

M

O

P



**ANALISIS DE UNA CRECIDA POR VACIAMIENTO
DE UNA REPRESA GLACIAL**

PUBLICACION INTERNA E.H N° 83/4

DGA
DEPARTAMENTO
DE HIDROLOGIA
SUB-DEPTO. ESTUDIOS
HIDROLOGICOS

TRABAJO PRESENTADO AL VI CONGRESO NACIONAL
DE INGENIERIA HIDRAULICA, 20 AL 22 DE OCTUBRE DE 1983

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

VI CONGRESO NACIONAL

ANALISIS DE UNA CRECIDA POR VACIAMIENTO

DE UNA REPRESA GLACIAL

Humberto Peña Torrealba

Fernando Escobar Cáceres

En el presente estudio se analizan las crecidas del río Paine (XII Región) ocurridas en los años 1982 y 1983. Se demuestra que ellas son producidas por el vaciamiento de una represa de hielo que se forma en el Glaciar Dickson, la cual almacena un volumen aproximado de 250×10^6 m³. El vaciamiento se produce en un período de 17 - 23 días y alcanza a un caudal máximo del orden de 350 m³/s. La forma del hidrograma es estudiada en base a las ecuaciones de Nye (1976), las cuales expresan los diversos procesos físicos que intervienen en este tipo de fenómeno. Se propone una solución simplificada a las ecuaciones de Nye mediante procedimientos iterativos y se demuestra que ellas permiten reproducir el hidrograma de las crecidas del río Paine. A través de un análisis de sensibilidad de las ecuaciones se pueden explicar las diferencias que se observan entre las crecidas del río Paine y otras crecidas del mismo tipo registradas en distintos lugares del mundo.

1.- INTRODUCCION.

La hidrología glacial presenta ejemplos de crecidas de grandes magnitudes provocadas por el vaciamiento violento de represas formadas por el hielo dentro, sobre o en las márgenes de los glaciares. Aún cuando las mediciones son escasas, hay constancia de catástrofes con este origen en diversas regiones, en especial en los Alpes, en la Columbia Británica, en Islandia y Noruega. En los Andes Centrales se recuerda el vaciamiento de una represa glacial en el Valle del río Plomo (Argentina), que destruyó en 1934 el ferrocarril transandino en un sector de 12,6 Km. En la Patagonia se conoce de las crecidas periódicas del río Colonia, afluente del Baker, y del bloqueamiento del brazo sur del lago argentino por el glaciar Moreno (Lliboutry). Sin lugar a dudas deben existir numerosos casos de este tipo de fenómeno en lugares despoblados, donde no existen registros.

Durante los años 1982 y 1983 se registraron en el río Paine (XII Región) violentas crecidas, las que interrumpieron el flujo normal de turistas hacia el Parque Nacional Torres del Paine. En el presente trabajo, se analizan las causas de dichas crecidas y los procesos físicos que determinan la forma del hidrograma resultante.

2.- DESCRIPCION DE LA ZONA. (Fig. N°1).

La zona de estudio corresponde al borde sur-oriental del Hielo Patagónico Sur (HPS), vasta zona de unos 13.500Km² de hielos que se extiende por 330 Km. entre los 48°15' y 51°40' lat. S. El río Paine nace en el Lago terminal del Glaciar Dickson, una de las lenguas efluentes del HPS, y en su recorrido se encuentra el lago Paine y el sistema de los lagos Nordenskjöld, Pehoé y del Toro. El glaciar Dickson es un efluente pequeño del HPS y, al igual que el Glaciar Frías, inmediatamente colindante con él por el oriente, es especialmente sensible a los cambios climáticos, mostrando en el último siglo un retroceso notable.

Los glaciares de esta zona tienen un régimen térmico temperado, lo que significa que se mantienen en el punto de fusión durante todo el año.

3.- CARACTERIZACION Y CAUSA DE LAS CRECIDAS.

Las crecidas del río Paine han sido evaluadas en base al registro de la estación fluviométrica ubicada inmediatamente antes de su llegada al lago Nordensjold. Una vez corregido el hidrograma por el efecto regulador de los lagos Paine y Dickson, y descontados los caudales que no se pueden atribuir a la crecida propiamente tal, presentan las siguientes características fundamentales (Figura N°2).

Inicio	Término	Duración	Q. Máximo	Volumen
18/01/82	4/02/82	17 días	360 m ³ /s	220x10 ⁶ m ³
16/12/82	2/01/82	17 días	330 m ³ /s	230x10 ⁶ m ³
25/02/83	20/03/83	23 días	340 m ³ /s	290x10 ⁶ m ³

De acuerdo a los antecedentes hidrológicos existentes desde 1964 y al testimonio de los pobladores del sector, no se habían presentado fenómenos de esta naturaleza con anterioridad.

La existencia de un registro en el río Grey, que drena un sector del HPS colindante con el correspondiente al río Paine, y con el cual presenta en ciertos períodos una excelente correlación, permitió la comparación de ambos hidrogramas en base a la curva doble acumulada de los caudales. De dicho análisis (Figuras N°s 3 y 4) se llegó a las siguientes conclusiones:

- El origen de las crecidas no se encuentra en un aumento del deshielo por razones climáticas, ya que él habría afectado en la misma forma los caudales del río Grey.
- En relación al escurrimiento normal de los últimos 2 años, las crecidas son provocadas por un volumen de agua importado a la cuenca. Es decir, se trata de una captura de recursos de agua que drenan habitualmente hacia cuencas colindantes.
- Las curvas doble acumuladas muestran una cuarta crecida del río Paine durante el mes de abril de 1982, pero de distinta naturaleza ya que habría sido provocada por la retención de agua en la propia cuenca del río Paine.

Descartada la causa climática, y no existiendo evidencias de una fusión de hielo en gran escala de origen geométrico, la explicación del fenómeno debe buscarse en el almacenamiento de un gran volumen de agua que se vacía en forma violenta.

En ningún caso, el almacenamiento puede ser causado por témpanos que bloqueen la salida del lago Dickson, ya que el volumen de agua involucrado no corresponde a las trazas existentes en sus riberas. De acuerdo a lo anterior, la represa debe ubicarse en la zona cubierta por los glaciares. Los antecedentes de terreno recogidos (González, 1983)., (Peña y Escobar, 1983), permiten identificar la zona de almacenamiento sobre la confluencia de una lengua secundaria del glaciar Dickson que fluye hacia el este, con una lengua del Glaciar Frías. En ese lugar se habría bloqueado parte del escurrimiento hacia la laguna Frías. La causa de este fenómeno no es posible conocerla sin una detallada investigación de terreno. Probablemente hayan influido en esta situación las bajas temperaturas y escasa precipitación de los inviernos de los años 1981 y 82, y el notable retroceso de los glaciares de ese sector desde el año 1975 a la fecha.

4. ECUACIONES DEL VACIAMIENTO DE UNA REPRESA DE HIELO.

Desde un punto de vista práctico, resulta de mucha importancia estudiar las relaciones físicas que determinan la forma del hidrograma, y de ese modo evaluar las posibilidades de que se presenten en el futuro crecidas aún más violentas. Las relaciones físicas que rigen el vaciamiento a través de un túnel de un represa de hielo en un glaciar temperado fueron planteadas por Nye (1976), quién las explicó con éxito al caso del vaciamiento del lago subglacial de Grímsvötn (Islandia). Nye dedujo las siguientes ecuaciones:

$$\text{Geometría y flujo del hielo: } \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{m}{\rho_i} - K_0 S (p_i - p)^n \quad (p < p_i) \quad (1)$$

$$\text{Continuidad: } \frac{\partial S}{\partial t} \frac{m}{\rho_w} = \frac{\partial Q}{\partial s} \quad (2)$$

$$\text{Hidráulica: } \rho_w g_s - \frac{\partial p}{\partial s} = \frac{N Q^2}{S^{8/3}} \quad (3)$$

$$\text{con: } N = \left(\frac{s}{R^2} \right)^{2/3} \rho_w g n'^2$$

Conservación de la energía:

$$Q \left(\rho_w g s - \frac{\partial p}{\partial s} \right) - \rho_w S \sigma \frac{d\theta_w}{dt} = m L + m \sigma (\theta_w - \theta_i) \quad (4)$$

Transferencia de calor:

$$0.205 \left(\frac{2Q}{\pi^{1/2} s^{1/2} \eta} \right)^{0.8} K (\theta_w - \theta_i) = m L + m \sigma (\theta_w - \theta_i) \quad (5)$$

Las ecuaciones están referidas a un eje s , a lo largo del túnel. Conviene destacar que todas las variables son función de la distancia s y del tiempo t .

La ecuación (1) señala que la variación de la sección del túnel es igual a su aumento debido a la tasa de fusión m menos el estrechamiento por deformación plástica según la expresión de Nye (1953), el cual aplicó a un conducto circular la ley de fluencia de Glen. La ecuación (3) corresponde a la aplicación de la fórmula de Gauckler - Manning - Strickler para flujos turbulentos en un conducto cerrado.

En la ecuación de conservación de la energía se considera el trabajo mecánico efectuado por el desplazamiento del agua, el cambio de energía interna por aumento de temperatura del agua, y la energía consumida en fundir el hielo y elevar la temperatura del agua de fusión. No se considera la energía cinética. En relación al calor demandado por la fusión, el término que representa el aumento de temperatura $(\theta_w - \theta_i)$ es pequeño y se puede despreciar. Además en casos prácticos se ha visto que el término en $\frac{d\theta_w}{dt}$ también es pequeño, de modo que la ecuación (4) se puede reducir a:

$$Q \left(\rho_w g s - \frac{\partial p}{\partial s} \right) = m L \quad (6)$$

La ecuación (5) corresponde a la solución del problema de

transferencia de calor hacia las paredes de un tubo circular. Presenta interés práctico sólo para el cálculo del término $(\theta_w - \theta_i)$.

Existe además una aproximación empírica al problema del vaciamiento de una represa glacial, debida a Clague y Mathews (1973). Ellos han propuesto un ajuste de los hidrogramas en base a la siguiente expresión:

$$Q_t = K (V_t)^b \quad (7)$$

Los valores de b varían en la práctica en un rango de 0.5 a 0.9 mientras que K puede presentar valores muy diferentes. Los mismos autores ajustaron además a una muestra de 9 crecidas, la ecuación:

$$Q \text{ máx.} = 75 V \text{ máx.}^{0.67} \quad \text{con } R^2 = 0.96 \quad (8)$$

5.- APLICACION AL RIO PAINE.

Las ecuaciones de Nye no han sido resueltas en forma general y sólo se dispone de la solución dada cuando el término de pérdida de carga $(\rho_w g s - \frac{\partial p}{\partial s})$ es constante. En ese caso el caudal es una función directa de t^{-4} , tomando el origen de coordenadas en el tiempo en que Q se hace infinito. En el caso del río Paine, obviamente no se puede efectuar la simplificación anterior, razón por la cual se buscó una solución mediante métodos numéricos iterativos.

En primer lugar se supuso que las ecuaciones eran válidas para ciertas condiciones medias de modo de eliminar la dependencia del eje s ; quedando las relaciones como funciones exclusivas de t . Con este propósito se adoptó:

$$\frac{\rho_w g s - \frac{\partial p}{\partial s}}{1} = \frac{h \rho_w g}{1} \quad (9)$$

Además se usó un valor de la presión del agua en el túnel p intermedia entre la presión a la entrada y a la salida, para lo cual se definió un parámetro de ajuste adicional C . También fue necesario agregar la dependencia geométrica entre el volumen de agua que sale y el descenso de la cota

piezométrica en la entrada del túnel. Por simplicidad se usó una relación del tipo :

$$Q = A (B - z) \frac{dz}{dt} \quad (10)$$

Reemplazando las derivadas por sus respectivas expresiones incrementales, el sistema de ecuaciones de Nye se redujo a la siguiente ecuación implícita en Q y t (ver figura N°5)

$$\left(\frac{N Q^2}{(H-z) \rho_w g} \right)^{3/8} - \left(\frac{(H-z) \rho_w g Q \Delta t}{1 L \rho_i} + 2 S_1 \right) \left(2 + \Delta t K_0 (p_i - p)^n \right)^{-1} = 0 \quad (11)$$

En esta ecuación se debe reemplazar además los términos p y z por las correspondientes relaciones:

$$p = p(z, H, H_t, C) \quad \text{y} \quad z = z(Q, A, B, z_1, \Delta t)$$

En el caso de las crecidas del río Paine, se tiene un conocimiento muy precario del valor de los parámetros que intervienen en la ecuación (11); por ello los resultados deben interpretarse sólo como una primera tentativa de explicación de los fenómenos que intervienen. Los antecedentes topográficos disponibles se reducen a mediciones altimétricas de niveles (González, 1983), a la información de fotografías aéreas y al registro de caudales (Peña y Escobar, 1983).

En la figura N°5 se entrega el esquema adoptado con los valores correspondientes al glaciar Dickson. El espesor del hielo se estimó en 240 mts y se supuso que el túnel estaba a la cota de fondo pero completamente en hielo.

Los parámetros A y B que definen la geometría del almacenamiento se estimaron básicamente de acuerdo al volumen de la crecida y a la diferencia de niveles disponibles. Hay que señalar que con la existencia del lago, debe existir un aumento de niveles en sectores muy extensos del glaciar, los que aportan parte significativa del volumen de la crecida, de modo que los parámetros A y B deben considerar también este efecto. Los valores de K_0 y n se determinaron para un túnel circular y aplicando la ley de fluencia de Glen. El parámetro N , que depende de la forma del túnel y del coeficiente de rugosidad de Manning y el factor C, que permite obtener un valor de p en un punto representativo para

los efectos del cálculo de la deformación plástica, fueron determinados en el proceso de calibración. De este modo se obtuvo un valor para n de $35 \text{ m}^{-8/3} \text{ Kg}$, el cual corresponde a un coeficiente de Manning de $0,03 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$, si se supone que la sección es circular. Esta cifra está dentro del rango dado en las referencias, el que va de $0,01$ a $0,1 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ (Rothlisberger, 1972). Para C la calibración dió un valor de $0,2$, el cual resulta razonable si se considera corresponde a un sector próximo a la salida pero donde el espesor del hielo posiblemente no presenta una disminución significativa. En la figura N°2 se entrega el hidrograma obtenido con los parámetros anteriores y utilizando en la iteración intervalo de tiempo de 6 horas. Hay que señalar que el número de parámetros de las ecuaciones y la incertidumbre acerca de su valor, sólo permite asegurar que el conjunto de parámetros obtenidos constituye una solución factible y razonable, pero que no necesariamente es la única combinación posible. Ello es especialmente válido para el término que representa la fluencia plástica, donde teóricamente distintas combinaciones de K_0 , n , p_i y p pudieran dar resultados análogos.

Los resultados de la calibración se han usado para evaluar la sensibilidad del hidrograma a cambios en algunos parámetros especialmente significativos. Los resultados de dicho análisis se entregan en la figura N°6, donde se ha graficado el hidrograma resultante:

- a) sin considerar el efecto de fluencia del hielo ($K_0 = 0$).
- b) con el término H/l constante en el tiempo y
- c) con el término H/l igual a 1,2 veces el valor real.

Los gráficos anteriores muestran que:

- La forma básica de los hidrogramas de las crecidas se pueden reproducir adecuadamente con el modelo planteado.
- El cambio relativamente pequeño de algunos datos conduce a formas de hidrogramas notablemente diferentes, con caudales máximos mucho mayores. Al respecto hay que destacar que en general los hidrogramas obtenidos en otros lugares presentan una rama ascendente más violenta y sostenida, y un descenso muy abrupto. Se puede suponer que en el río Paine ello no es así, debido a la pequeña magnitud de la relación H/l y a su significativa disminución en el

tiempo.

En relación al ajuste de fórmulas empíricas se pudo comprobar que la ecuación (7) permite representar la rama ascendente del hidrograma, con parámetros que en promedio para las 3 crecidas tienen un valor de $K=22$ y de $b=0.59$. Como era de prever, la fórmula (8) que da el caudal máximo, entregó un valor considerablemente mayor al real ($3.000 \text{ m}^3/\text{s}$). Ello se explica sin duda por el carácter especial de las crecidas del río Paine, de acuerdo a lo ya comentado. En las figuras N°s 7 y 8 se pueden apreciar los valores obtenidos en las crecidas del río Paine, en relación a las de otros lugares.

6.- CONCLUSIONES.

Las principales conclusiones que interesa destacar en el presente estudio son las siguientes:

- En zonas con glaciares, es necesario considerar en el diseño de obras civiles y en el desarrollo general de la actividad en las riberas de los ríos, la posibilidad de ocurrencia de crecidas de gran magnitud debidas al represamiento de importantes volúmenes de agua por efecto del hielo. Lo anterior es especialmente válido en zonas que han estado deshabitadas y en consecuencia donde sólo hay información histórica del comportamiento de los ríos en períodos recientes.
- De acuerdo a los antecedentes de las crecidas del río Paine, en un glaciar temperado el proceso de vaciamiento de una represa de hielo es posible representarlo adecuadamente mediante las expresiones deducidas por Nye (1976).

NOMENCLATURA

- t : tiempo (s).
- s : abscisa según eje s (m).
- S : sección del conducto (m²).
- m : masa fundida por unidad de distancia y de tiempo (Kg m⁻¹ s⁻¹).
- p_i : presión del hielo en el túnel (Nt m⁻²).
- p : presión del agua en el túnel (Nt m⁻²).
- ρ_w : densidad del agua (1000 Kg m⁻³).
- ρ_i : densidad del hielo (917 Kg m⁻³).
- Q : caudal (m³ s⁻¹).
- g : aceleración de gravedad (m s⁻²).
- g_s : componente de la aceleración de gravedad según eje s (m s⁻²).
- R : Radio hidráulico.
- n' : coeficiente de Manning (m^{-1/3} s).
- σ : calor específico del agua (4.18x10³ J °C⁻¹ Kg⁻¹).
- θ_w : temperatura del agua en el túnel (°C).
- θ_i : temperatura del hielo en el túnel (°C).
- L : calor latente de fusión por unidad de masa (3,344x10⁵ J Kg⁻¹).
- η : viscosidad dinámica del agua.
- K : conductividad térmica del agua.
- Q_t : caudal en el instante t (m³/s).
- V_t : volumen acumulado hasta el instante t (10⁶ m³).
- K_o, n: Parámetros que definen la fluencia del hielo.
- Δ t : intervalo de iteración.
- s₁, z₁ : Sección y coordenada z al inicio del intervalo de iteración. (m² y m).

BIBLIOGRAFIA

- Aitkenhead N. Observations on the drainage of a glacier-dammed lake in Norway. Journal of Glaciology, 1959.
- Clague J.J. H.W. Mathews. The magnitude of Jökulhlaups. Journal of Glaciology Vol. 12 N°66, 1973.
- Glen J.W. The stability of ice-dammed lakes and other water-filled holes in glaciers. Journal of Glaciology Vol 2, N°15, 1954.
- González J. Expedición al Glaciar Dickson, enero 1983. Parque Nacional Torres del Paine. CONAF (Informe fotocopiado).
- Lliboutry L. Traité de Glaciologie. Masson Cie. Editeurs Paris 1964.
- Lliboutry L. Nieves y Glaciares de Chile. Fundamentos de Glaciología. Ediciones Universidad de Chile, Santiago de Chile 1956.
- Mottershead D.N. y R.L. Collin. A study of glacier-dammed lakes over 75 years. Brimkylen, Southern Norway. Journal of Glaciology. Vol 17 N°77, 1976.
- Nye J.F. Water flow in glaciers: Jökulhlaups, tunnels and veins. Journal of Glaciology Vol 17 N°76.
- Peña H. y F. Escobar. Análisis de las crecidas del río Paine. Dirección General de Aguas. (en preparación).
- Pisano E. Informe sobre inundación en la Cuenca del río Paine. Instituto de la Patagonia. Punta Arenas 1982. (Informe fotocopiado).
- Rothlisberger H. Water Pressure in intra - and subglacial Channels. Journal of Glaciology. Vol 11, N°62, 1972.
- Shreve R.L. Movement of water in Glaciers. Journal of Glaciology. Vol 11 N° 62, 1972.
- Vivian R. Les Glaciers des Alpes Occidentales. Imprimerie Allier. Grenoble 1975.

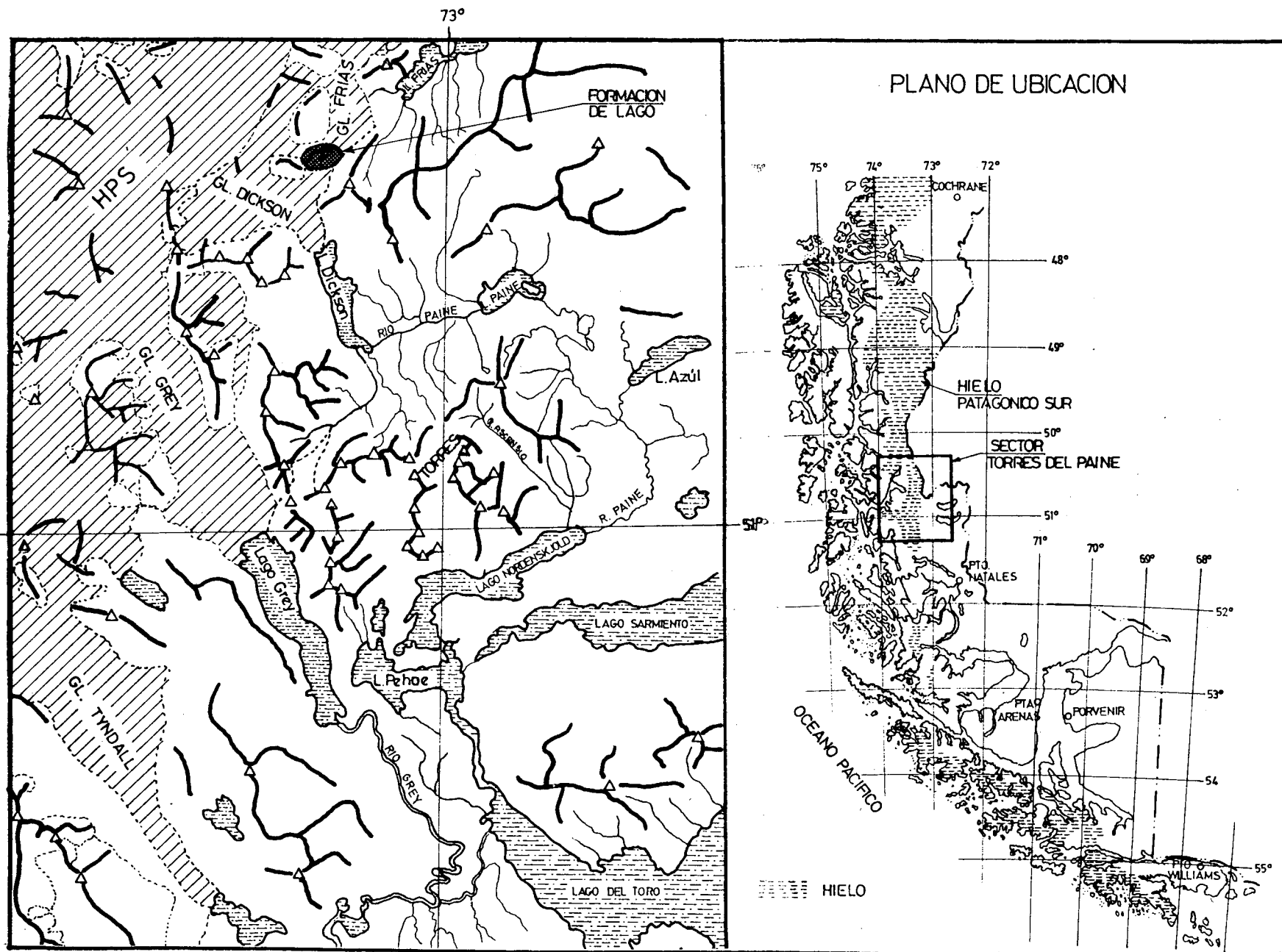


FIG. Nº1

CRECIDAS RIO PAINE ANTES LAGO DICKSON

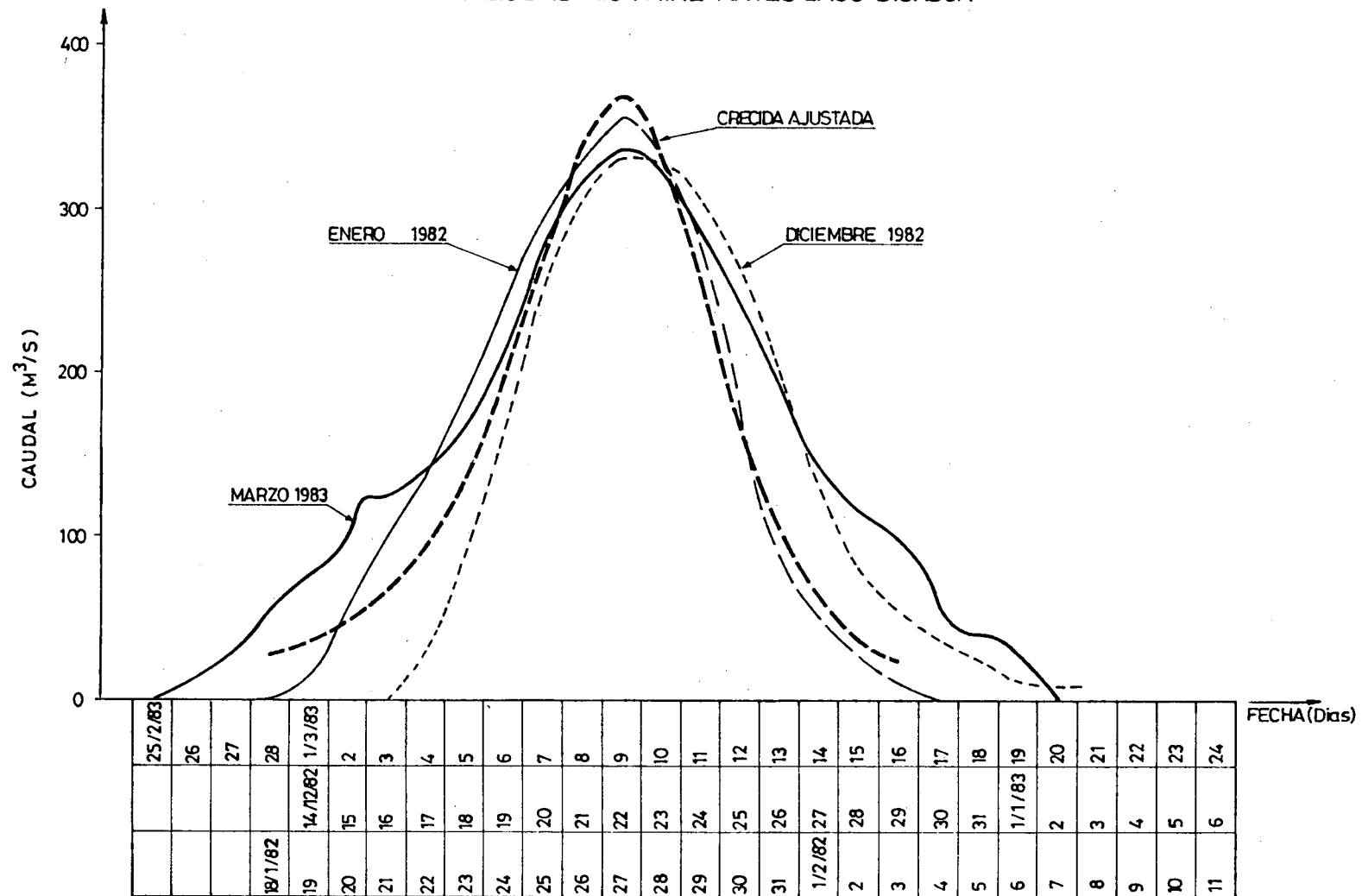


FIG. Nº 2

HIDROGRAMAS RIOS PAINE Y GREY

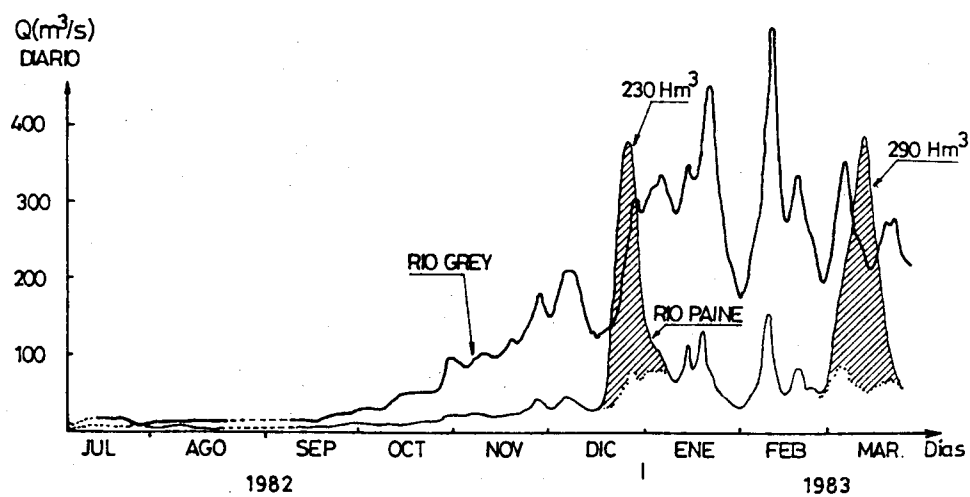
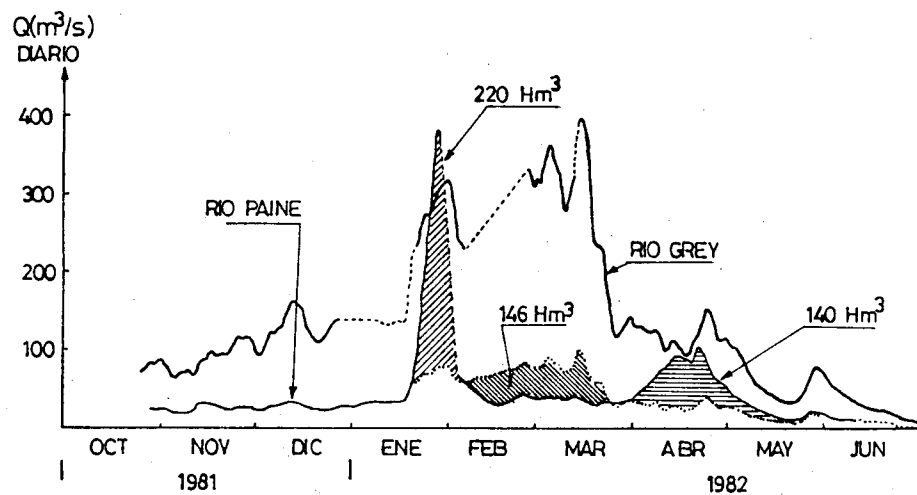


FIG. N°3

CURVA DOBLE ACUMULADA
RIO PAINE VS RIO GREY

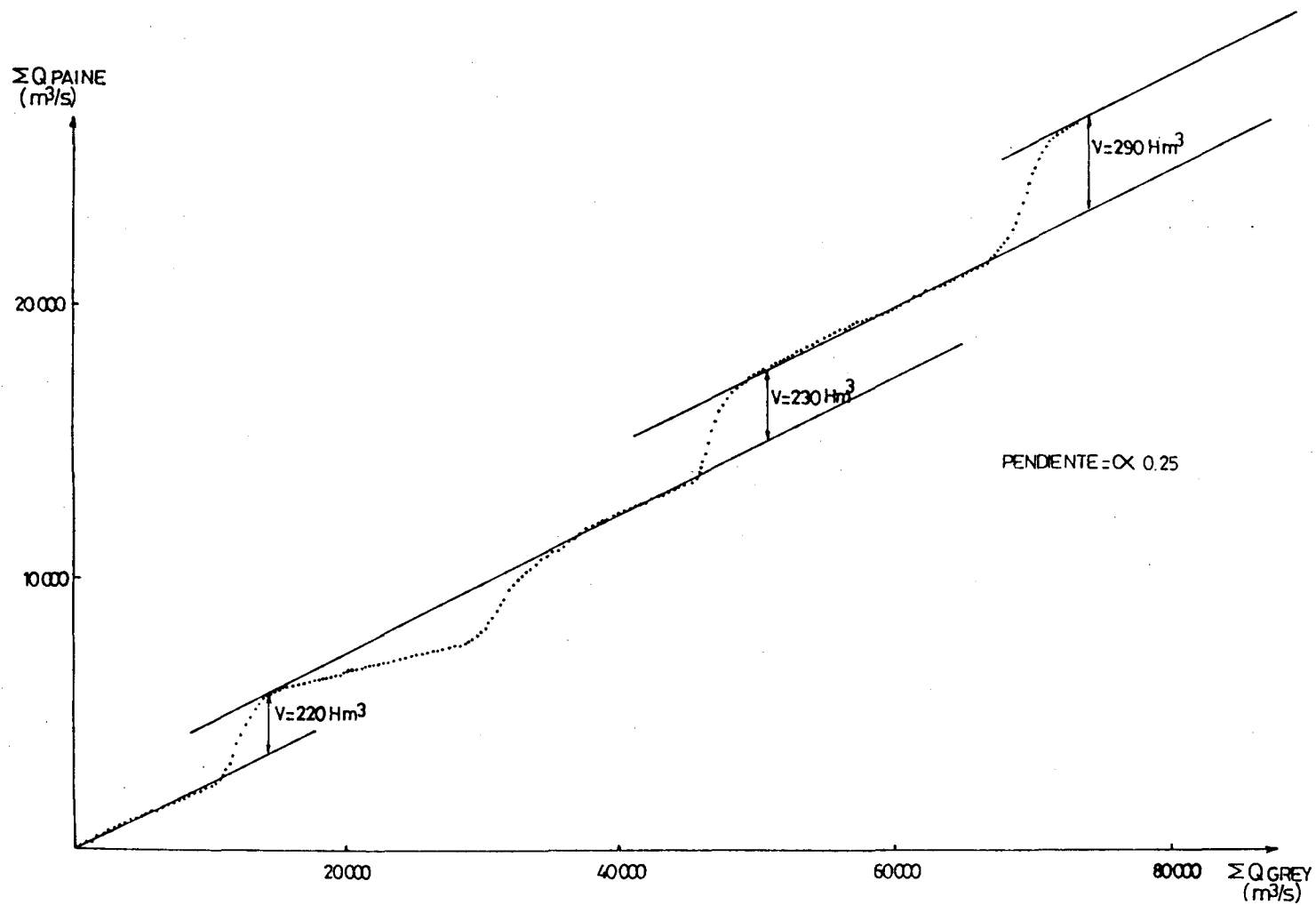
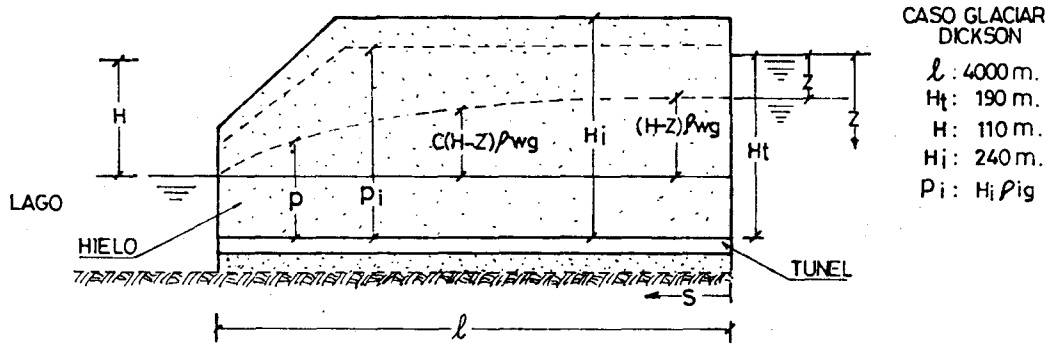


FIG. Nº 4

CROQUIS GLACIAR DICKSON



CASO GLACIAR DICKSON

l : 4000 m.
 H_t : 190 m.
 H : 110 m.
 H_i : 240 m.
 P_i : $H_i \rho_{ig}$

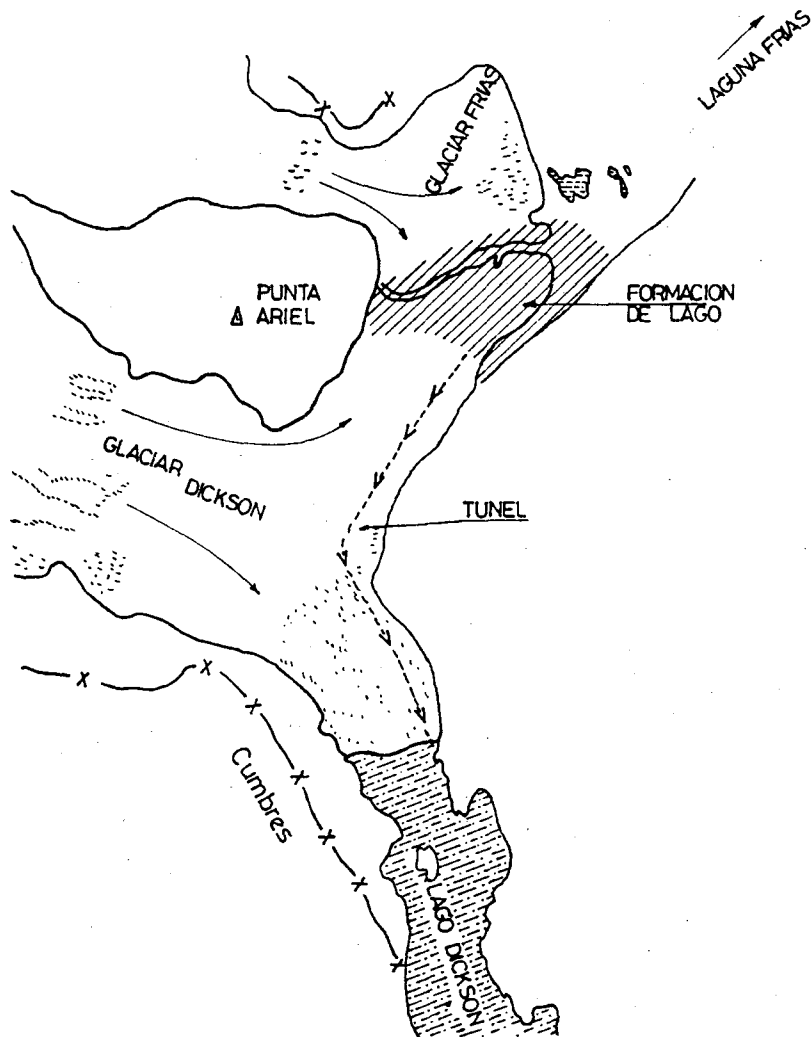


FIG. Nº 5

ANALISIS DE SENSIBILIDAD

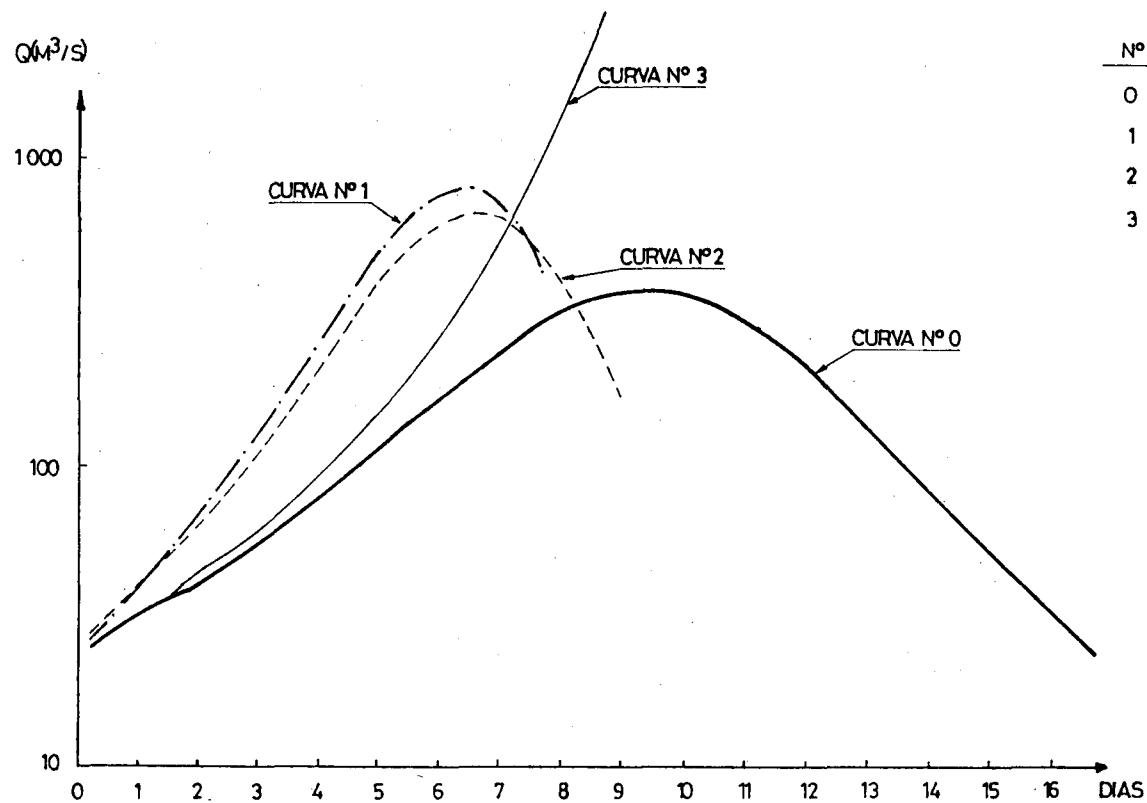


FIG. Nº6

RELACION $Q_t = K(V_t)^b$ PARA DISTINTAS CRECIDAS

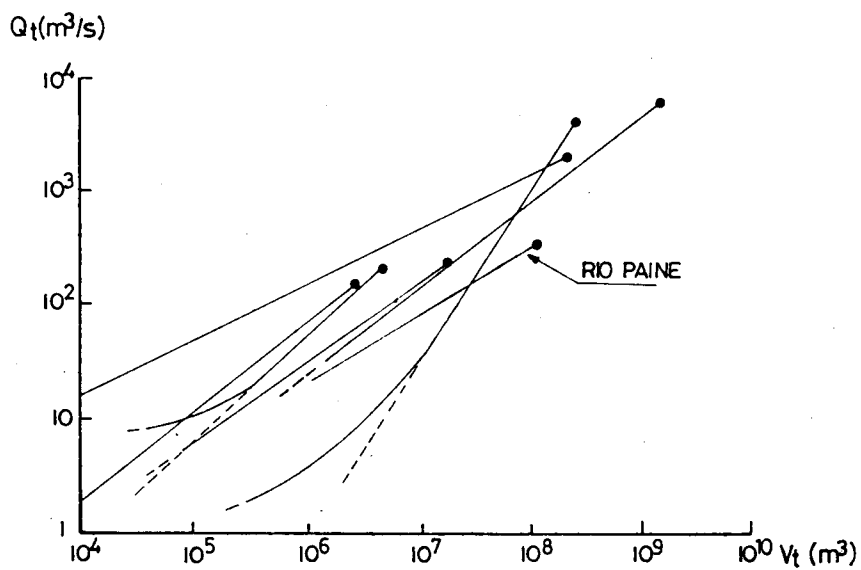


FIG. N°7

VMax. vs. QMax. PARA DISTINTAS CRECIDAS

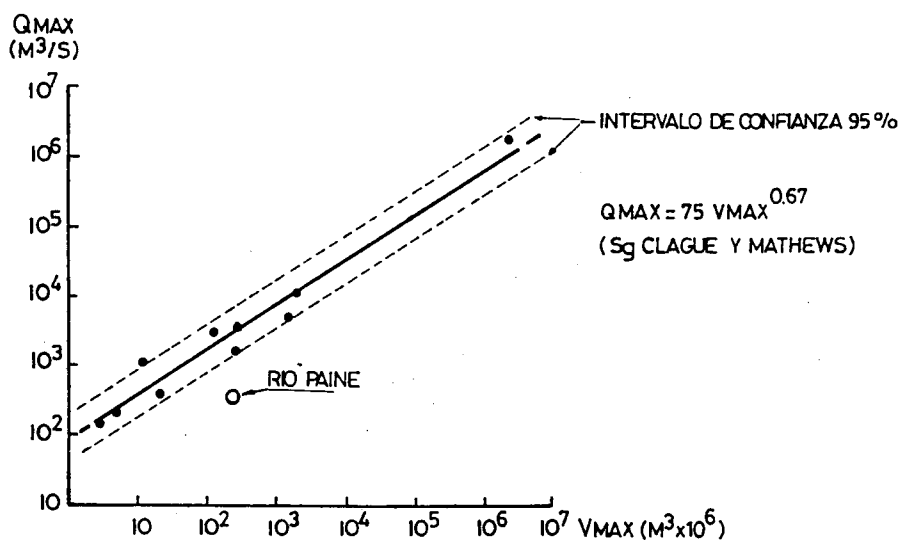


FIG. N°8