

**ALGUNAS APLICACIONES EN CHILE DE LOS
ISOTOPOS RADIATIVOS EN ESTUDIOS
HIDROLOGICOS**

H. Behrens, J. Mairhofer y colaboradores

CONTENIDO

INTRODUCCION	53
APLICACION DE LOS RADIOISOTOPOS AL ESTUDIO DE DIRECCION Y VELOCIDAD DE AGUAS SUBTERRANEAS	54
PARTE EXPERIMENTAL	55
Aparato	55
Resultados	56
Experiencias en Laguna de Invernada	57
Medida del caudal en pequeños ríos	59
Medidas de dirección de flujo	60
CONCLUSIONES	61
AGRADECIMIENTOS	61
BIBLIOGRAFIA	61

ALGUNAS APLICACIONES EN CHILE DE LOS ISOTOPOS RADIATIVOS EN ESTUDIOS HIDROLOGICOS*

- Dr. J. Mairhofer. Agencia Internacional de Energía Atómica.
- Sres. Ing. A. Benítez, Ing. A. Arriagada y E. Schmidt, de la Sección Hidrología de la ENDESA, que dirige el señor Ing. E. Basso.
- Sres. Ing. F. Alamos, Ing. O. Castillo, A. Infante y R. Campillo, de la Sección Aguas Subterráneas de la CORFO, que dirige el señor Ing. J. Donoso.
- Sres. Ing. E. Falcón y M. Valenzuela, del Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Sr. W. Recke, de la Universidad de Concepción.
- Dr. H. Behrens, Dr. C. Andrade, señoritas T. Palma y A. López y el señor C. Silva, del Centro Nacional de Radioisótopos, Laboratorio de Radioquímica, Universidad de Chile.

INTRODUCCIÓN.

Desde hace algún tiempo se ha venido utilizando los isótopos radiactivos como trazadores en el estudio de hidrología. Estas sustancias no son, en principio, diferentes de los trazadores clásicos (Fluoresceína, Cloruro de Sodio, etc.) pero presentan algunas ventajas importantes sobre estos últimos:

a) Mayor sensibilidad de detección por lo que se pueden usar en cantidades relativamente pequeñas.

b) Se pueden medir "in situ", como ser en el interior de un pozo, el lecho de un río, etc.

c) Desaparición de la contaminación después de un tiempo, con lo cual se puede repetir la experiencia sin interferencias de inyecciones anteriores.

El número de isótopos radiactivos es muy grande, pero no todos se pueden

*Parte del Programa del Proyecto de Aplicaciones de las Técnicas Isotópicas en Hidrología, desarrollado en el período diciembre de 1964 y marzo de 1965, consultó trabajos en los siguientes aspectos:

1. Determinación de la velocidad de escurrimiento de aguas subterráneas en el valle de Copiapó y en el valle de Santiago.
2. Búsqueda de las zonas de infiltración en la Laguna de Invernada, por medio de la determinación de la velocidad de filtración en piezómetros ubicados alrededor de la parte baja de la laguna y por determinación directa de la velocidad de filtración en vórtices ubicados en el fondo de la laguna.
3. Estudio del caudal de pequeños ríos originados por vertientes.
4. Estudio de la dirección del flujo de aguas subterráneas en los lugares mencionados anteriormente.

usar como trazadores en el estudio de las aguas, ya que éstos deben cumplir ciertos requisitos. Un trazador ideal debe trasladarse a la misma velocidad que el agua sin pérdidas debidas a adsorción, precipitación, intercambio, etc; sus características nucleares así como su vida media y radiación característica deben ser tales que permitan su detección "in situ", y que después de cada experimento no interfiera con experiencias de la misma clase y que el uso del agua marcada no constituya un riesgo para la salud de la población. Además de las propiedades mencionadas no debe presentar toxicidad química, debe tener un débil coeficiente de difusión, y no debe modificar la permeabilidad del terreno por precipitación coloidal.

Debido a la amplia variedad de condiciones experimentales, muy pocos isótopos pueden cumplir completamente todos estos requisitos, y vemos así que los trazadores que son fuertemente absorbidos por el suelo, como los cationes, son ligeramente inconvenientes en el estudio de aguas subterráneas, pero algunos de ellos (Na^{24} , Au^{198}) son utilizados satisfactoriamente en medidas de aguas superficiales. Para el estudio de aguas subterráneas se ha demostrado que son satisfactorios los trazadores salinos aniónicos (I^{131-} , Br^{82-}), los átomos Co^{60} y Cr^{51} en forma de quelatos [de versenatos (EDTA)], el complejo $\text{Co}^{60}(\text{CN})_6^{8-}$, y el Ru^{106} bajo una forma aniónica difícil de obtener. Cabe hacer notar que la investigación en este campo está orientada a la búsqueda de moléculas marcadas que pueden usarse convenientemente como trazadores en los distintos aspectos de estudio de aguas.

APLICACIÓN DE LOS RADIOISÓTOPOS AL ESTUDIO DE DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.

Si colocamos un trazador en un pozo, irá desapareciendo con el tiempo, una vez bien homogeneizado en el agua original del pozo. Esta desaparición es función de la velocidad de escurrimiento de la napa. Si suponemos que no existen movimientos verticales y que el trazador está bien mezclado horizontalmente, la concentración del trazador disminuye exponencialmente con el tiempo y de aquí podemos calcular la velocidad de la napa de acuerdo a OGILVI (1).

$$V_r = - \frac{V}{\varphi \cdot F \cdot t} \cdot \ln \frac{C}{C_0}$$

donde

V_r = velocidad de escurrimiento.

V = volumen de dilución.

F = sección transversal del volumen V .

t = tiempo.

C = concentración del trazador para tiempo t .

C_0 = concentración del trazador a $t = 0$.

φ = coeficiente que toma en cuenta la deformación del campo hidrodinámico debido a la presencia del pozo. Este coeficiente está definido por:

$$Q = \varphi \cdot Q_w$$

donde

Q = gasto que pasa a través de la sección transversal del pozo.

Q_w = gasto que pasa a través de la misma sección del suelo.

El problema de la deformación del campo hidrodinámico ha sido resuelto en general por OGILVI, cuyos resultados los vemos en la figura 1, que muestra el valor de φ vs. la relación del diámetro exterior al interior del relleno de grava o limo. El parámetro de estas curvas es la relación de los coeficientes de permeabilidad del filtro K_f , y del suelo k , que puede expresarse por la razón de los cuadrados de sus diámetros efectivos (1) de,

$$\frac{K_f}{K_s} = \frac{d_e^2 \text{ (filtro)}}{d_e^2 \text{ (suelo)}} = K$$

De la figura 1 podemos estimar el coeficiente φ cuando se hace un relleno de grava o se incorpora arcilla a las paredes del pozo.

Otro factor que afecta la deformación del campo hidrodinámico es aquel relacionado con el porcentaje de área perforada en el tubo piezométrico.

Así tenemos de acuerdo a MAIRHOFER (2).

$$\varphi = \varphi_1 \cdot \varphi_2$$

donde

φ_1 = coeficiente para el relleno de grava.

φ_2 = coeficiente que toma en cuenta la corrección por el 1% de área perforada del tubo piezométrico. (Fig. 2).

si el trazador usado es un radioisótopo y suponemos que solamente medimos la radioactividad del volumen en el cual se efectúa la dilución, podemos escribir

$$V_t = - \frac{V}{\varphi \cdot F \cdot t} \ln \frac{I}{I_0}$$

o

$$V_t = - \frac{d}{4 \cdot \varphi \cdot t} \ln \frac{I}{I_0}$$

donde d es el diámetro interno del pozo.

PARTE EXPERIMENTAL.

Aparato.

Se usó un aparato desarrollado por el BVFA Arsenal, Viena, Austria, como el que muestra esquemáticamente la figura 3. Antes de colocar la punta de prueba

en el piezómetro se llena con una solución del isótopo la cámara 3 señalada y se baja el aparato hasta la napa a estudiar figura 3-A. Luego se sella la parte superior inflando la goma 4 y se abre la cámara con el isótopo, desinflando la goma inferior 5, con lo cual el isótopo queda en contacto con la corriente de agua. Fig. 3-B. Inmediatamente después que ha caído la cubierta protectora 6, se sella la parte inferior por medio de la goma 5, quedando así limitado el volumen que contiene el isótopo. El efecto es registrado por medio de lecturas tomadas en un escalímetro cada 15 minutos. Para altas velocidades de filtración, resulta más conveniente usar un integrador y un registrador potenciométrico.

En general, podemos decir que las medidas constan de tres fases principales:

1. Disminución de la actividad debido al proceso de abertura de la cámara y dilución del isótopo en un volumen mayor. Este efecto está calculado que es del orden del 10 al 20%.

2. Fase en la cual el cambio de actividad se rige por la ecuación 1.

3. Variación de actividad causada principalmente por elución del isótopo inicialmente absorbido en el material que rodea el pozo.

4. La fase tres cambia a la llamada fase de "Background" o fondo, que es alrededor de $I_0/30$ para velocidades de filtración altas, y de $I_0/10$ para las más bajas en gravas.

Este background debe restarse al hacer la interpretación de los datos.

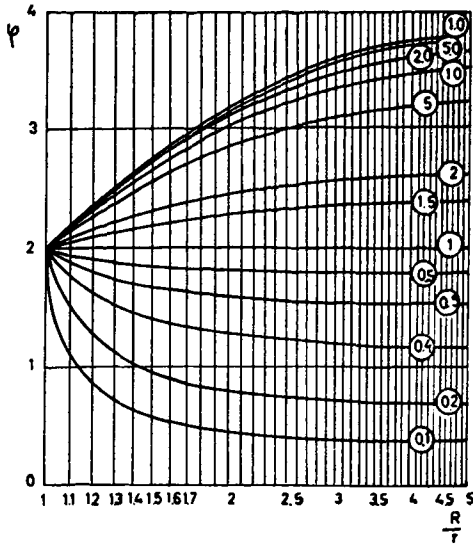
En la figura 4 se da un ejemplo de la interpretación de los datos.

RESULTADOS.

En principio se pretendía hacer mediciones en un gran número de pozos que existen tanto en la zona norte del país, como en el valle de Santiago, en muchos de los cuales se había hecho, hace algún tiempo, la prueba de bombeo, por el método de Thais con lo cual se esperaba hacer una comparación entre estos resultados y los de la técnica de dilución puntual, pero las condiciones de trabajo estaban un tanto lejos de ser ideales debido a que dichos pozos fueron hechos para bombeo de agua y no como pozos de estudio. En primer lugar los diámetros de los sellos de la punta de prueba no coincidían con el diámetro de los pozos. Debido a esto la mayoría de las experiencias debieron realizarse sin sellar, por lo que los flujos verticales influían notablemente en los resultados. Experiencias realizadas con sello y sin sello, en donde fue posible, demostraron que las velocidades medidas sin sellar el pozo eran alrededor de tres veces más altas que cuando se hacía la medición con el pozo sellado. Otra dificultad encontrada fue que las perforaciones en la pared del tubo del pozo eran muy groseras y rompían las gomas de los sellos. Además, no se conocían las condiciones exactas de perforación del pozo y por ende el valor correcto del coeficiente ϕ . Se tomó un valor promedio de 0,8, pero es probable que sea un poco mayor y las velocidades por tanto, algo menores.

Los resultados se muestran en la tabla 1.

FIGURAS



RELACION ENTRE $\frac{R}{r}$ Y COEFICIENTE ϕ
SEGUN OGILVI

R = radio exterior del relleno
de grava o limo.

r = radio interior del relleno

k = coeficiente de permeabilidad
(parámetro para las curvas)

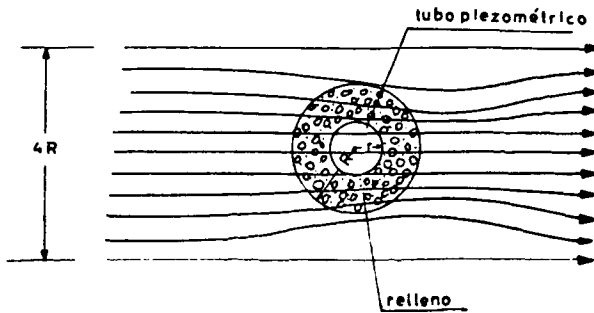


FIGURA 1

EXPERIENCIAS DE MAIRHOFER

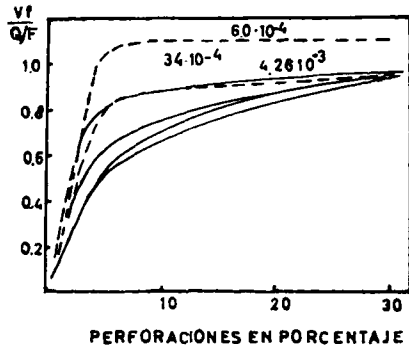


FIGURA A

$$\phi = \frac{v_f}{Q_f}$$

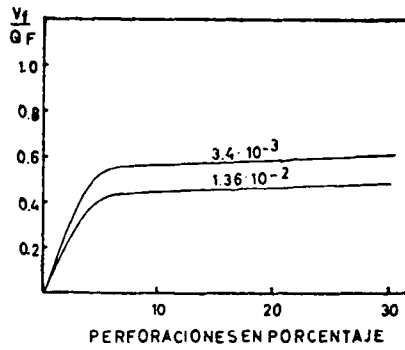


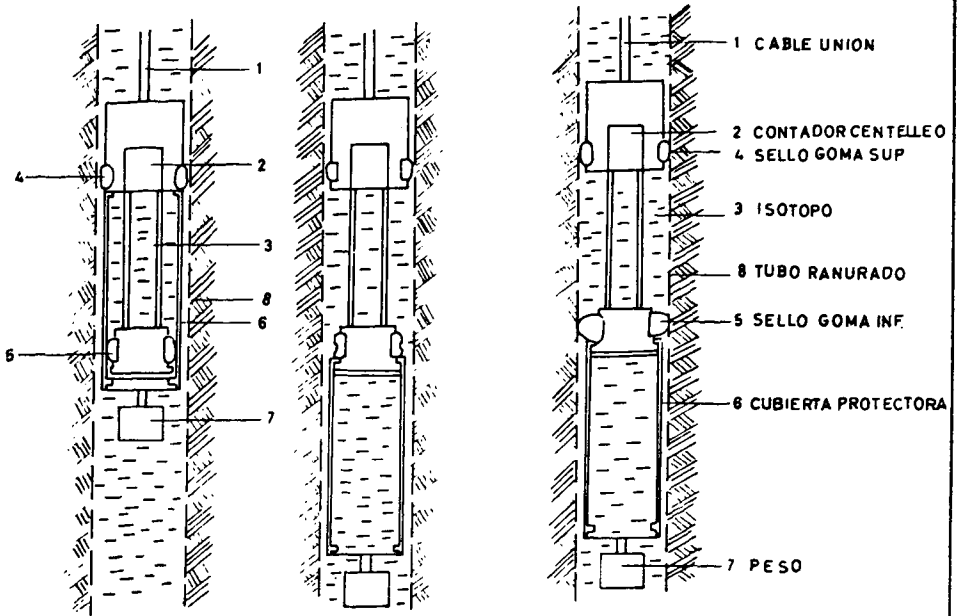
FIGURA B

- modelo lleno con grava
- - - modelo lleno con arena

NºS SOBRE LAS CURVAS SON LAS VELOCIDADES DE FILTRACION EN CM/SEG

FIGURA 2

PUNTA DE PRUEBA PARA MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE FILTRACION



A

Punta de Prueba
cerrada colocada a
la profundidad re-
querida.
Sello de goma inf.
inflado.

B

Sello sup inflado
Sello inf. sin aire
Cubierta protec-
tora cae.

C

Sello inf. inflado (lo
más rápido posible)
Comienzo de las me-
didas.

FIGURA 3

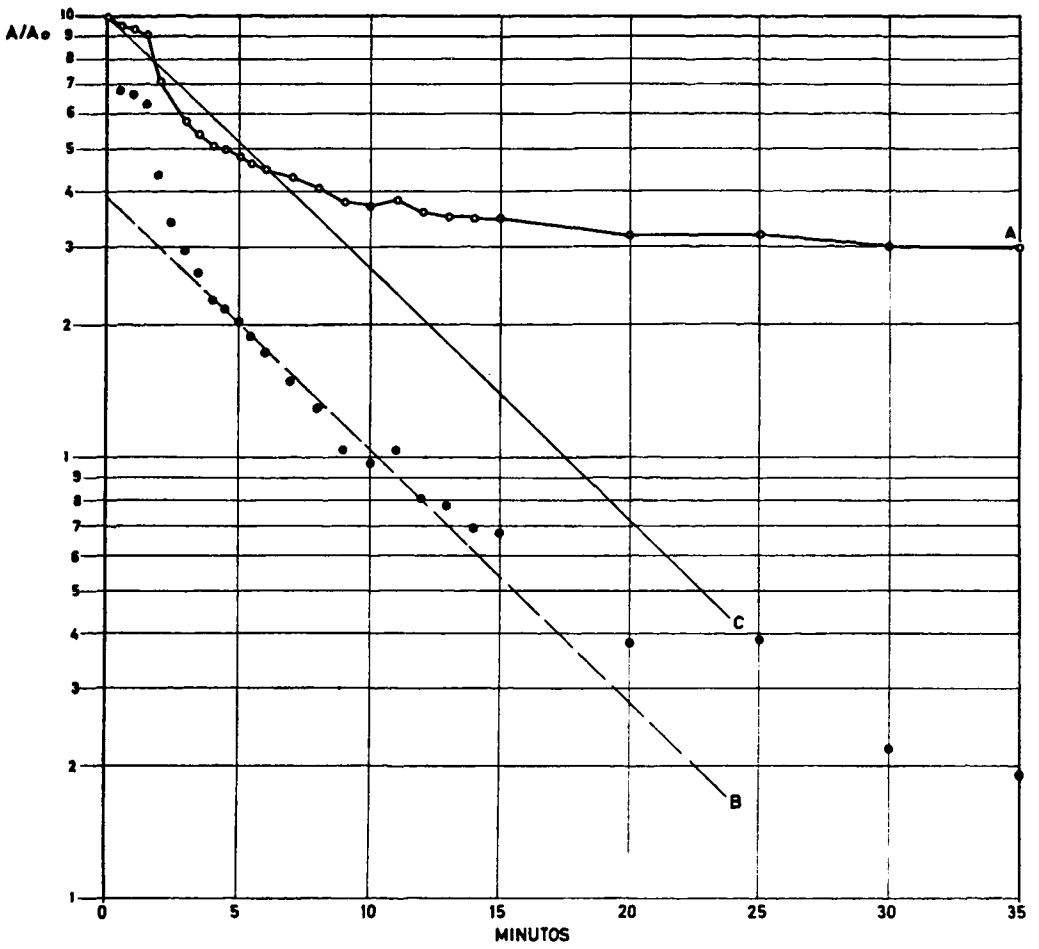


FIGURA N° 4

ESQUEMA DE LAS INSTALACIONES PARA LAS PRIMERAS MEDIDAS DE V_F EN LAG. INVERNADA

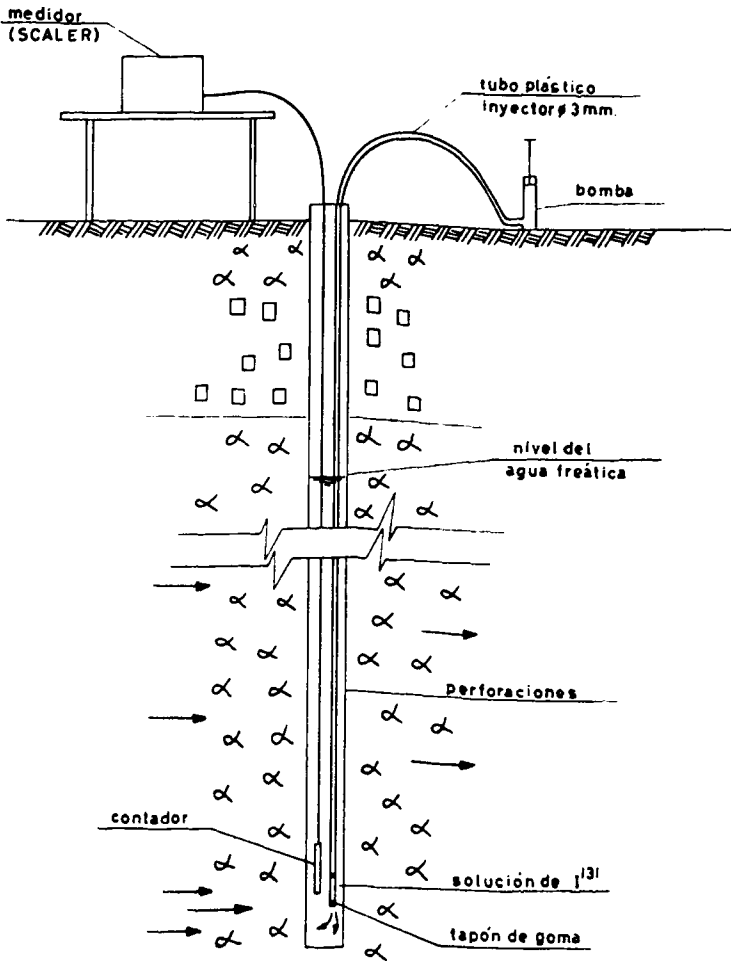
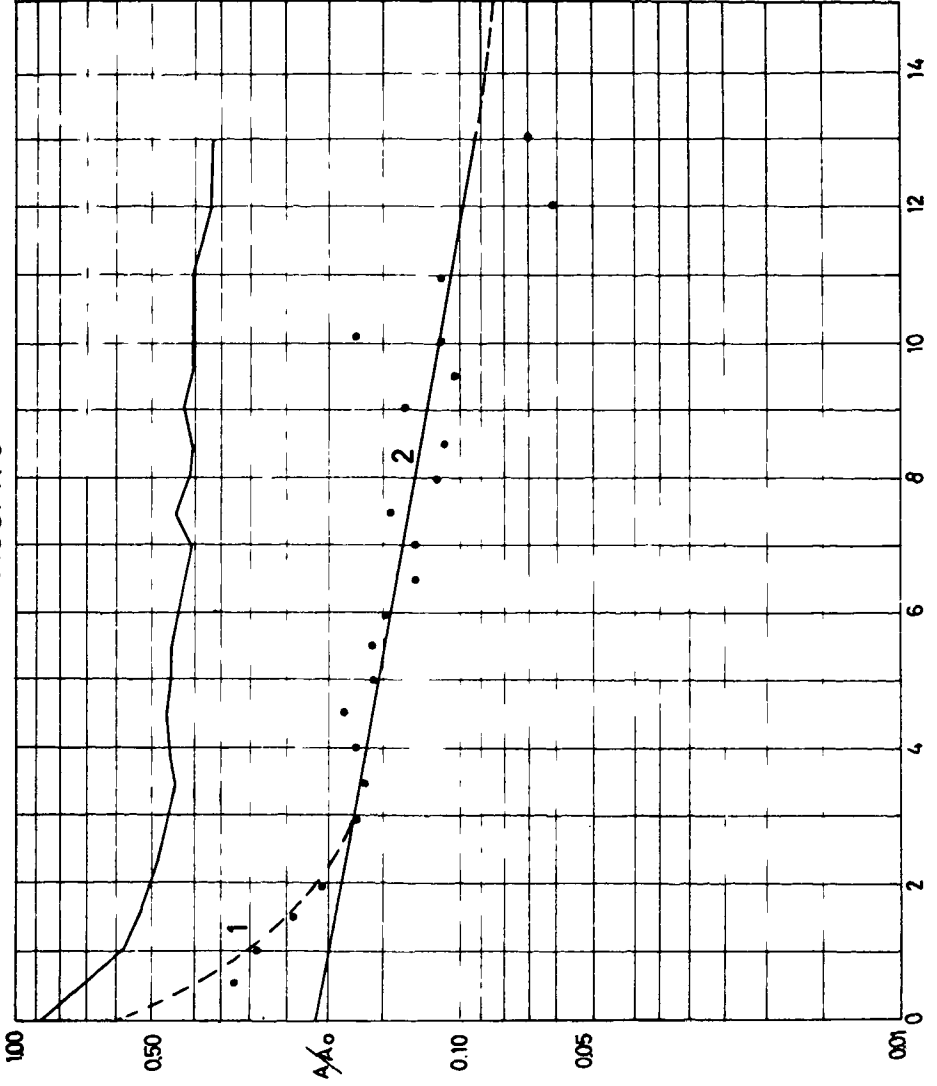
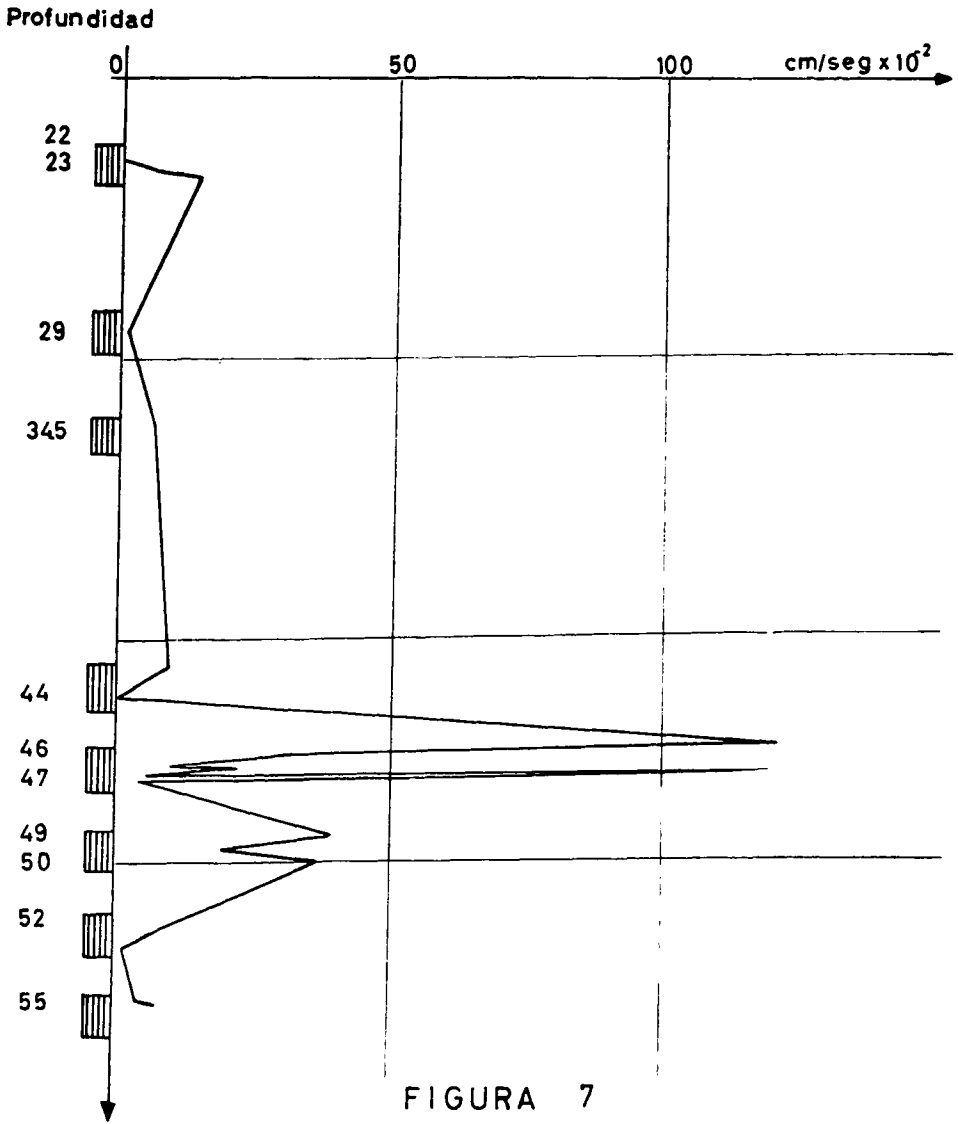


FIGURA 5

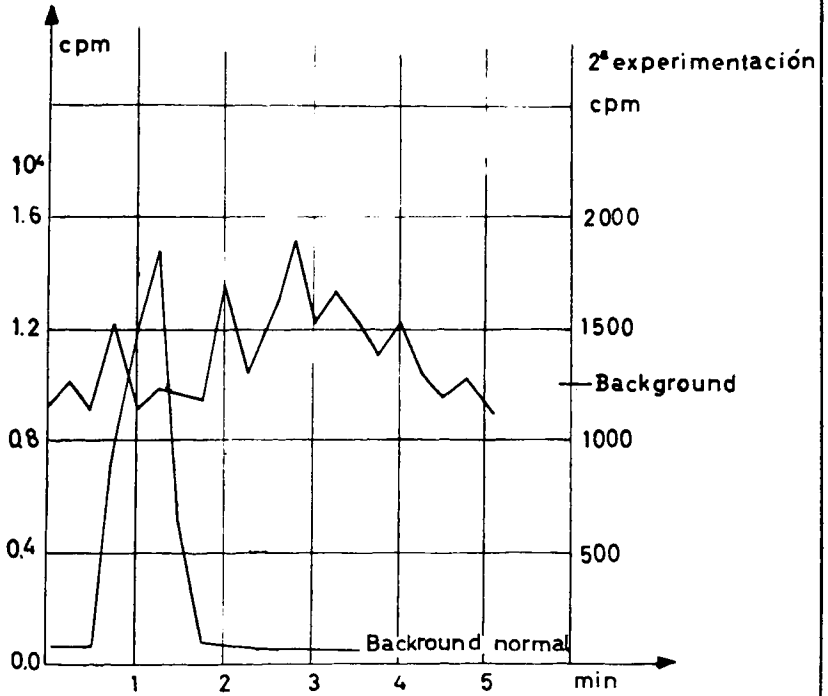
FIGURA 6



LAG. INVERNADA Piezómetro N°24
DIAGRAMA DE LA VELOCIDAD DE FILTRACION



1 Búsqueda de infiltración



1. experimento $V_{\text{vertical}} \approx 0.5 \text{ cm/seg}$

2. experimento $V_{\text{vertical}} \approx 0.6 \text{ cm/seg}$

FIGURA 8

FILTRACIONES VERTIENTE 1-A

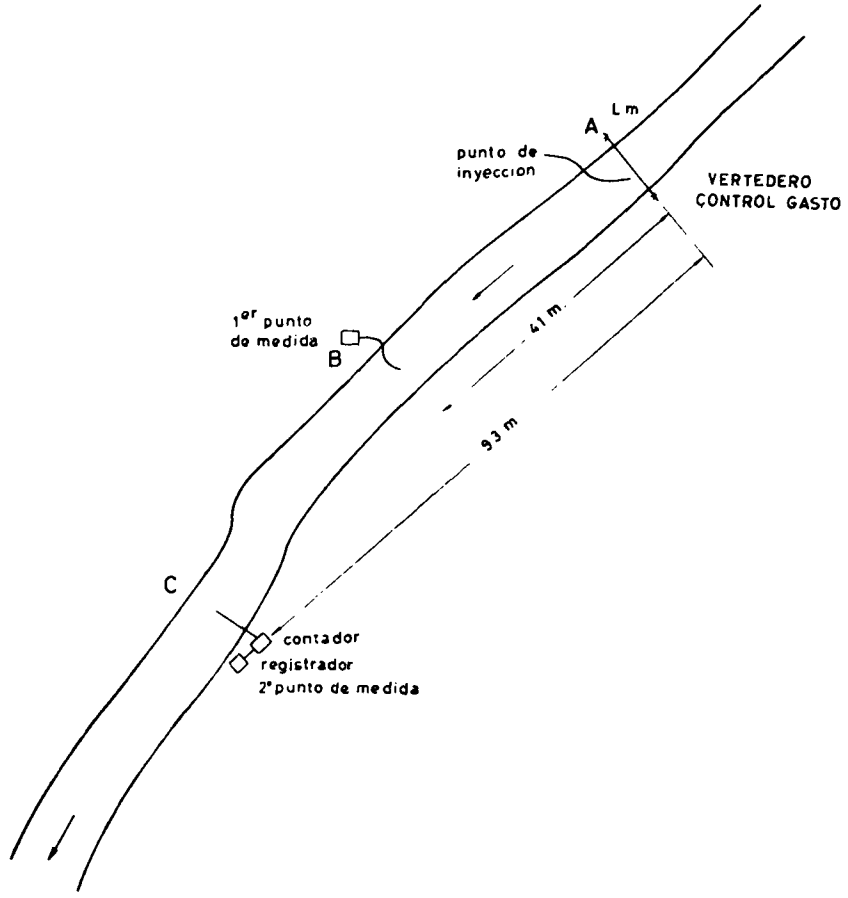


FIGURA 9

MEDIDA DEL GASTO EN VERTIENTE 1-A
GRAFICO CONCENTRACION EN FUNCION DEL TIEMPO

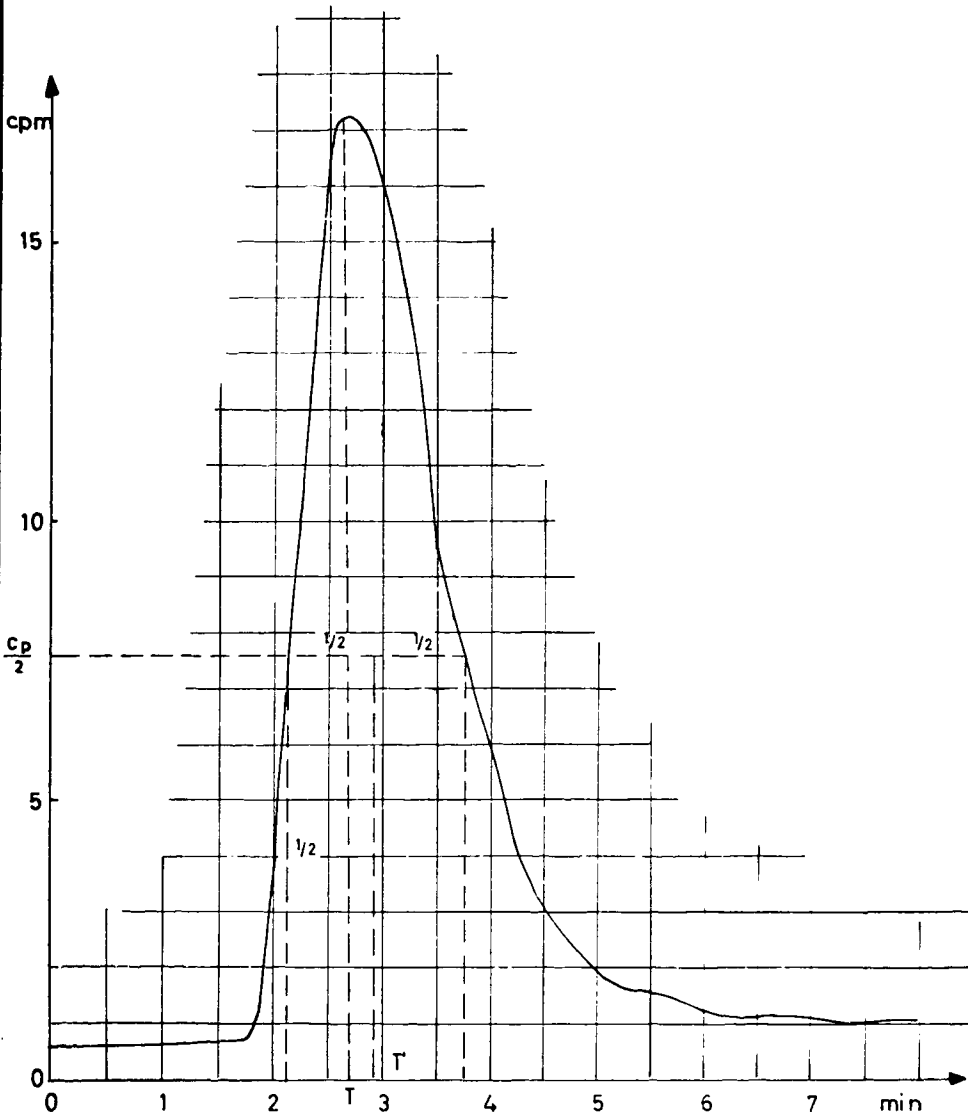


FIGURA 10

TABLA 1

Velocidad de escurrimiento en cm/seg. 10⁻³
= 0.8 (promedio)

		Pozo					Observaciones
<i>Profundidad m</i>		<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>17</i>	
Copiapó	25	4.7					
	28	4.0					
	30		8.0				
	31,5			7.1			
	33					11.5	
	34	2.6	14.0	1.5			
	34		3.7				sellado
	35				6.9		
	38		6.6				
	40				11.0		
	43		8.0				9.0
	43						3.0
	45					12.0	7.6
	47		1.3				
	51					5.3	
61		6.1					
63					16.0		
67					6.6		
Profundidad		Pozo F₁-17		Pozo F₁-19			
Santiago	25	0.06		9.7			
	25			4.0			
	25			4.7			
	45			4.8			
	51	2.3					
Colina	73 m	Ni	1.3				

Estos experimentos preliminares fueron más bien informativos y destinados a entrenar el personal en el manejo del aparato y demostrar cómo calcular e interpretar los resultados.

Se están haciendo nuevos pozos especiales para este estudio y en los cuales se conocen exactamente sus características tanto de perforación, porcentaje de área perforada, etc.

Experiencias en la Laguna de Invernada.

El objetivo era medir la velocidad del flujo en los sondajes existentes en el tranque y tratar de ubicar los puntos de filtración concentrada. Debido a que el diámetro de dichos sondajes es inferior a 2" las medidas no pudieron efec-

Medida de la velocidad de filtración en el fondo de la laguna.

En visitas anteriores a la laguna, se marcó un punto de infiltración por medio de una boya. En este punto se hizo una determinación de la velocidad del flujo vertical, para estimar la magnitud de la filtración.

La profundidad del agua en ese punto era de 3,5 y la experiencia se hizo desde una lancha. Se colocó un contador de centelleo en el fondo y se hicieron las inyecciones de isótopos (Rosa de Bengala I^{131})* a una distancia de 40, 100 y 60 cm., sobre el contador en ese orden. El efecto era medido por un escalímetro, tomando lecturas cada 25 seg. Se puede observar que alrededor de los 1,5 min. aparece un máximo más elevado que el background. Los resultados para las inyecciones de 40 y 60 cm. sobre el contador se indican en la figura 8.

Medida del caudal en pequeños ríos.

Para esta experiencia se aplicó el Método de Recuento total o Integral, usando la fórmula derivada por HULL (3).

$$Q = AF/N$$

donde

Q = Caudal.

A = Actividad inyectada.

F = factor de calibración.

N = número de cuentas totales durante el paso del isótopo.

La determinación de F se hizo colocando una cantidad determinada del isótopo (Rosa de Bengala- I^{131}) en un estanque de volumen conocido. Luego se hizo un conteo en distintos puntos del estanque con los dos contadores de centelleo a usar. Luego se aplicó la fórmula

$$F = VC/A$$

donde

V = volumen del estanque.

C = cuentas por minuto promedio.

A = Actividad total (mC) del isótopo colocado en el estanque.

La distancia a la cual se hizo la medida fue determinada de acuerdo a la ecuación dada por HULL:

$$L_{0.01} = 50 Q^{1/3}$$

donde

Q = es el gasto aproximado.

$L_{0.01}$ = es la longitud para que se produzca una buena mezcla con una fluc-

* (El Rosa de Bengala fue sintetizado en el Laboratorio de Radioquímica, Departamento de Química, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile).

tuación menor de 1%. El resultado obtenido da una distancia de aproximadamente 60 m.

La determinación misma se hizo inyectando la solución del isótopo en forma puntual, en una parte del río que ofrecía buenas condiciones de mezcla. Además este lugar es un vertedero que está tarado por lo cual se podían comparar ambos métodos.

La medición se hizo en dos puntos situados a 41 m. y 93 m. del punto de inyección (Fig. 9).

Los resultados de esta experiencia fueron:

$Q_B = 0,89 \text{ m}^3/\text{seg.}$ para el punto B situado a 41 m.

$Q_1 = 1,02 \text{ m}^3/\text{seg.}$ para el punto situado a 93 m.

Este último valor es el más correcto debido a que la distancia de medida está de acuerdo con la ecuación 6.

El valor de Q obtenido a partir de la altura limnimétrica para esta estación fluviométrica era:

$$Q = 1,1 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

Como se puede observar hay una buena concordancia entre ambos valores.

Esta misma experiencia nos sirvió para determinar la velocidad del caudal según la fórmula:

$$v = L/T$$

donde

L = distancia entre los puntos de inyección y medida.

T = tiempo que corresponde al máximo de la curva cuentas/min. en función del tiempo (fig. 10).

El resultado de este cálculo fue:

$$V = 0,5 \text{ m}/\text{seg.}$$

Medidas de Dirección de Flujo.

Esta determinación se basó en la hipótesis que dice que muestras inyectadas en forma puntual en un pozo, son arrastradas por la corriente de la napa subterránea y fijadas en mayor grado en el material del pozo en los puntos de salida del flujo.

La inyección se hace usando una sonda inyectora a control remoto que lleva una solución de una molécula radiactiva que se fije fuertemente en el material del pozo, y las medidas se efectuaron por medio de un contador de centelleo colimado unido a un cuadrante en la superficie por medio de varillas de acero. Luego de inyectado el isótopo se determina la zona de mayor contaminación con una aproximación de 60°.

Debido a que la sonda inyectora de que se disponía tenía un largo máximo de 30 m. sólo se hicieron medidas hasta esa profundidad.

CONCLUSIONES.

Las experiencias realizadas en los distintos aspectos relacionados con el estudio de aguas subterráneas, si bien, en muchos casos no han dado los resultados esperados nos confirman que el método de dilución puntual se puede aplicar satisfactoriamente cuando se mejoren las condiciones de medida, vale decir, disponiendo de pozos de diámetro especial en los cuales se conozcan exactamente las condiciones de perforación, el porcentaje de área perforada (no menor de 10%) y que la calidad de las perforaciones sea tal, que no rompan las gomas de sellado. La Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), ha perforado dos pozos para este efecto tomando en cuenta todas las características anteriores y en los cuales se hará una estimación de los coeficientes del método de dilución puntual con la prueba de Thais y otro que aplican el uso de trazadores haciendo la medición en dos pozos situados en la dirección del flujo.

AGRADECIMIENTOS.

Debemos agradecer al personal de ENDESA, CORFO, e Instituto de Investigaciones Geológicas que directa o indirectamente colaboraron en el desarrollo del presente trabajo.

BIBLIOGRAFIA

1. OGILVI, N. A. "Electric method for measurement of the filtration velocity of subterranean waters". Bulletin for the Scientific and Technical News NLA (1958).
2. Informe sobre "La determinación de la dirección y velocidad de aguas subterráneas en un solo pozo y desarrollo del equipo conveniente". Presentado al Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal, Viena, Austria (1964). J. Mairhoffer.
3. HULL, D. E. "The total count technique: a new principle in flow measurement". Int. J. Applied Radiation and Isotopes 13, 63, (1962).
4. G. GRANDCLÉMENT. "L'emploi des radioéléments traceur en hydrologie et en hydraulique". L'eau, 50 (5), 293-300 (1963).
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. "Application of isotope Techniques in Hydrology". Technique Reports series N° 11 (1962).
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. "Isotope Technique for Hydrology" Technical reports series N° 23 (1964).
7. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. "Radioisotopes in Hydrology". Proceedings of a Symposium, Tokyo, 5-9, marzo 1963, Viena (1963).