lo cual el agua

existente entre L_1 y L_2 (unos 5 litros) arrastrará la solución radiactiva hacia el compartimento C (15 litros) a través del tubo perforado 8, que facilita un mezclado casi instantáneo del trazador en el agua. Los 20 litros de agua que se ponen en circulación en esta primera etapa son casi el doble del volumen total interno de la línea de inyección (70 m. de longitud, que es suficiente para la mayoría de los ríos nacionales). Seguidamente se cierra la válvula 4 y se abren las 6 y 3. La presión de A arrastra el agua de B (25 litros) a través del recipiente de plomo, del compartimento C y de la línea de inyección, efectuándose el lavado de éstos. La duración total de la inyección no es mayor de uno o dos minutos.

Las ventajas de este sistema de inyección son considerables:

- Eliminación completa de los riesgos de irradiación o contaminación.
- Fácil y cómodo montaje.
- Posibilidad de inyectar el trazador a la profundidad que convenga dentro de la corriente al objeto de facilitar su mezclado.
- Método adaptable a cualquier río.

Se han realizado ensayos en el laboratorio para observar la salida del trazador por las cinco derivaciones de inyección. Regulando los diafragmas (X), la distribución es equitativa (± 20 por 100), aunque si no lo fuera no tendría mayor importancia, puesto que las bocas también deberán situarse transversalmente sobre el cauce en función de los caudales parciales en que queda dividida la corriente.

El mayor inconveniente, al igual que en el anterior método, puede residir en el tendido del cable de sustentación sobre el río. Por tanto, es recomendable que el cable se tienda de una vez para siempre en aquellos lugares en que se realicen los aforos de forma periódica.

Experimentalmente se ha comprobado (figura 4.^a) que, con este método, la mezcla del trazador en el agua del río es muy rápida y prácticamente uniforme a poca distancia de la sección de inyección.

Esto lleva consigo:

- 1.º Posibilidad de reducir la distancia entre las estaciones de inyección y toma de muestras.
- 2.º Disminución de la cantidad de trazador que es preciso añadir a la corriente.
- 3.º Mayor exactitud en los resultados.

3. Toma de muestras y medida del trazador.

Se pueden desarrollar, como es lógico, numerosos sistemas de toma de muestras. El Gabinete de Aplicaciones Nucleares ha puesto a punto varios métodos con los que pueden llevarse a cabo aforos en cauces de muy distintas características. La elección del procedimiento más adecuado en cada caso debe realizarse teniendo en cuenta el grado de preparación del personal disponible, la frecuencia con que hayan de realizarse los aforos y la urgencia con que se necesiten los datos.

En todos los métodos desarrollados se ha procurado de una manera primordial que:

- a) La actividad de trazador a emplear debe ser lo más baja posible.
- b) La solución trazadora a inyectar no debe ser objeto de manipulación alguna que ofrezca riesgo de irradiación o contaminación.
- c) El montaje de los sistemas de inyección y toma de muestras debe ser simple y rápido.

3.1. Toma de muestras a intervalos conocidos.

Su empleo es recomendable cuando concurren las siguientes circunstancias: a, no se dispone de personal especializado para realizar los aforos, y b, no es de urgencia inmediata el disponer del resultado, pudiendo aceptarse un retraso inferior a una semana.

Con este procedimiento se necesita la colaboración directa de nuestro Laboratorio, cuya misión consistirá, por una parte, en proporcionar el material radiactivo perfectamente dosificado y preparado para su inyección y, por otra, procesar y medir las muestras de agua tomadas en la corriente.

Para llevar a cabo la toma de muestras se utilizan de 3 a 5 equipos, todos iguales (fig 5.^a), que van montados sobre sendas balsas neumáticas colocadas regularmente en una sección de la corriente y fijas a un cable de acero tendido sobre el cauce.

Dadas las dificultades prácticas para lograr un sistema de toma continua de muestras con un caudal constante muy pequeño, se ha diseñado un equipo apto para realizar tomas intermitentes periódicas en la corriente durante el tiempo de paso de la ola de trazador. La periodicidad en las tomas se logra mediante un pro-

gramador que intermitentemente excita una electroválvula situada a la entrada de un recipiente de 5 litros de capacidad. Durante el tiempo que está abierto el paso de la electroválvula, cae al recipiente un caudal constante, dependiente del diafragma regulador (el cual es intercambiable) y de la cota de agua (que es fija). En el ciclo si-

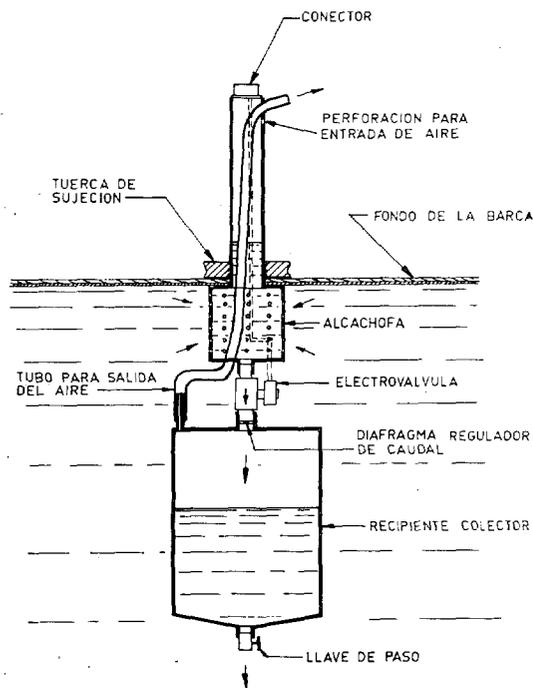


Figura 5.^a.

guiente se cierra el paso de la electroválvula y deja de caer agua al depósito.

El recipiente va provisto en su parte inferior de una llave para el vaciado de la muestra colectada, una vez concluida la operación. Esta muestra es remitida posteriormente a nuestro Laboratorio para su análisis.

Dado que este volumen debe ser recogido durante todo el tiempo de paso de trazador, es preciso, en función de este tiempo, calculado *a priori* de una forma aproximada, variar los tiempos parciales de cierre y apertura de la electroválvula, esto puede lograrse mediante el programador, convenientemente preparado con este fin.

Tanto el programador, como la electroválvula se alimentan por una batería de 24 voltios, lo cual asegura el trabajo, independientemente de la existencia de una red próxima de corriente industrial a 127-220 voltios.

Dado el elevado número de ciclos (20 a 80) que realiza el programador hasta completar los 5 litros, la muestra recogida es prácticamente equivalente a la que se obtendría por toma continua y por consiguiente es representativa del valor real de la expresión $\int c \cdot dt$.

En el Laboratorio se conserva una muestra para calibrado de la solución de iodo-131 inyectada. Debido al escaso volumen de las muestras, las actividades colectadas serán pequeñas, y para que su medida pueda llevarse a cabo con suficiente exactitud será preciso hacer uso de un método de medida de gran eficacia y bajo fondo.

Nuestro Laboratorio ha previsto la utilización de un detector de centelleo con fósforo líquido con dos tubos fotomultiplicadores trabajando en coincidencia, fabricado por Packard, modelo Tri-Carb 3375. El procesamiento de las muestras lleva consigo la precipitación del ¹³¹I en forma de ¹³¹IAg, previa adición de una cantidad conocida de ión ioduro como portador, solución del precipitado con SO₄H₂ y Zn y destilación del iodo, que es recogido en benceno para su medida.

Como ejemplo, diremos que, empleando este equipo, la actividad total del ¹³¹I, que es necesario inyectar en la corriente para aforar un caudal de 100 m.³/s., suponiendo un tiempo de paso de la ola de trazador de treinta minutos y que de la muestra total recogida de 5 litros solamente 3 han sido recogidos durante el paso del trazador (correspondiendo el resto a los períodos anterior y posterior al paso del isótopo por la estación de toma de muestras), es de 0,5 milicurios. Esta actividad es absolutamente despreciable, tanto en el orden económico como desde un punto de vista de los riesgos de manipulación.

Las ventajas de este procedimiento de aforo pueden resumirse en los siguientes puntos:

- a) Gran simplicidad de los trabajos de campo, por lo que no se precisa personal especializado, siendo suficiente una explicación previa del uso de los aparatos.
- b) Mínimo consumo de material radiactivo.
- c) Manejo de pequeños volúmenes de agua.
- d) Escaso requerimiento de personal: para cada aforo sólo se necesitan dos o tres personas.

Los inconvenientes más importantes radican en la imposibilidad de obtener los resultados

in situ y en el envío de las muestras al laboratorio para ser procesadas.

3.2. Toma continua de muestras a caudal constante.

En este procedimiento la medida del trazador se realiza *in situ* y requiere personal con ciertos conocimientos elementales de radiactividad.

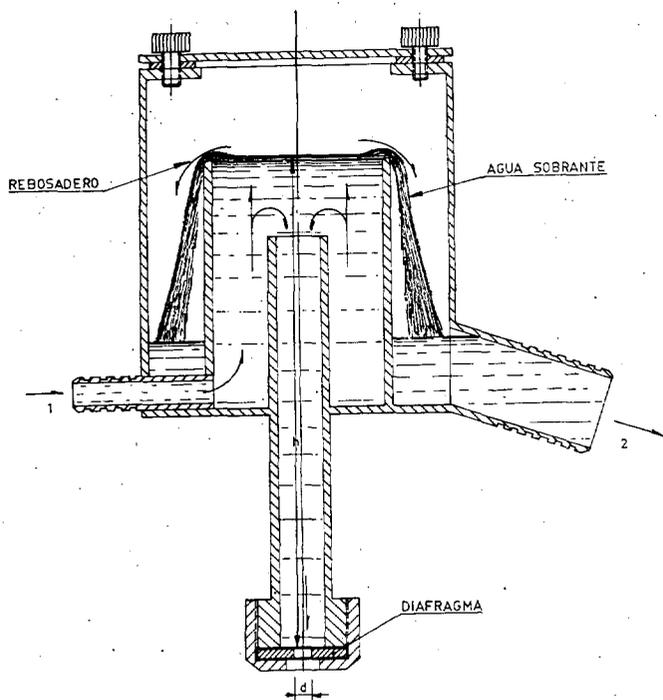


Figura 6.^a.

El método es recomendable cuando se desea disponer de un equipo volante de aforos, completamente autónomo, que pueda abarcar diversos puntos, o la totalidad de una cuenca hidrográfica.

Durante todo el tiempo que dura el paso de la ola del trazador hay que efectuar, en tres o cuatro puntos de la corriente, una toma a caudal constante. Estos puntos deben estar distribuidos con alguna uniformidad en la sección del cauce. De esta forma, las muestras tomadas acusarán mejor un posible incumplimiento de la condición de "buena mezcla" y, por otra parte, el valor medio de los caudales obtenidos en cada una de estas muestras se acercará más al caudal verdadero de la corriente.

Para realizar la toma continua se utiliza una célula de nivel constante como la indicada esquemáticamente en la figura 6.^a. A través de ella tiene que derivarse un pequeño caudal que ha de ser mayor que el que puede dar salida el diafragma. El diámetro del orificio del diafragma tiene que ajustarse para que proporcione un caudal tal que, durante el tiempo de paso de la "ola de trazador", permita recoger una muestra de volumen conveniente para efectuar la medida de su actividad.

Sobre el cauce se tienden un cable flexible de acero y un conductor eléctrico. A distancias regularmente distribuidas, se fijan al cable unas balsas sobre las que se coloca todo el material necesario para efectuar la toma. En la figura 7.^a se muestra una de estas balsas con el equipo completo. La célula de nivel constante va acoplada directamente sobre el recipiente colector. Para la conexión y desconexión de la alimentación de la bomba peristáltica se emplea un relé accionado desde la orilla.

El agua se toma a través de una alcachofa lastrada con plomo que se sumerge en la corriente a la profundidad deseada y elimina cualquier riesgo de obstrucción. Debido a que con este método de aforo no se conoce el momento de llegada de la ola de trazador ni la duración del paso de ésta por la estación de toma, es conveniente realizar algunas experiencias previas que puedan orientar sobre dichos tiempos. También puede sumergirse aguas arriba de la estación de toma un detector que acuse la llegada del trazador. Todas estas precauciones pueden ser innecesarias cuando ya se han realizado algunos aforos en el mismo tramo del río por este procedimiento. Si la actividad A del trazador inyectado es suficientemente grande, la actividad a de la muestra media colectada puede medirse directamente.

Para efectuar la medida, el agua de la muestra media se introduce en un recipiente en cuyo centro existe un tubo para alojar el detector de centelleo con cristal de $INa(Tl)$, conectado a una escala transistorizada portátil. El fondo se determina llenando el recipiente con agua no contaminada. Para obtener el factor de calibrado, se llena de nuevo el recipiente con una solución que contiene una fracción conocida del trazador inyectado, que se recibe ya preparada del laboratorio. Para aforar un caudal de 100 metros cúbicos por segundo por este procedimiento se necesitará inyectar 360 mC de iodo-

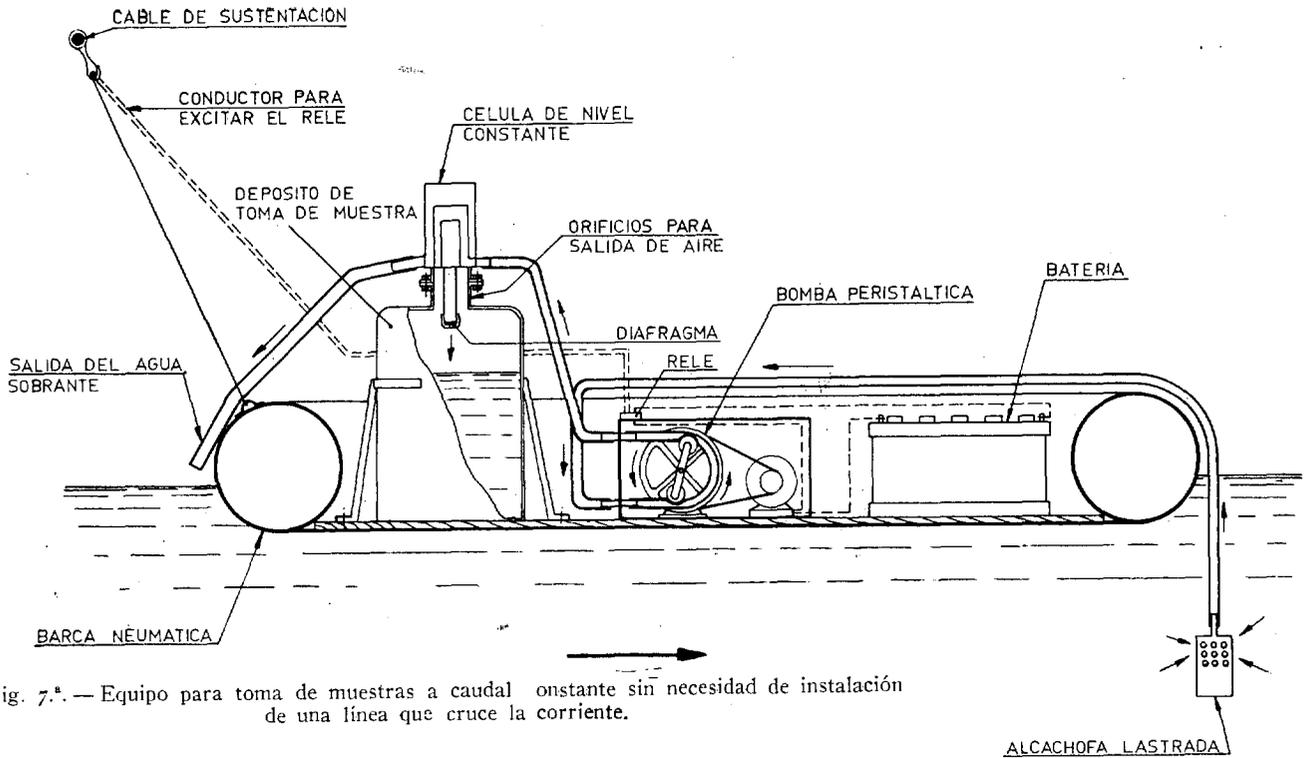


Fig. 7.^a — Equipo para toma de muestras a caudal constante sin necesidad de instalación de una línea que cruce la corriente.

131, suponiendo, el mismo tiempo de paso de la ola del trazador, un volumen de agua colectado de 30 litros y una velocidad neta de recuento de la muestra de 1 000 cuentas/minuto.

Una variante de este método, en lo que a la medida del trazador se refiere, ensayada con éxito por este Gabinete, consiste en realizar una concentración previa del trazador en la muestra media, basada en la precipitación del ¹³¹I en forma de ioduro de plata. Esta concentración tiene por objeto aumentar la sensibilidad con que puede medirse el trazador, lo que permite reducir la actividad a inyectar, y por tanto, afrontar grandes caudales (superiores a 200 m.³ por segundo) con actividades razonablemente bajas.

Para la precipitación se utiliza el recipiente de la figura 8.^a, construido en acero inoxidable y de unos 50 litros de capacidad, provisto de un agitador accionado por un motor eléctrico de 12 V. de corriente continua.

La muestra media se introduce en este recipiente y se añade una cantidad conocida de ión ioduro como portador. A continuación, para tener seguridad de que todo el iodo colectado de la corriente se encuentra en forma de I⁻, se realiza una reducción con SO₄H₂ (200 ml. de SO₄H₂ 1:1) y Zn durante unos treinta minutos.

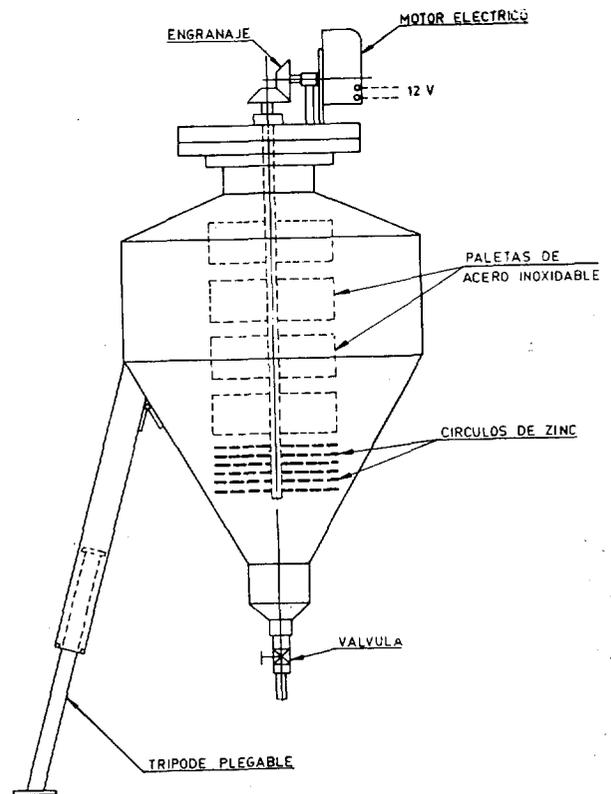


Figura 8.^a.

El Zn se introduce en forma de una serie de placas que se fijan a la parte inferior del agitador. Por último, se precipita con exceso de NO_3Ag .

La reducción con hidrógeno nascente ha conlucido a excelentes resultados comprobados a través de más de 50 experiencias. No ha ocurrido lo mismo con otros reductores ensayados, por ejemplo, bisulfito en medio ácido, en cuyo caso se ha observado que el iodo colectado de la corriente sólo se reducía parcialmente.

El IAg recuperado, simplemente, por decantación (80 a 90 por 100 del total) se trata, antes de su medida, con amoniaco 1 : 1 en caliente (para disolver los otros halogenuros de plata coprecipitados) y luego con NO_3H concentrado. La medida se efectúa con un detector de centelleo tipo pozo.

La última operación consiste en la valoración química del iodo total existente en la muestra medida. Para ello, el IAg se disuelve con SO_4H_2 y Zn, se destila el iodo con Fe_3^+ en medio ácido, recogiénose en solución de IK que se valora luego con tiosulfato. La relación entre el iodo encontrado en la muestra y el añadido como portador da un factor de calibrado que se emplea para corregir la velocidad de recuento obtenido. De esta forma, se evita la necesidad de recuperar cuantitativamente el iodo colectado, facilitándose y abreviándose considerablemente las operaciones a efectuar.

Por este procedimiento, se consigue reducir la cantidad de isótopo iodo-131 necesaria para efectuar un aforo en un factor comprendido entre 40 y 80.

3.3. Derivación de una corriente a través de un depósito.

Este método de toma de muestras es el más indicado para establecer en una estación fija de aforos. Se basa en la derivación, durante todo el tiempo que dura el paso de la ola de trazador, de un pequeño caudal extraído de la corriente que se hace pasar a través de un depósito, en el que está situado el detector.

La estación fija de aforos consta de dos casetas: una de inyección y otra de medida, ambas con sus respectivos equipos y separadas por la distancia necesaria para alcanzar en ella la condición de buena mezcla.

Para efectuar la toma, se disponen tres tuberías metálicas, uniformemente distribuidas en la sección transversal de inyección, con los extremos protegidos por alcachofas filtrantes, y algo elevadas por encima del lecho del río. Estas tuberías van unidas a los grupos motobomba que elevan el agua hasta la caseta. Los tres caudales parciales se regulan por las válvulas de control de modo que sean sensiblemente iguales. Los caudales de cada bomba, leídos mediante tubos Pitot, se reúnen en un sólo conducto para entrar en el depósito mezclador y de medida. La entrada en éste se realiza por la parte inferior, y en la parte superior, se encuentra el desagüe, para verter directamente al río.

El volumen del recipiente de medida es de unos 100 litros. Por tanto, si cada bomba proporciona un caudal de 100 litros/minuto, el agua se renovará en el depósito tres veces por minuto. La disposición de los conductos de entrada y salida favorece la renovación del agua e impide la existencia de zonas muertas. Con objeto de eliminar los perjuicios que se originarían en caso de fallo del equipo, se disponen como accesorios complementarios tres recipientes provistos de células de nivel constante para tomas de muestras medias, según el procedimiento descrito en el apartado anterior. Estas muestras se conservan para comprobar los resultados obtenidos con el recipiente de derivación.

El equipo instalado en el interior de la caseta consta de:

- a) Tres grupos motobomba (A), a los cuales se acoplan las tres conducciones metálicas mencionadas anteriormente.
- b) Un recipiente, donde se halla instalado el detector de centelleo, y al cual llegan los tres caudales derivados del río. Este recipiente está, asimismo, acoplado a la tubería de salida, de modo que se encuentre lleno en todo momento.
- c) Tres recipientes, respectivamente, acoplados a las conducciones de toma, provistos de células de nivel constante y alojamiento para el detector de centelleo, en los cuales se realizarán las tomas de muestras medias a caudal constante, que servirán posteriormente para la comprobación de los resultados.
- d) Una escala para registrar las medidas.

La derivación de la corriente a través del recipiente de medida se inicia incluso antes de inyectar el trazador radiactivo, a fin de comprobar su correcto funcionamiento y determinar con exactitud el fondo. Durante el paso de la ola se van tomando medidas a intervalos de dos minutos, y se concluye la toma de datos diez o doce minutos después de finalizar el paso del trazador, lo cual se conocerá porque la velocidad de recuento del detector habrá descendido hasta la correspondiente al fondo inicial.

Para comprobar el resultado se miden las tomas colectadas por medio de las células de nivel constante, debiendo coincidir la media de estos resultados con el obtenido directamente en el recipiente mezclador.

En la figura 9.^a se muestra esquemáticamente la caseta de toma de muestras y medida.

Para determinar el factor de calibrado se diluye una muestra de actividad 10^{-3} A (A es la actividad total inyectada) en 1 litro de agua. Un volumen, V, de esta solución, bien homogeneizada, cuya actividad sea de 2 a 5 microcurios de iodo-131 se añade al recipiente de medida que se encuentra lleno de agua. Se agita hasta conseguir una buena homogeneización y se lee la velocidad de recuento proporcionada por el detector.

El factor de calibrado será:

$$F = 100 \frac{V_M - V_F}{V \cdot A} \cdot 10^6 \frac{\text{cuentas}}{\text{minuto}} / \frac{\text{curios}}{\text{litro}}$$

donde V_M designa la velocidad de recuento obtenida al efectuar el calibrado, y V_F , el fondo.

$\frac{V \cdot A}{10^3 \cdot 10^3}$ es la actividad presente en el volumen V (mililitros) de la solución de calibrado, y 100 es la capacidad del recipiente mezclador expresada en litros.

Si F se expresa en $\frac{\text{cuentas}}{\text{segundo}} / \frac{\text{curios}}{\text{m}^3}$, el caudal Q se obtiene por la relación:

$$Q = \frac{A}{N} \cdot F = \frac{A}{N} \cdot \frac{V_M - V_F}{V \cdot A} \cdot 10^8 \cdot \frac{1}{\times}$$

$$Q = \frac{V_M - V_F}{6 V \cdot N} 10^4 (\text{m}^3/\text{seg}.)$$

Las ventajas de este procedimiento pueden resumirse así:

- a) Permite obtener los resultados *in situ*.
- b) No es preciso transportar los equipos.
- c) Rápida obtención de los resultados,
- d) No se requiere personal muy especializado.

El mayor inconveniente estriba en el costo de las instalaciones, si bien el equipo de medida, que constituye una parte importante del presupuesto total, puede servir para varias instalaciones de este tipo.

III. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

1. Resultados obtenidos en los afloros.

A pesar de que interesaba más la investigación de las posibilidades de explotación futura de cada una de las técnicas de aforo que el llegar a resultados muy exactos en las determinaciones de los caudales, se han obtenido resultados satisfactorios en un elevado porcentaje de las experiencias llevadas a cabo, según se ha comprobado con datos proporcionados por las Centrales Hidroeléctricas existentes en las cercanías. Para ensayar los equipos se han rechazado situaciones ventajosas que hubieran mejorado considerablemente las condiciones de trabajo. En la tabla I se reflejan algunos datos relativos a las experiencias.

Los caudales obtenidos a partir de cada una de las muestras o puntos de medida son un claro índice del grado de mezcla alcanzado por el trazador en la corriente. En algunos casos, no se han determinado los caudales individuales, sino que las diferentes muestras se han mezclado para obtener el caudal medio.

Mediante la medida directa del trazador, con un detector sumergido en la corriente, se ha obtenido, como información complementaria, la curva que refleja el paso del trazador por la estación de medida (fig. 10). Esta curva obedece a una ecuación que es, aproximadamente, diferencia de dos expresiones exponenciales. La rama descendente debe seguir una ley exponencial, hecho que, como se ve, se cumple satisfactoriamente y se aprovecha para extrapolar la parte final de la curva, cuya medida experimental viene afectada por un error considera-

TABLA I.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS AFOROS CON RADIOISOTOPOS							
Río	Radioisótopo	Actividad inyectada — mC.	Procedi- miento	Distancia entre estaciones de in- yección y medida — m	Caudal encontrado — m. ³ /s		Caudal encontrado por otros medios — m. ³ /s
					Valores individuales (*)	Valor medio	
JUCAR	¹³¹ I	120	1	850	25,8 23,5 28,8 23,6	25,4	—
TAJO	¹⁹⁸ Au	200	1	700	—	73,3	77,3
TAJO	¹³¹ I	45	2	470	—	79,6	78,2
TAJO	¹⁸¹ I	40	2	800	—	56,5	—
TAJO	¹⁹⁸ Au	230	1	800	57,1 51,8	54,4	—
GUADIANA	¹³¹ I	240	2	850	83,5 89,7	85,8	85,3
				700	87,0 83,1		
			3	700	95,2 (90,8) (**)		
GUADIANA	¹³¹ I	300	2	800	76,4 91,2 82,6	83,4	85,7
			3	650	89,6 (85,3) (**)		
GUADIANA	¹³¹ I	270	2	800	79,1 83,0 84,7	82,3	84,9
			3	650	89,3 (84,7) (**)		

(*) En esta columna se indican los caudales calculados a partir de cada una de las muestras tomadas o de cada uno de los puntos de medida.

(**) El caudal indicado entre paréntesis es el obtenido considerando el recuento total calculado por la extrapolación hasta el infinito de la curva de paso del trazador.

1=toma continua a caudal constante (medida directa).

2=toma continua a caudal constante (concentración previa).

3=detector sumergido en la corriente.

CASETA DE TOMA
PLANTA

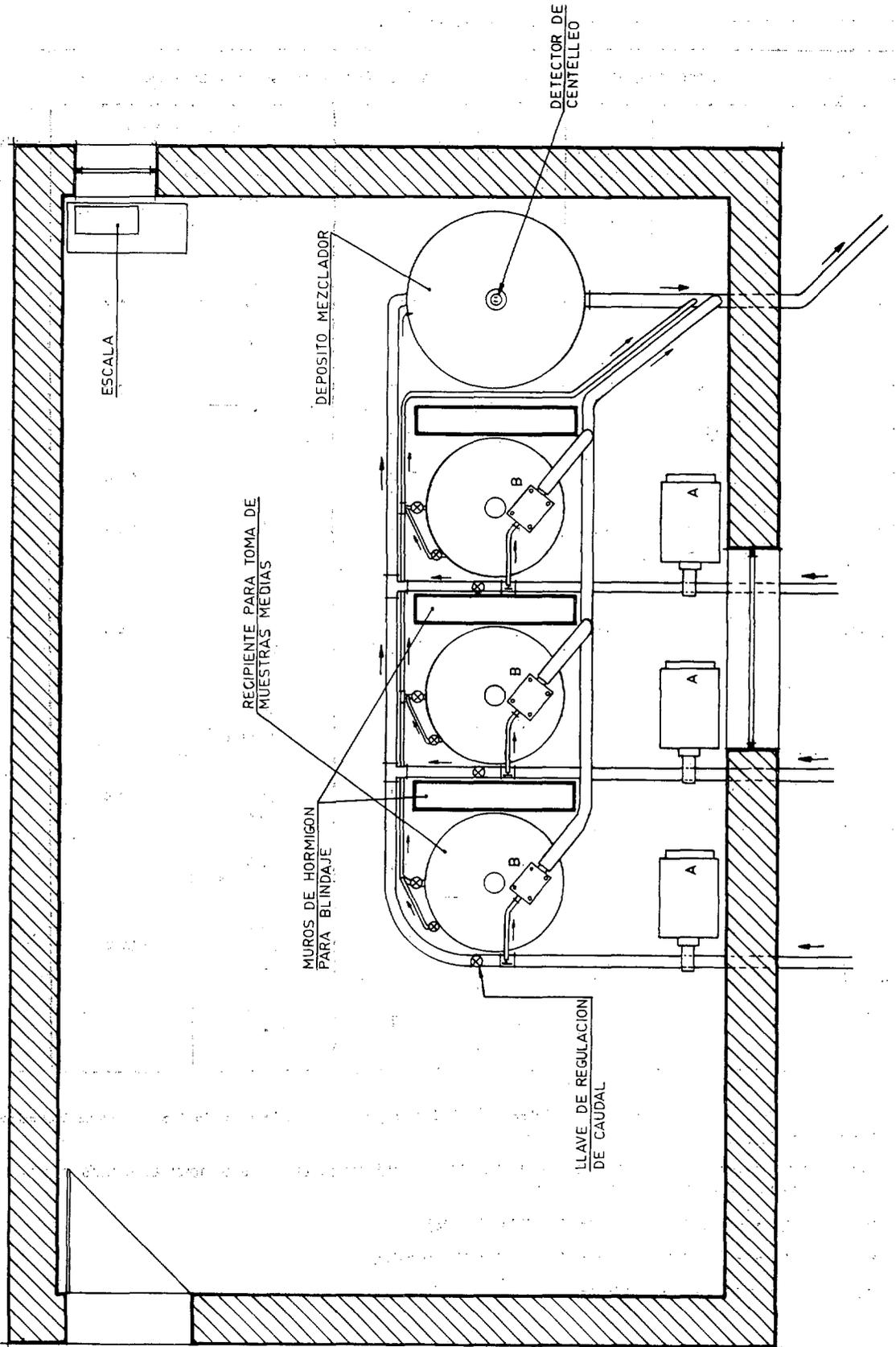


Figura 9.ª

ble debido a que, en ella, las velocidades de recuento son muy bajas comparadas con el fondo del detector.

Todo esto confirma la condición de buena mezcla que experimenta el trazador en el cauce utilizando los dos sistemas de inyección descri-

pero, prácticamente, todas ellas son subsana- bles si se trabaja en condiciones apropiadas. Dentro de estos errores, fáciles de eliminar, merecen citarse los siguientes:

Irregularidades del caudal de toma de mues- tras:

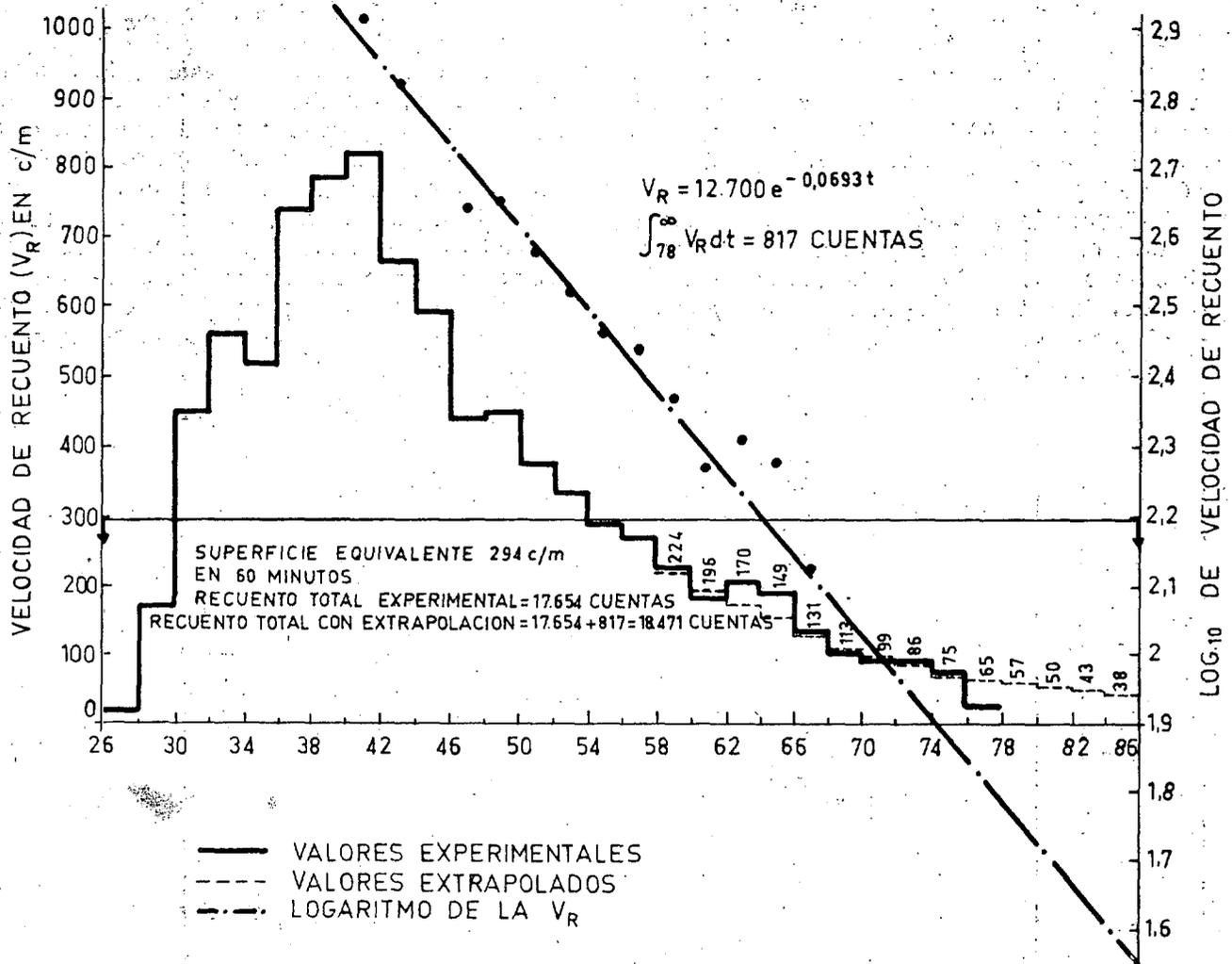


Figura 10.

tos, es decir, inyectando en cuatro o cinco puntos de la corriente, según se indicó esquemáticamente en la figura 4.

2. Causas de error en los aforos con radioisótopos.

Son muy diversas las causas que pueden inducir a error en los aforos con radioisótopos,

Incumplimiento de la condición de buena mezcla.

Retención del trazador por el terreno, entre las estaciones de inyección y de toma, la cual es despreciable en general, tanto por la corta distancia que separa ambas estaciones, como, en caso de utilizarse iodo-131, por las buenas cualidades al respecto del ión I⁻.

3. Conclusiones.

Los riesgos de irradiación externa e interna para el personal que realiza los aforos son nulos si la solución trazadora se inyecta a la corriente directamente desde el envase de plomo en que se efectúa el transporte.

Para evitar los riesgos que puedan derivarse de la contaminación de las aguas basta con procurar que, durante la experiencia, no sea consumida agua de la corriente en un tramo que puede variar, según los casos entre uno y varios centenares de metros a partir de la estación de inyección.

La inyección simultánea en varios puntos de la corriente mejora extraordinariamente las condiciones de mezclado, con lo que se reduce: la distancia entre las estaciones de inyección y toma de muestras, el riesgo de obtener resultados erróneos, la cantidad de trazador a uti-

lizar y la retención del mismo por los materiales minerales u orgánicos del lecho del cauce.

Las numerosas experiencias de aforo realizadas han proporcionado resultados muy satisfactorios, habiéndose eliminado las dificultades prácticas que se han presentado, las cuales, casi siempre, han sido debidas a fallos mecánicos en el equipo de toma de muestras.

Por otra parte, considerando el reducido importe (del orden de 500 000 pesetas) de la instalación de una estación fija de aforos con radioisótopos comparado con el correspondiente a una estación clásica, resulta interesante el establecimiento de una estación piloto que, funcionando regularmente, permitiera contrastar la bondad de los métodos propuestos y su utilización, que no debe ofrecer dificultades, cuando no son de fácil aplicación otros procedimientos de aforo, como es el caso de grandes avenidas.