

MEDIDAS DE LA VELOCIDAD DE INFILTRACION POR EL FONDO DEL LAGO LAJA

HORACIO MERY MERY (1)  
EMILIO IRAGUEN IRAGUEN (2)  
GUSTAVO MUÑOZ KÖNIG (3)

El presente estudio corresponde a una de las actividades desarrolladas en el marco del Proyecto de Asistencia Técnica acordado entre el Organismo Internacional de Energía Atómica OIEA y la ENDESA. Dicho Proyecto tiene como principal objetivo la adquisición de tecnología moderna orientada al estudio de filtraciones en lagos y embalses, habiéndose elegido como área de aplicación el Lago Laja.

Los trabajos contemplados en el programa de Asistencia Técnica mencionado, han sido guiados por el Experto del OIEA Sr. Antonio Plata B., quien contó con la colaboración del Experto Sr. Miguel Angel Pérez P.

El estudio aquí expuesto pretende mostrar la metodología que se ha utilizado para la medición de velocidades de infiltración por el fondo del lago Laja, basada en la dilución de trazadores radiactivos como también la posterior evaluación de los datos.

Además, se exponen brevemente las características de un equipo desarrollado especialmente para el tipo de terreno allí existente, orientado a la medida por dilución.

Entre los resultados más importantes que se obtuvieron, cabe mencionar la identificación de zonas preferentes de fugas y la detección de un área sumergida responsable de alrededor del 80% de las filtraciones totales.

- 
- (1) Ingeniero Civil. Jefe Sección Obras Hidráulicas. ENDESA.  
(2) Ingeniero Civil. División Estudios Hidrológicos. ENDESA.  
(3) Constructor Civil. División Estudios Hidráulicos. ENDESA.

## 1.- INTRODUCCION.

El lago Laja está situado en la zona cordillerana de la VIII región a 90 Km. al oriente de la ciudad de Los Angeles, la que se encuentra ubicada a 500 Km. al sur de la ciudad de Santiago, Figura N° 1.

El lago Laja se originó hace miles de años debido a las erupciones de los volcanes existentes en la zona, produciéndose, a través de las lavas que allí se depositaron, grandes percolaciones naturales que dan origen a las filtraciones que hoy se conocen.

El grupo volcánico adyacente al lago Laja está constituido por tres unidades que en orden decreciente de edad son: el volcán Sierra Velluda, el volcán Cerro Condor y el volcán Antuco.

El conocimiento general de la geología de la roca fundamental, los resultados de los sondeos ejecutados y las características de la morfología local permiten estimar que la masa del muro natural que cierra el lago, está compuesto de 30 a 50% de lava compacta y el resto son brechas, escoria y ceniza volcánica lo que indica que al menos la mitad del muro de lava es muy permeable. Por otra parte, puede observarse que su superficie es muy rugosa e irregular.

Estas filtraciones se hacen visibles en dos lugares conocidos como "Ojos de Agua" y "Río Filtraciones" situados a unos 3.500 m. del desagüe superficial del lago y a un nivel semejante a la cota 1.000 m.

El lago se encuentra aproximadamente a 1.360 m. sobre el nivel medio del mar, tiene una superficie de 120 Km<sup>2</sup>, una longitud del orden de 40 Km y un ancho medio de 3 Km. Recibe el aporte de una hoya hidrográfica de aproximadamente 1.000 Km<sup>2</sup> embalsando en aguas máximas un volumen de orden de 7.700 millones de m<sup>3</sup> de agua.

El régimen hidrológico es nivo-glaciario por lo que los mayores aportes de agua los recibe entre los meses de Septiembre a Diciembre.

Los recursos hidrológicos se aprovechan en riego y en generación de energía eléctrica aspecto éste que se realiza a través de las centrales Abanico, El Toro y Antuco, totalizando en conjunto una potencia instalada de 836.000 K.W.

## 2.- OBJETIVO, PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y BASE TEORICA.

Las filtraciones naturales del lago Laja constituyen una parte importante del caudal generado en la central Abanico, aprovechando una altura de caída de 147 m.

La central El Toro por su parte, genera las aguas del lago a través de un túnel de vaciado mediante una obra de captación profunda, utilizando una altura de caída cuatro veces mayor que Abanico.

Este hecho señala lo ventajoso que sería desviar parte de estas filtraciones naturales hacia la central con mayor altura de caída, como es la central El Toro.

El objetivo de la exploración de las velocidades de infiltración en el fondo del lago es cuantificar y localizar estas filtraciones para proponer una impermeabilización si ello es técnica y económicamente factible.

Las velocidades de infiltración en las áreas inundadas por embalses, son generalmente muy pequeñas, tanto, que instrumentos convencionales como molinetes o micromolinetes no podrían detectarlas.

Estas velocidades pueden llegar a ser del orden de 1 centésimo de milímetro por segundo por lo que su evaluación solo es posible en forma indirecta.

Para medir velocidades del agua tan bajas se ha utilizado una metodología basada en la dilución que experimenta un volumen de solución reactiva, (o de otro trazador como colorantes o sales químicas), cuya concentración instantánea decrece con el tiempo por efecto del flujo con velocidad  $v$  y que incide en el volumen de solución. Este último contenido en un recipiente o cápsula ranurada como el que se muestra en la Figura N° 2.

Si la concentración de trazador dentro del recipiente es uniforme en todo momento (trazador bien mezclado), la disminución de concentración en función del tiempo es proporcional a dicha concentración y viene dada por la ecuación diferencial de primer orden  $dC/dt = -BC$ . La solución de esta ecuación es:

$$C_t = C_0 \cdot e^{-Bt} \quad (1)$$

$C_t$  = concentración al tiempo  $t$

$C_0$  = concentración en el tiempo inicial  $t=0$

$B$  = constante

La condición de concentración uniforme solo se cumple si el trazador se agita dentro del volumen  $V$  del recipiente. Si ello es así, la constante  $B$  (pendiente de la función exponencial) equivale a la relación entre el caudal que circula a través de la sección del recipiente opuesta al flujo y el volumen  $V$ . Como este volumen es constante,  $B$  es proporcional al caudal  $Q$  y, por lo tanto, a la velocidad del flujo.

En ausencia de agitación, como es el caso presente, la ecuación anterior no se cumple de una forma precisa y la curva de la concentración en función del tiempo suele presentar una larga cola. La pendiente del tramo aproximadamente exponencial es, no obstante, dependiente de la velocidad del flujo. Una calibración del equipo puede conducir a una mejor interpretación de los resultados en términos cuantitativos.

Si se quiere utilizar la razón  $C/C_0$  igual a  $1/10$ , el tiempo necesario para conseguirlo se denomina  $t_{1/10}$  y puede ser determinado en un gráfico semilogarítmico, en el cual los puntos medidos a intervalos cualquiera se alinean en una recta descendente (ver Figura N° 2b), cuya pendiente es proporcional a la velocidad  $v$ . Dicha curva permite calcular gráficamente el valor  $t_{1/10}$  en función del cual se expresa  $v$ .

La determinación de valores relativos de la velocidad en orden a identificar zonas preferenciales de infiltración puede hacerse mediante la expresión siguiente:

$$v = \frac{cte}{t_{1/10}} \quad (2)$$

La constante para este efecto puede elegirse arbitrariamente, caso en el cual no se estaría midiendo la velocidad propiamente tal, sino un factor proporcional a ella que se ha llamado "Factor de velocidad", FV, en este estudio se ha elegido la constante igual a 1.000.

### 3.- METODOLOGIA.

#### 3.1. TOMA DE PUNTOS.

Se definió primeramente en un plano la zona del lago a explorar, la cual se reticuló uniformemente, quedando así una red con unos 500 puntos.

El equipo usado en la exploración se operó desde una balsa la cual debe permanecer inmóvil durante la medición. Para ello debió materializarse dentro del lago una cantidad de anclajes tales, que permitieran fijar la embarcación exploradora en forma fácil, rápida, y segura. Figura N° 3.

Este aspecto es de gran importancia porque de esta maniobra estará dependiente el rendimiento total de una jornada.

Cada punto explorado quedó registrado en forma precisa con coordenadas mediante el apoyo de dos instrumentos topográficos operados desde tierra.

Debido a la intensidad del viento reinante y las dimensiones de la balsa se utilizaron anclajes de unos 2.000 kg. de peso.

#### 3.2. INYECCION Y LECTURA.

El trazador en esta oportunidad fue I-131 isótopo radiactivo de corta vida (Semiperiodo = 8,1 días). el cual se usó en dosis muy bajas permitiendo lecturas satisfactorias.

Este isótopo se hizo llegar a la cápsula ranurada, depositada en el fondo del lago, mediante una manguera conectada a una bomba peristáltica ubicada en la cubierta de la balsa, Figura N° 3.

La profundidad a la cual hubo que hacer llegar el isótopo fluctuó entre los 9 y 120 metros.

La determinación del factor de velocidad se obtuvo a través de la variación de la concentración del trazador, la cual se midió con un detector Geiger-Müller instalado en el interior de la cápsula ranurada.

En el terreno se procesó en forma inmediata los valores obtenidos en la exploración de cada punto con el objeto de verificar la consistencia de la prueba o para repetirla si ello hubiere sido necesario.

Toda la información recopilada en el terreno se revisó y posteriormente se llevó a planos con isolíneas del parámetro FV, como se explica en detalle más adelante.

#### 4.- CALIBRACION DE LA CAPSULA RANURADA.

Sin entrar en mayor detalle, se expone a continuación una breve descripción de la calibración de la cápsula ranurada y del resultado obtenido de la misma.

Se utilizó para tal efecto un estanque metálico de  $2m^3$  de capacidad,  $1 \times 2 m^2$  y 1 m. de profundidad.

En el fondo del estanque se instaló una red de tubos drenantes y sobre ella una capa de gravas y arena de unos 25 cm. de espesor.

El dren operaba sacando agua desde el estanque la que atravesaba la capa de grava en régimen uniforme, ubicándose sobre ella la cápsula ranurada, quedando ésta expuesta al flujo descendente creado por el dren. El caudal extraído desde el estanque se aforaba volumétricamente. La sección de escurrimiento era  $2m^2$ , lo que definía la velocidad que atravesaba el equipo durante el ensayo.

La Figura N° 4 muestra la relación entre los factores de velocidad FV y las respectivas velocidades medidas durante la calibración, llegándose a la relación:  $V (mm/s) = 0.0123 FV$ .

## 5.- EVALUACION DE LAS MEDICIONES.

Como ya se ha explicado, se cuenta con unas 500 mediciones puntuales de las velocidades de infiltración expresadas mediante un factor proporcional a ellas. Utilizando esta red de puntos, se trazaron isolíneas del factor de velocidad FV, el que se presenta en un rango 0-12. Dichas isolíneas toman los valores 0, 1, 3, 6, etc, hasta 12, y pueden verse en la Figura N° 5.

### 5.1. EVALUACION CUALITATIVA.

En general se observa que las mayores filtraciones se encuentran sobre las lavas que cerraron el valle del río Laja, Figura N°5. Además, la zona más profunda del lago ubicada en la proximidad del cierre de lavas no aparece como un área filtrante, habiéndose medido en esa zona muchos valores de FV nulos o casi nulos. Finalmente, pueden observarse dos áreas con flujos de infiltración más notorias: una ubicada sobre la zona de contacto entre las lavas y el cerro que limita la orilla derecha del lago y la otra en la orilla izquierda al pie de los faldeos del volcán Antuco.

### 5.2. EVALUACION CUANTITATIVA.

Aprovechando los resultados obtenidos de la calibración de la cápsula ranurada, se ha evaluado, desde un punto de vista cuantitativo, el área explorada en el vaso del lago.

La exploración mencionada se realizó durante dos veranos consecutivos, período en el cual el lago experimentó un cambio de nivel que es necesario tomar en cuenta de la forma que se explica más adelante. Cabe señalar, sin embargo, que los factores de velocidad FV, no se corrigieron por efecto del cambio de nivel dado que consideraciones hechas sobre la velocidad media real de filtración con espejos de agua a cota variable no acusa variaciones mayores de 2% en el rango de cotas extremas correspondiente a las mediciones.

En lo que sí incide la dicha variación de nivel del lago, es en el caudal de filtración total asociado a la exploración, por cuanto interesa saber que porcentaje de éste ha sido detectado en el área cubierta por la red de puntos medidos.

Utilizando la curva de calibración con un rango de incertidumbre de 20% (Figura N° 4) y también los caudales extremos de filtración que ocurrieron entre el inicio y término de las mediciones, (dicho caudal varió entre 31,9 y 25,1 m<sup>3</sup>/s), se ha determinado, en la Figura N° 6, el porcentaje del caudal de filtración que se habría detectado en las aproximadamente 60 Hectáreas exploradas.

Tal como allí puede apreciarse este porcentaje estaría comprendido entre el 65 y 80% de las filtraciones totales.

Al respecto cabe indicar que la zona comprendida entre las cotas 1340 y 1330 m. no pudo ser explorada completamente y ha sido evaluada con un FV correspondiente al promedio del área más profunda. Este sector presenta fugas locales visibles lo que induce a creer que su colaboración puede ser más importante que la asignada en este estudio. En consecuencia el área explorada podría, por este motivo, ser más representativa del 80% del caudal de filtración total que del 65% indicado que es el límite inferior.

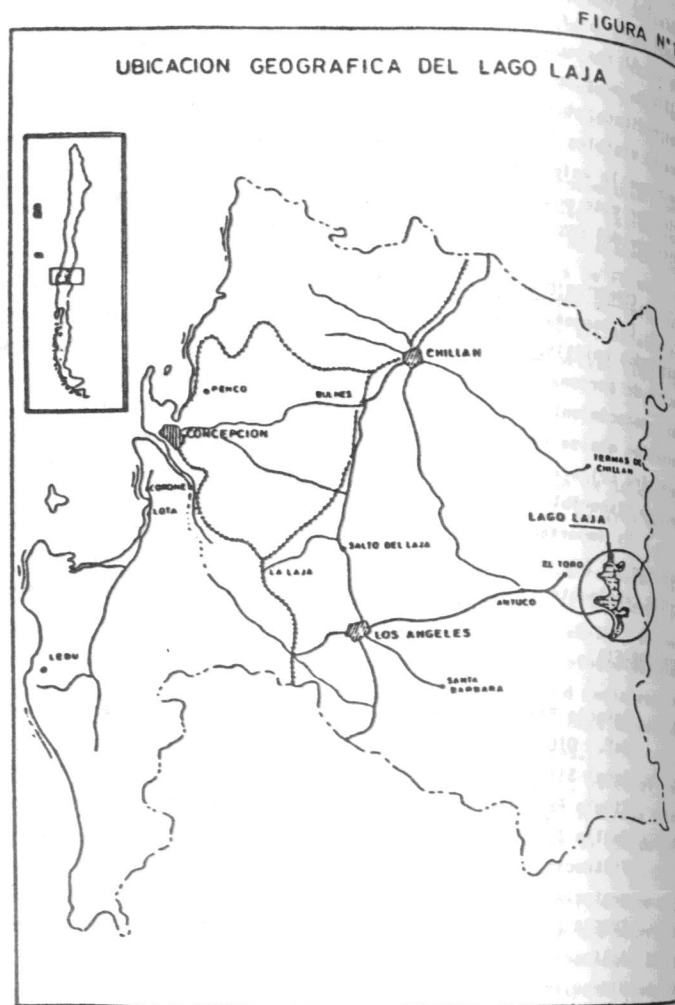
### 6.- COMENTARIO FINAL.

La campaña de mediciones que se ha efectuado en el lago Laja ha tenido resultados positivos en varios aspectos. Entre ellos cabe mencionar la capacitación de personal técnico, desarrollo de metodología operativa en estas técnicas y conocimiento del equipo más adecuado a utilizar. Por otra parte, la información que se ha logrado obtener en el lago Laja es importante ya que ella permitirá orientar la acción futura que conduzca a una mejor utilización de un recurso disponible.

Es importante indicar que las mediciones descritas anteriormente, son solo uno de los varios parámetros que es necesario evaluar para llegar a describir cabalmente el complejo fenómeno de las filtraciones desde un embalse.

### BIBLIOGRAFIA.

- Antonio Plata et al (1989) "Estudio de las filtraciones del Lago Laja". OIEA, Proyecto CHI/8/016. Informe de Avance.
- Angel Silva P. (1987) "Filtraciones en Lagos y Embalses", Memoria de Título Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. U. de Chile.
- Emilio Iragüen I. (1989) "Técnicas Modernas para la Investigación de Filtraciones en Lagos y embalse mediante Trazadores" Congreso La Ingeniería Chilena en el siglo XXI. Instituto de Ingenieros de CHILE.
- ENDESA (1988), PROYECTO CHI/8/016 "Filtraciones en Lagos y Embalses. Aplicación al Lago Laja" Informe OICOI N° 5/88. Sección Obras Hidráulicas.
- Miguel Angel Pérez P. (1989) "Filtraciones en el Lago Laja" Informe del Experto para el OIEA.



564

FIGURA N°2A EQUIPO UTILIZADO PARA LA MEDIDA DE LA INFILTRACION EN EL FONDO DEL LAGO

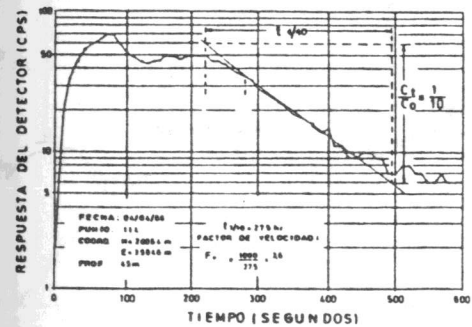
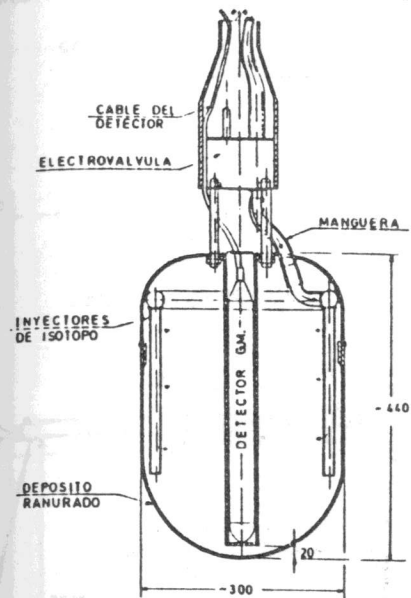
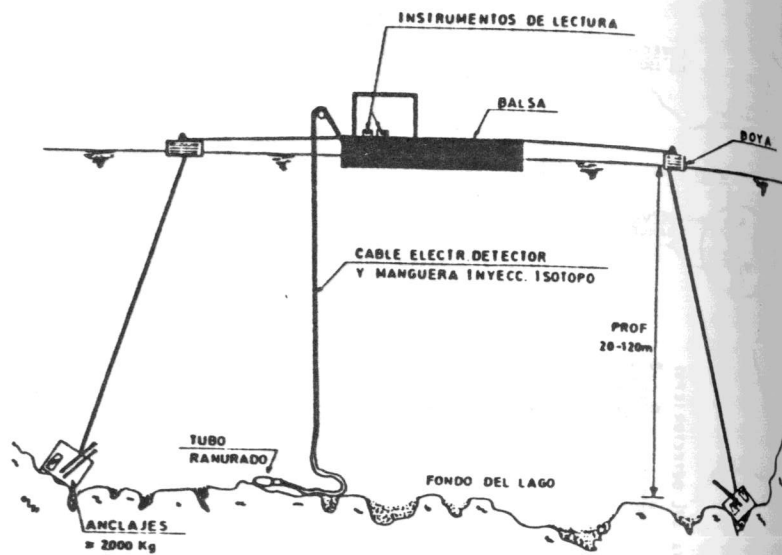


FIGURA N°2B METODO DE DILUCION DETERMINACION GRAFICA DE  $t_{1/10}$

565

EXPLORACION FONDO LAGO

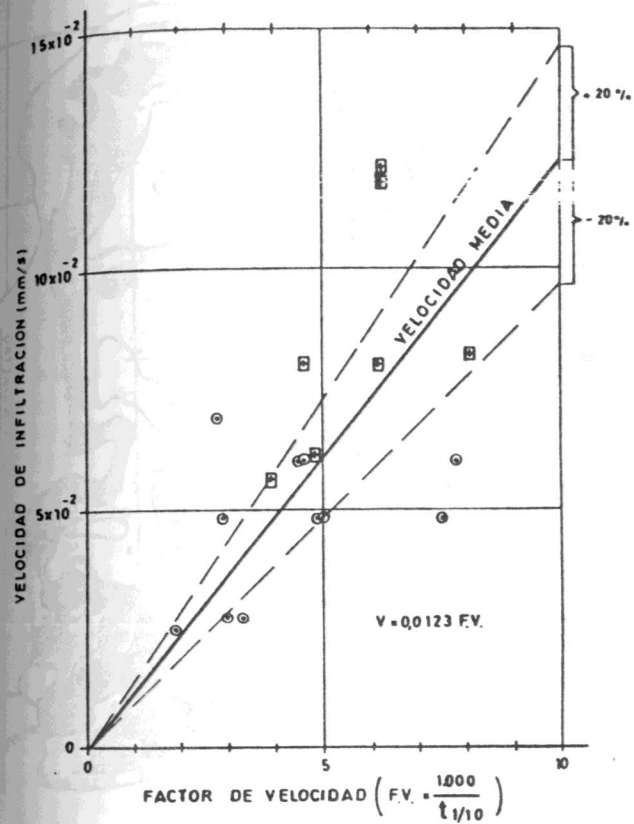


566

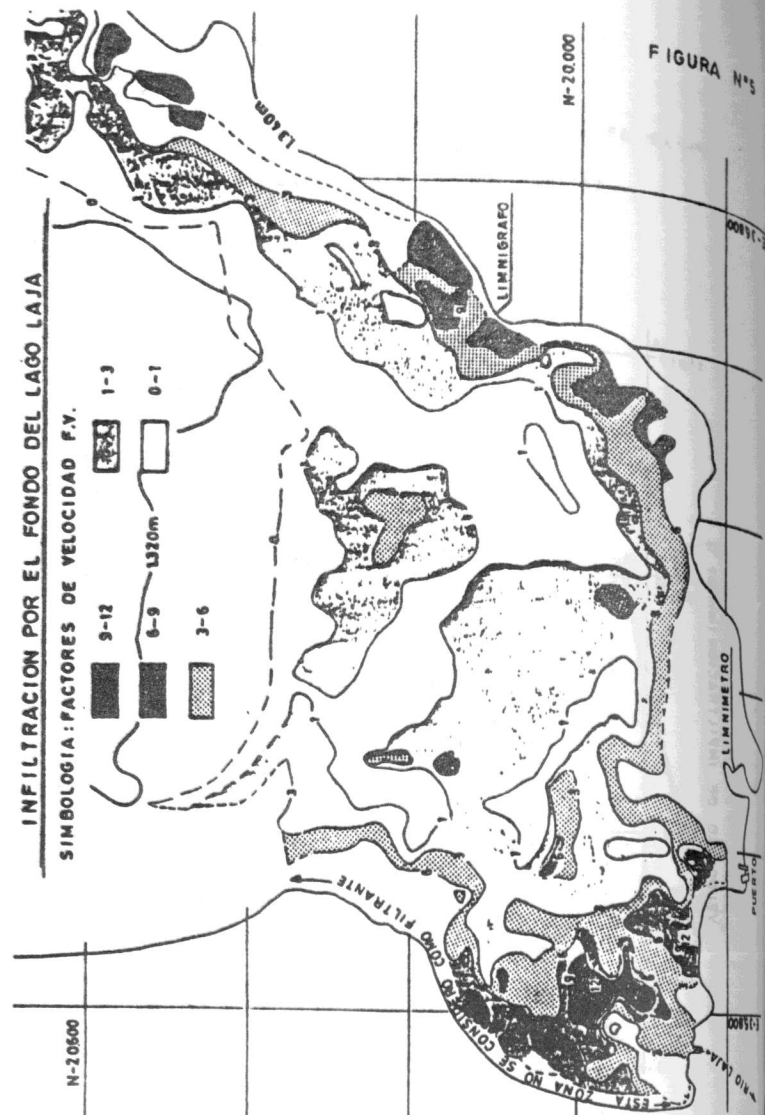
FIGURA N°3

FIGURA N°4

LAGO LAJA  
CALIBRACION DEL TUBO FILTRANTE



567



568

LAGO LAJA  
CAUDAL DE FILTRACION DETECTADO

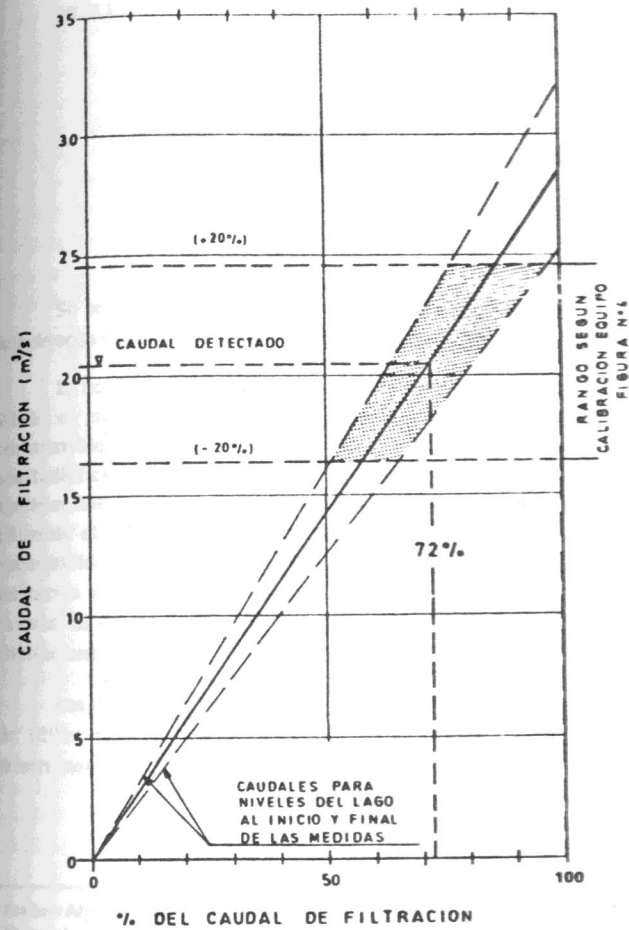


FIGURA N°6

569