EBS/GBH

SEDIMENTACION EN EL EMBALSE DE LA CENTRAL RAPEL.

1. Generalidades. Para el proyecto de la Central Rapel de la Empresa Nacional de Electricidad S.A., ENDESA, se necesita una estimación de la sedimentación en el embalse que se formará con la construcción de la represa de la mencionada obra.

La División Hidrología de esa Empresa ha sido la encargada de la obtención de los datos y de su posterior elaboración e interpretación. El presente trabajo no incorpora conceptos nuevos sobre el difícil tema del arrastre sólido y sedimentación, pero trata de dar una visión general del método de cálculo usual en estos trabajos, el que se espera sea de utilidad, ya que la bibliografía chilena al respecto es especialmente escasa.

La hoya del río Rapel está ubicada alrededor de la latitud 34° S, siendo su precipitación media anual del orden de los 500 mm. El Rapel está compuesto por dos afluentes principales: el Cachapoal y el Tinguiririca. Cuando el proyecto se haya terminado, ambos afluentes entrarán separadamente al embalse. El área de la hoya hidrológica aguas arriba del embalse es de 10 480 km2.

En el curso de los ríos pueden distinguirse tres secciones: (1) La zona cordillerana con grandes pendientes y régimen glaciar. (2) El valle central, donde las pendientes son menores y (3) la zona de la cordillera de la costa, donde el río va encajonado, dando origen a la garganta donde se construirá la represa.

Los gastos de deshielo de la zona cordillerana son anulados o atenuados por el efecto del regadío en la zona central. En la zona en que se construirá el embalse los caudales máximos son de origen casi exclusivamente pluvial. Esta característica especial de la hoya tendrá, como se verá más adelante, influencia sobre el fenómeno en estudio.

2. Método de muestreo. El sedimento arrastrado por el río lo es en dos formas: (a) en suspensión y (b) por el fondo. El arrastre en suspensión se mide desde Mayo de 1957 en el Tinguiririca y desde Noviembre del mismo año en el Cachapoal.

Para los muestreos se construyeron estaciones de aforo con cable y carro en ambos ríos. Las primeras muestras fueron tomadas con un muestreador cilíndrico, a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ del ancho del río, con cuatro puntos en cada vertical.

Pasado Junio de 1958 las muestras se han obtenido con un muestreador integrador tipo US D-46 tomándose 10 verticales en la sección.

Estos muestreos completos se toman una vez al mes. Además se toman muestras diarias desde la orilla con botellas de ½ litro a fin de utilizarlas como índices de la variación de la concentración entre muestreos.

El análisis granulométrico se hace tamizando una muestra de 200 litros de agua tomada cerca de la orilla.

Los diversos intentos destinados a medir directamente el arrastre por el fondo han tropezado, como en casi todos los casos conocidos, con dificultades prácticas insalvables.

3. Medida del arrastre en suspensión. Se cuenta con más de cuatro años de estadística de arrastre en suspensión.

Se utilizarán dos métodos :

a) Análisis directo de la estadística de gasto sólido.

b) Análisis basado en la curva de duración del gasto sólido.

3.1 Análisis directo de la estadística. Los arrastres mensuales observados en las dos secciones de control son los siguientes:

CUADRO I

Cachapoal en Puente Arqueado

Arrastre en suspensión (miles de toneladas).

	58/59	59/60	60/61	61/62
Mayo	16.9	38.4	17.5	10.3
J	178.3	146.1	82.1	206.6
J	18.1	147.7	35.0	20.7
A	154.8	30.6	29.4	49.4
S	16.8	47.2	10.5	104.6
O	13.0	8.8	5.3	33.7
N	22.1	61.7	26.2	64.6
D	31.3	195.3	41.8	109.2
E	9.2	113.3	3.6	1.2
F	3.8	13.6	1.5	0.6
M	3.2	4.1	30.6	0.4
A	63.8	12.9	13.3	(0.4)
Sumas	531.3	819.7	296.8	601.7

CUADRO II

Tinguiririca en Los Olmos

Arrastre en suspensión (miles de toneladas).

	58/59	59/60	60/61	61/62
M	9.0	8.7	1.6	1.0
J	36.2	59.8	15.7	53.8
J	10.7	44.0	14.6	11.9
A	128.6	25.8	5.2	29.0
S	10.8	17.9	1.7	110.4
O	8.9	1.6	1.1	38.0
N	11.3	10.0	1.4	26.0
D	3.1	26.3	2.5	57.1
E	0.9	14.0	0.1	(2.5)
F	0.2	0.1	0.1	(0.5)
M	0.5	0.5	18.5	(0.3)
A	13.5	0.6	0.8	(0.5)
Sumas	233.7	209.3	63.3	331.0

En el cuadro III se han comparado estos valores con los valores del gasto medio anual:

CUADRO III

Comparación entre Q y Qs

Q : Gasto medio anual m3/seg
Qs: Arrastre anual miles de toneladas

Año	Cachapoal		Tinguiririca	
	Q	Qs	Q	Qs
58 - 59	84	531.3	45	233.7
59 - 60	104	819.7	61	209.3?
60 - 61	65	296.8	20.5	63.3
61 - 62	101	601.7	46	331.0
50 %	87		47	

Estos valores se han llevado a las figuras N° 1 y 2, dibujándose en ellas rectas que ajusten los cuatro puntos disponibles.

Con esta recta se han determinado los arrastres medios para ambos ríos que resultan ser:

Cachapoal : 580 000 ton/año
Tinguiririca : 275 000 ton/año

Como la dispersión observada en esta relación es muy alta se da también un valor calculado con una envolvente que se pone en el peor de los casos. Estas envolventes son las rectas A en las figuras 1 y 2. Se llega así a las siguientes cifras :

Cachapoal : 685 000 ton/año
Tinguiririca : 350 000 ton/año

Los gastos en suspensión medios observados en los cuatro años son:

Cachapoal : 558 000 ton/año
Tinguiririca : 209 000 ton/año

3.2 Curva de duración del gasto sólido. El método se detalla a continuación:

3.2.1 Elaboración de las estadísticas. De las concentraciones medias diarias se obtuvieron las toneladas/días. Ejemplo:

I	II	III	IV	V
Fecha	C gr/m3	Qmd m3/seg	Qs gr/seg	Qs ton/día
1	-	-	-	-
2	88	16,4	1 443	124,7
3	65	16,0	1 040	89,9
4	41	15,6	640	55,3
5	38	15,0	570	49,2

Columnas:

I : Fecha del mes
II : Concentraciones en gr/m3 (corresponde a la muestra diaria)
III : Qmd deducidos de la estadística fluviométrica
IV : Qs equivalente al producto II y III
V : El valor anterior por 86 400 seg.

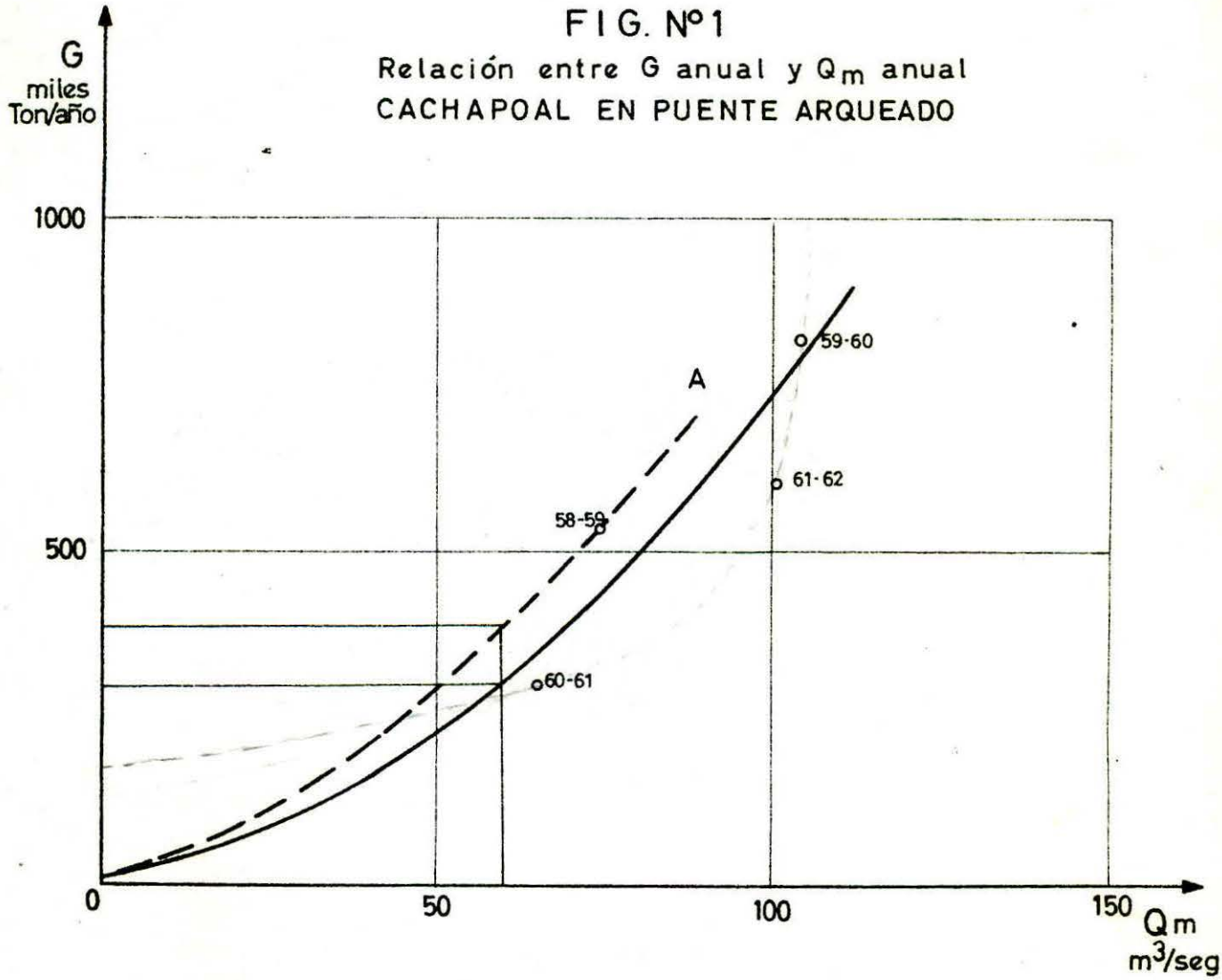


FIG. Nº 1

Relación entre G anual y Q_m anual

CACHAPOAL EN PUENTE ARQUEADO

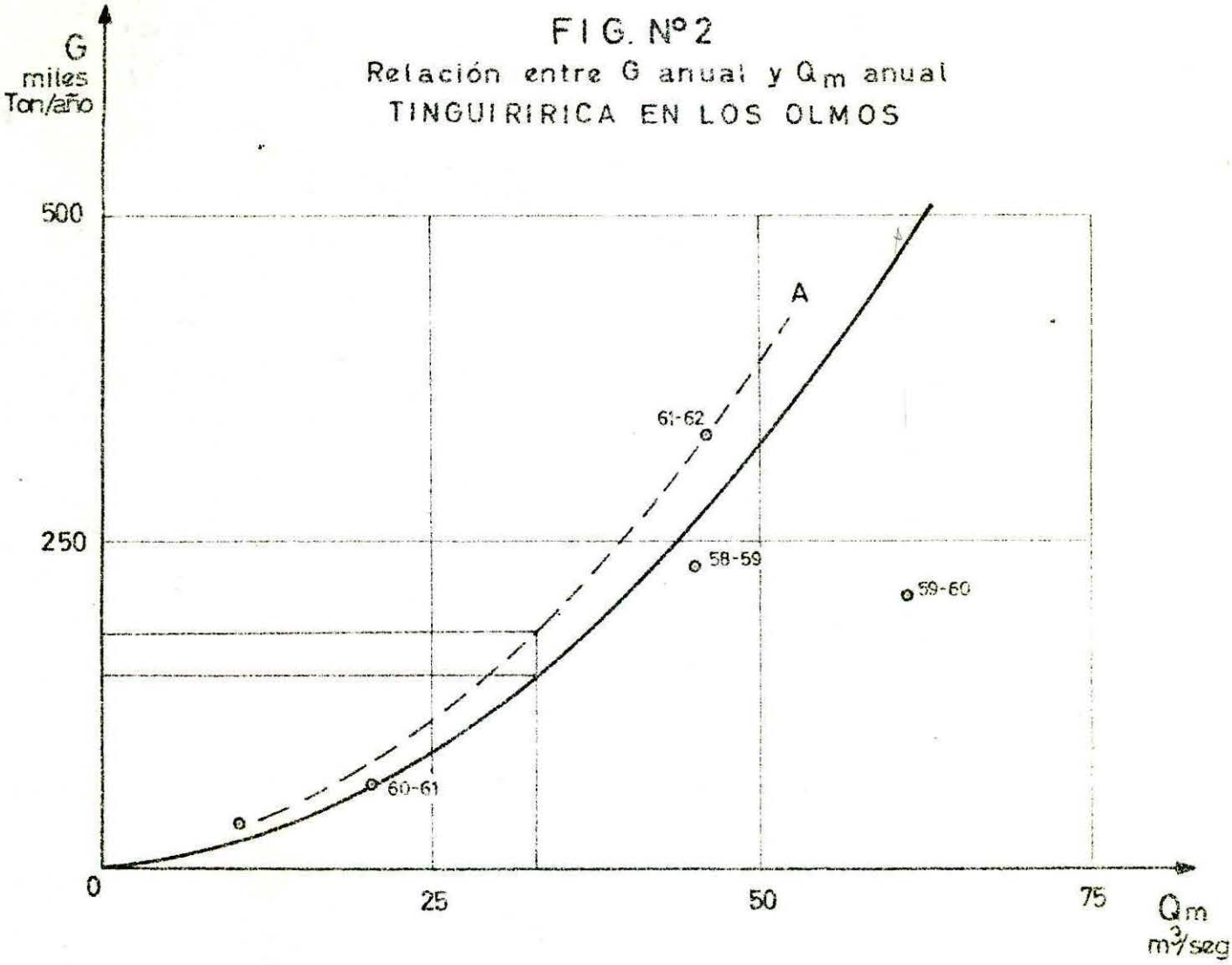


FIG. Nº 2

Relación entre G anual y Q_m anual

TINGUIRIRICA EN LOS OLMOS

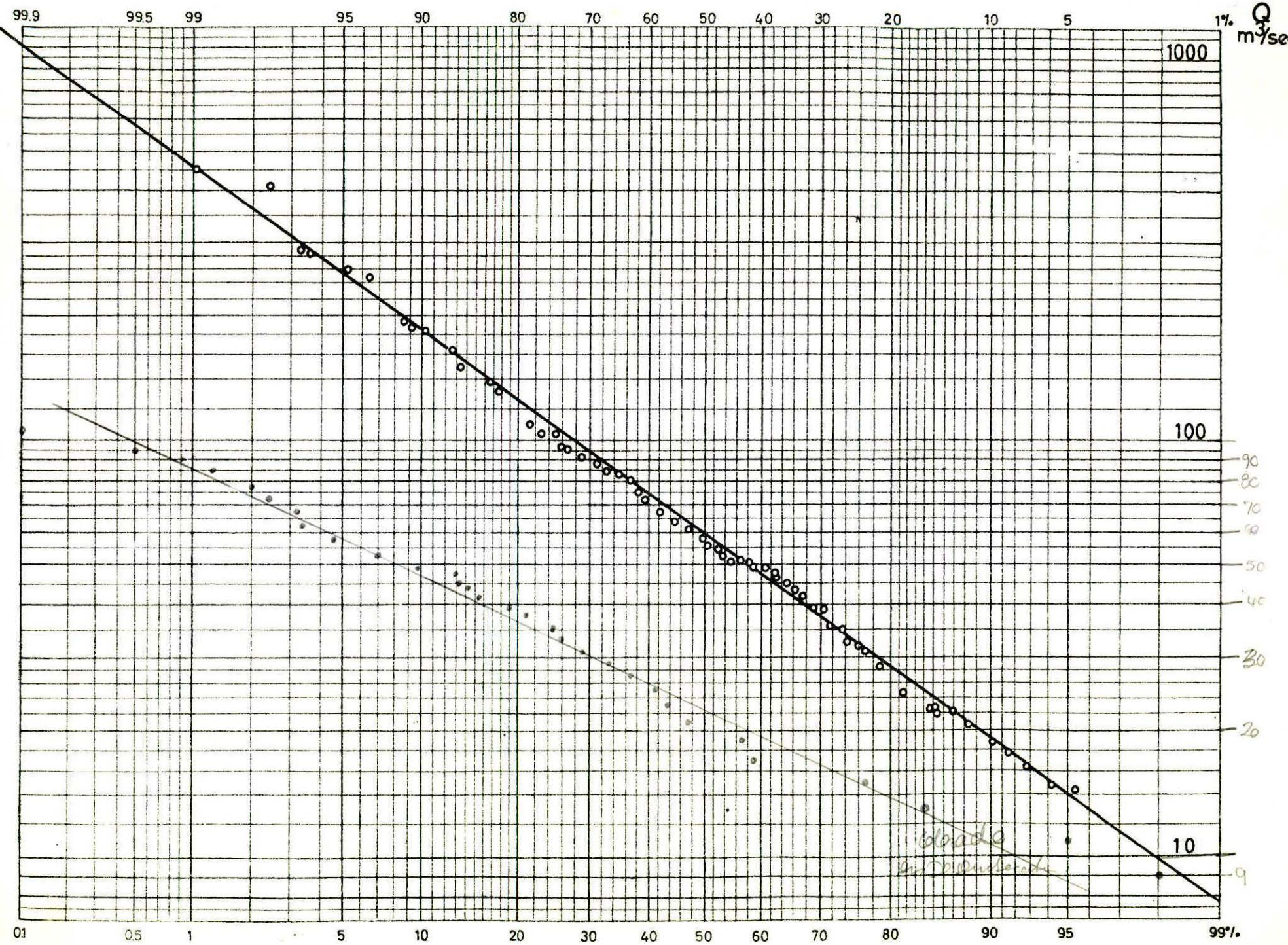


FIG. Nº3 Duración general del gasto en Pte. Arqueado

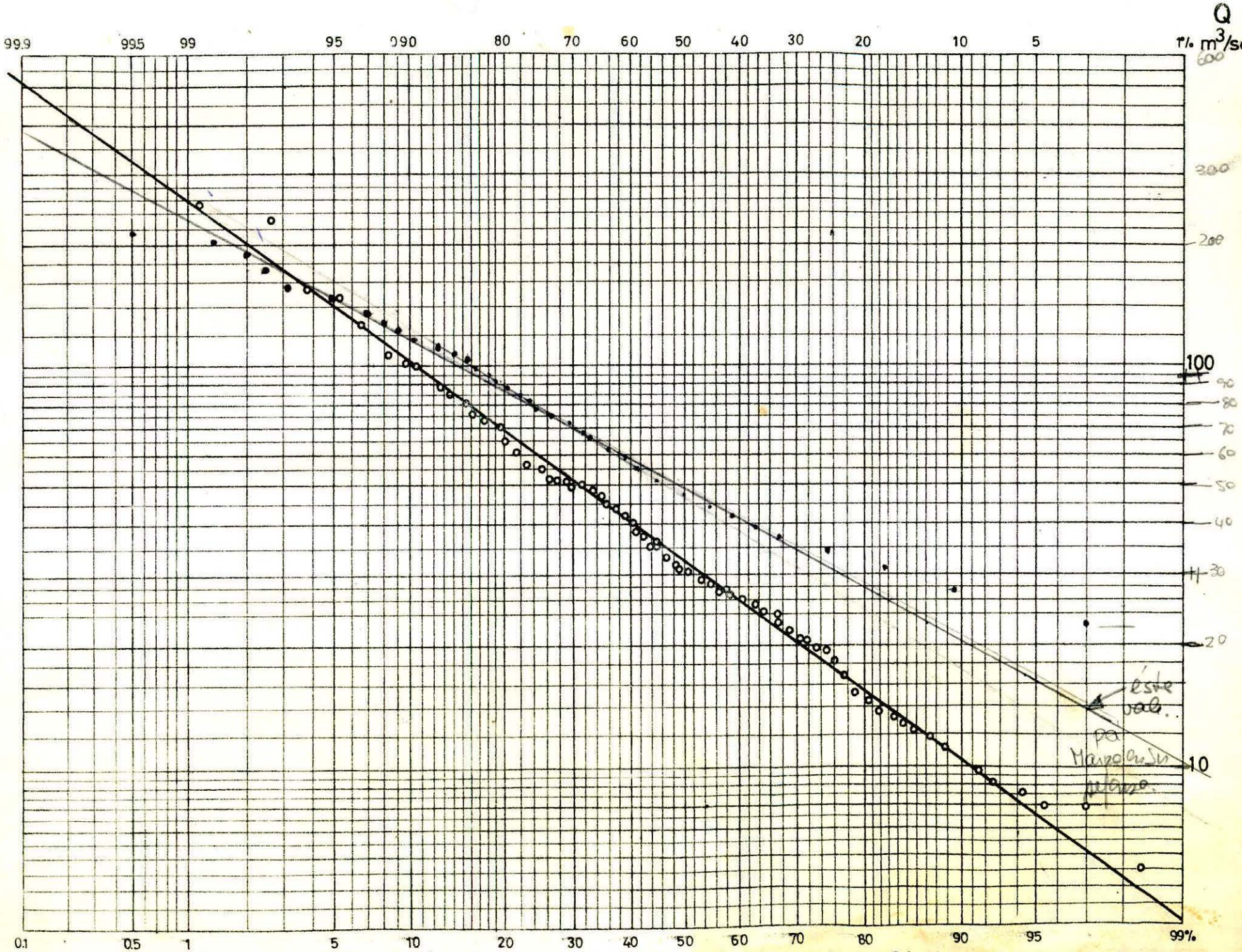


FIG. Nº4 Duración general del gasto en Los Olmos.

3.2.2 Construcción del gráfico Q - Qs. Se usó papel Log-Log; colocando en abscisas los gastos y en ordenadas los gastos sólidos correspondientes.

Al colocar los puntos se observó una nube con cierta tendencia; para visualizar la curva se dividieron las coordenadas en intervalos de clases y se calcularon los baricentros de los puntos comprendidos entre dichos intervalos. Se obtuvieron así los gráficos Q - Qs para ambas secciones. (Figs. 5 y 6).

3.2.3 Resumen. Se dispone ahora de los siguientes datos para las dos secciones:

a. Duración general del gasto.
b. Estadística de cuatro años de ton/día.
c. Relación entre Q y Qs.

3.2.4 Determinación del arrastre anual.

a. Se divide el rango total de gastos en intervalos relativamente cercanos. Por ejemplo, Puente Arqueado: 1 200, 1 150, 1 100, 1 050, 1 000 .....

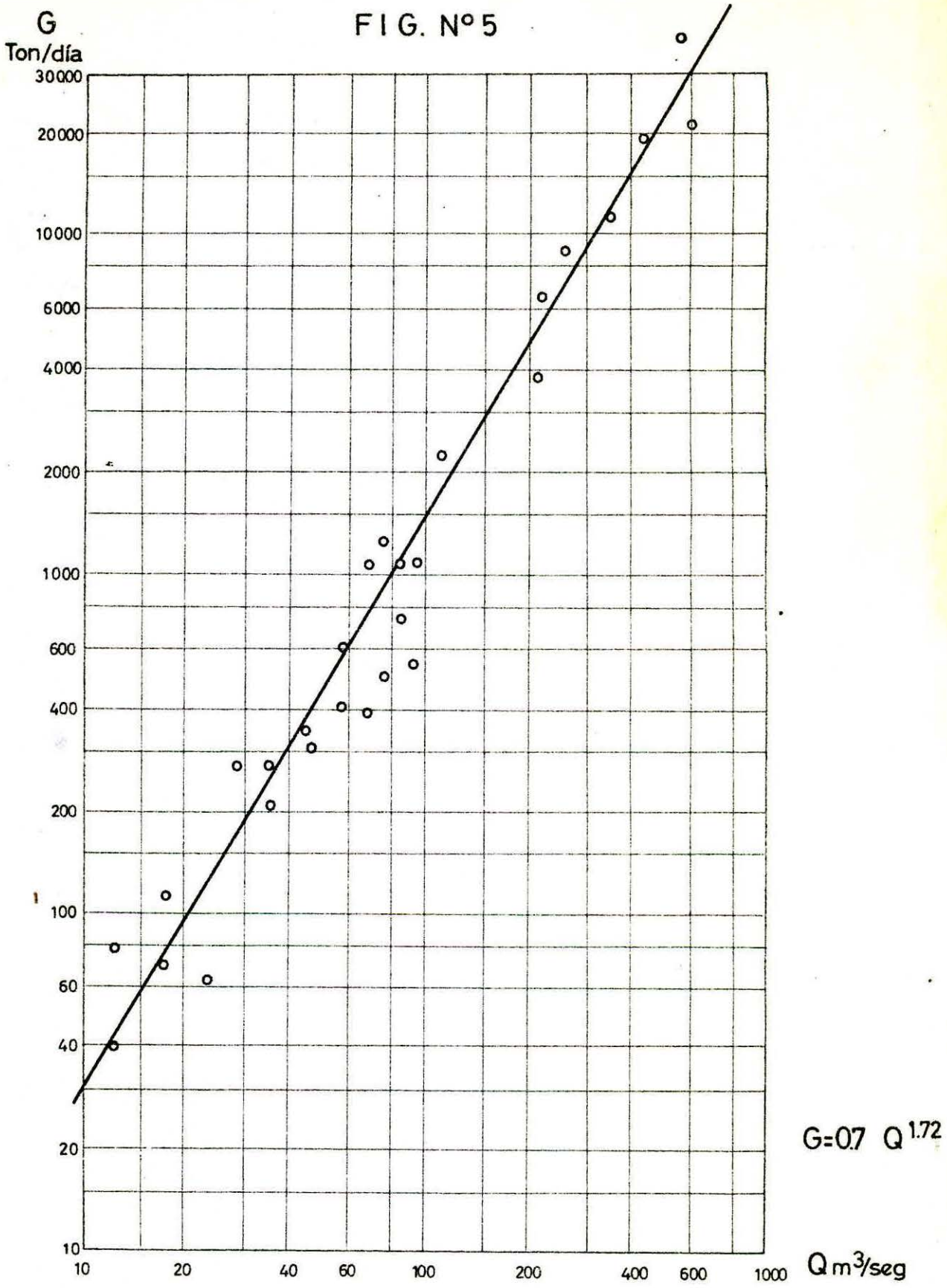
b. Se determina el período de escurrimiento anual del gasto comprendido entre cada uno de dichos intervalos, por medio de las curvas de duración general; para ello se denomina cada intervalo por su marca de clase.

c. De la relación Q - Qs se obtiene el Qs correspondiente a cada marca de clase.

d. Se multiplica el Qs así obtenido por el número de días que ha escurrido su correspondiente Q.

e. Se suman todos estos valores y se obtiene el Qs anual que ha escurrido por la respectiva sección.

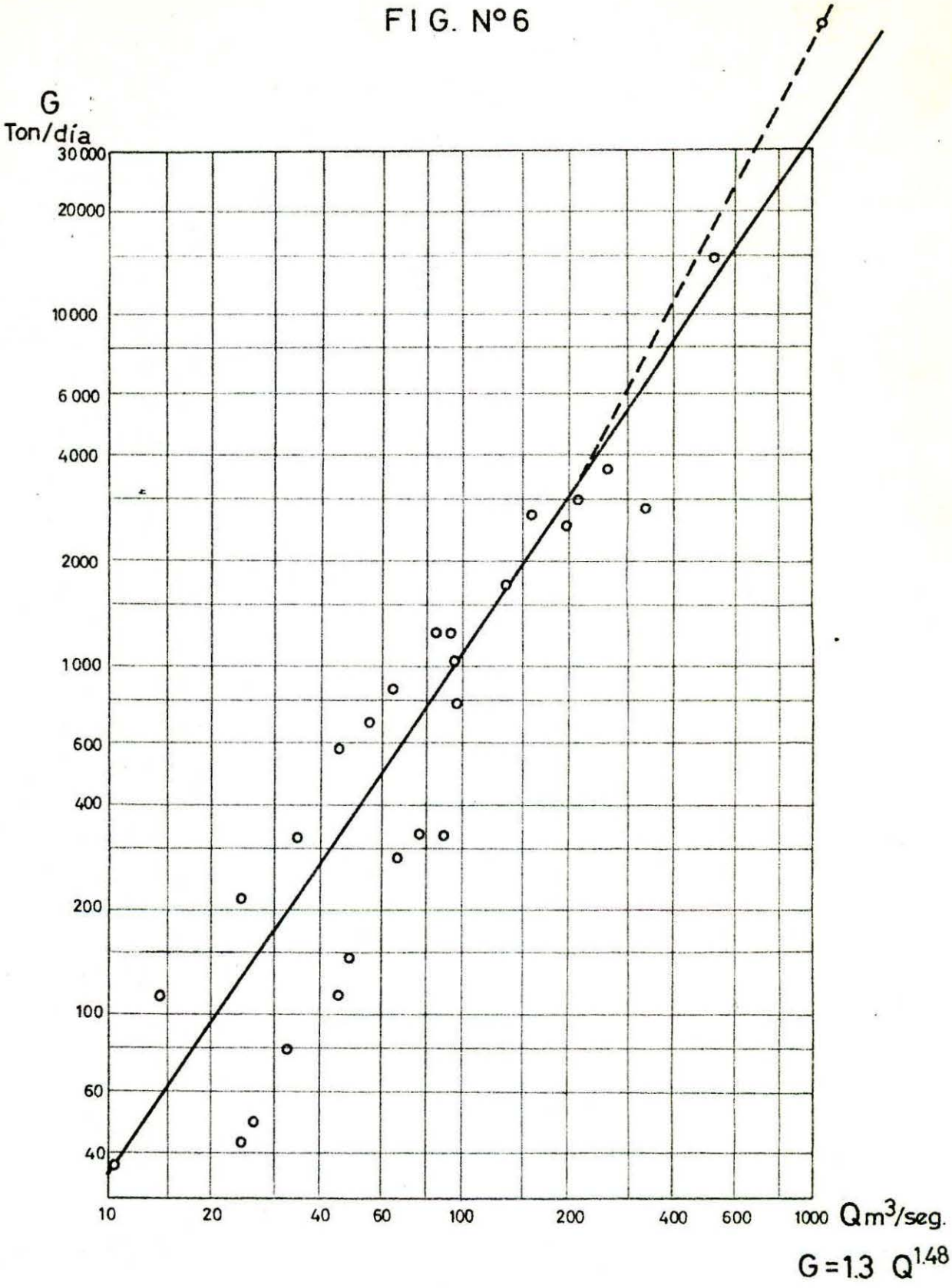
A continuación detalle del cálculo para las dos secciones:



CURVA DE DESCARGA DEL GASTO EN SUSPENSION

CACHAPOAL EN PUENTE ARQUEADO

FIG. Nº6



CURVA DE DESCARGA DEL GASTO EN SUSPENSION

TINGUIRIRICA EN LOS OLMOS

CUADRO IV

Cachapoal en Puente Arqueado

Q	ΔP	P	Qm	Qs	P(días)	P.Qs
1 000	0,0006					
950	0,0009	0,0003	975	70 000	0,1095	7 665
900	0,001	0,0001	925	63 000	0,0365	2 300
850	0,0012	0,0002	875	58 000	0,0730	4 234
800	0,0015	0,0002	825	53 000	0,0730	3 869
750	0,002	0,0005	775	47 000	0,1825	8 598
700	0,0022	0,0002	725	43 000	0,0730	3 139
650	0,003	0,0008	675	37 000	0,2920	10 804
600	0,004	0,001	625	33 000	0,365	12 045
550	0,0055	0,0015	575	29 000	0,5475	15 878
500	0,007	0,0025	525	26 000	0,9125	23 725
450	0,01	0,003	475	21 000	1,095	22 995
400	0,015	0,005	425	17 000	1,825	31 025
350	0,02	0,005	375	14 000	1,825	25 550
300	0,03	0,01	325	10 500	3,65	38 325
250	0,05	0,02	275	8 500	7,30	62 050
200	0,08	0,03	225	6 000	10,95	65 700
150	0,14	0,06	175	3 900	21,90	85 410
100	0,26	0,08	125	2 100	29,20	61 320
90	0,30	0,04	95	1 350	14,6	19 710
80	0,36	0,06	85	1 100	22,0	24 200
70	0,41	0,05	75	900	18,3	16 470
60	0,48	0,07	65	700	25,6	17 920
50	0,56	0,08	55	550	29,2	16 060
45	0,61	0,05	47,5	420	18,3	7 686
40	0,66	0,05	42,5	350	18,3	6 405
35	0,72	0,08	37,5	280	29,2	8 176
30	0,77	0,05	32,5	220	18,3	4 026
25	0,83	0,06	27,5	160	22,0	3 520
20	0,89	0,06	22,5	120	22,0	2 640
15	0,945	0,09	17,5	80	33,0	2 640
10	0,975	0,03	12,5	45	10,95	493
5						
0						

614 558

≈ 610 000

CUADRO V

Tinguiririca en Los Olmos

Q	P	Δ P	Qm	Qs	ΔP(días)	P.Qs
1 000	0,00006					
950	0,00008	0,00002	975	46 000	0,0073	336
900	0,0001	0,00002	925	43 000	0,0073	314
850	0,00013	0,00003	875	38 000	0,01095	418
800	0,00020	0,00007	825	35 000	0,026	910
750	0,00025	0,00005	775	31 000	0,0183	567
700	0,00035	0,00010	725	27 000	0,0365	986
650	0,0004	0,00005	675	24 000	0,018	432
600	0,0006	0,00020	625	21 000	0,073	1 533
550	0,00078	0,00018	575	17 000	0,066	1 122
500	0,001	0,00022	525	15 000	0,080	1 200
450	0,0015	0,00050	475	12 500	0,183	2 286
400	0,0021	0,00060	425	9 500	0,22	2 090
350	0,004	0,00190	375	8 000	0,69	5 520
300	0,0052	0,00120	325	6 000	0,438	2 628
250	0,010	0,00480	275	4 500	1,752	7 884
200	0,020	0,01000	225	3 000	3,65	10 950
150	0,040	0,02000	175	2 100	7,3	15 330
100	0,100	0,06000	125	1 300	21,9	28 470
50	0,30	0,20000	75	650	73,0	47 450
40	0,40	0,10000	45	300	36,5	10 950
30	0,53	0,13000	35	210	47,45	9 964
20	0,70	0,17000	25	125	62,05	7 756
10	0,90	0,20000	15	60	73,0	4 380
5	0,98	0,08000	7,5	23	29,2	672

164 148

≈ 160 000

Este método conduciría a los siguientes valores:

Cachapoal : 610 000 ton/año
Tinguiririca : 160 000 ton/año

3.3 Valor adoptado para el arrastre en suspensión. Los valores redondeados obtenidos por los distintos métodos fueron:

	tons/año	
	Cachapoal	Tinguiririca
1) Correlación directa.		
(1 a) Valor medio	580 000	275 000
(1 b) Envolvente	685 000	350 000
2) Promedio observado en 4 años	560 000	210 000
3) Curva de duración	610 000	160 000

La dispersión de los valores no debe extrañar a nadie, ya que esto es normal en gasto sólido, máxime si se considera que de los valores expuestos anteriormente sólo serían comparables los valores (1 a) y (3).

Lo lógico es seleccionar un valor que de un resultado pesimista. Se elegirán así :

Cachapoal : 600 000 ton/año
Tinguiririca : 300 000 ton/año

Total 900 000 ton/año

4. Arrastre por el fondo. Como ya se ha dicho, la determinación del arrastre por el fondo es complicado y los resultados tienen una gran dispersión.

Es por ello que se aplicarán varias fórmulas, a saber:

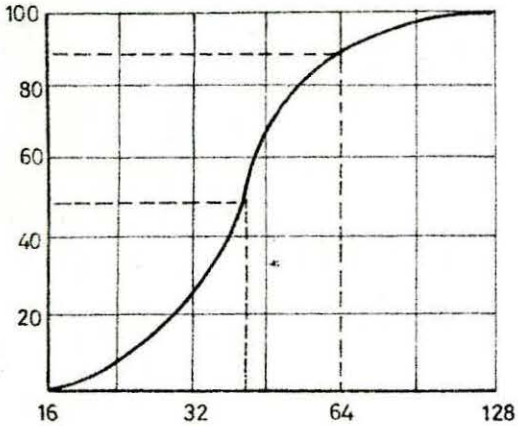
1) Fórmula de Meyer - Peter (moderna)
2) Fórmula de Einstein
3) Fórmula de Shields

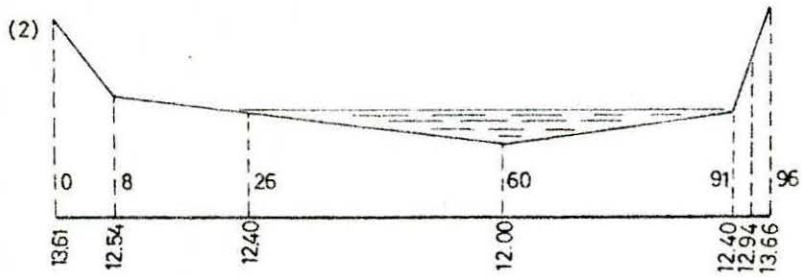
Los cálculos se harán para las dos secciones ya mencionadas. Las características de las secciones se indican en las figuras N° 7 y 8.

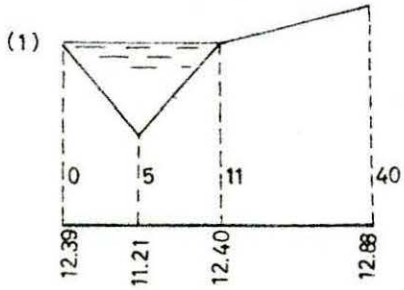
FIG. N 7

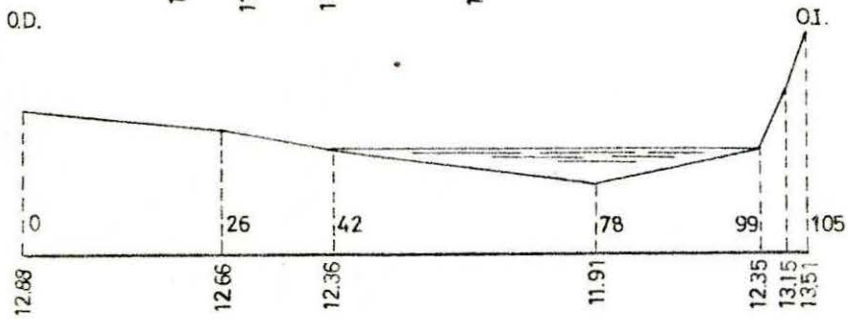
CARACTERISTICAS DE LA SECCION CACHAPOAL EN PUENTE ARQUEADO

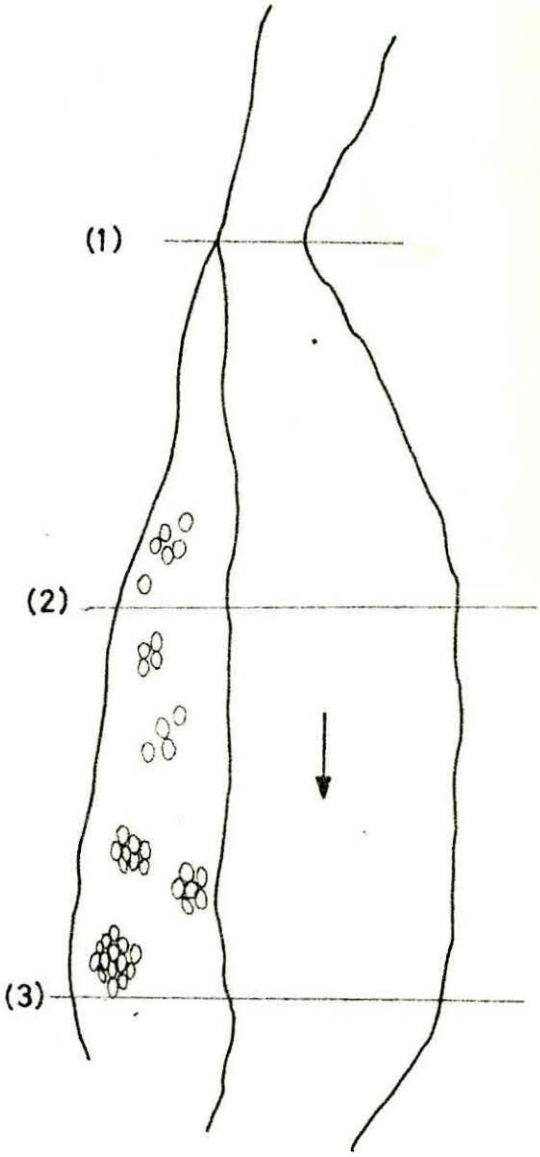
GRANULOMETRIA DEL LECHO









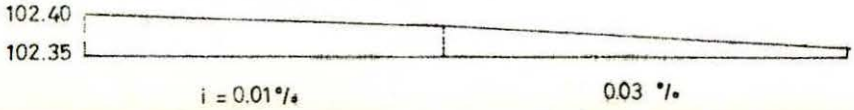


ESCALAS PERFILES

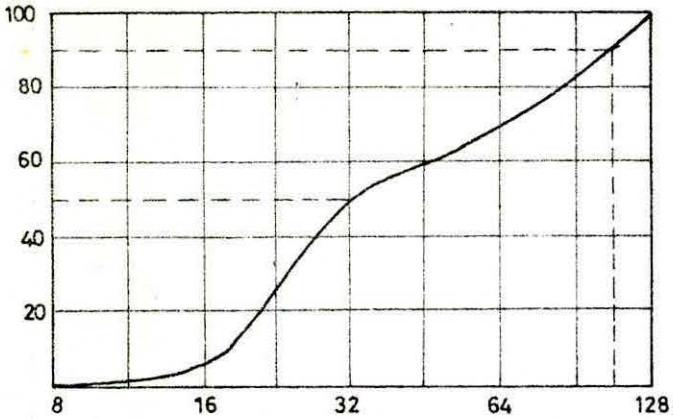
H 1 cm : 10 m

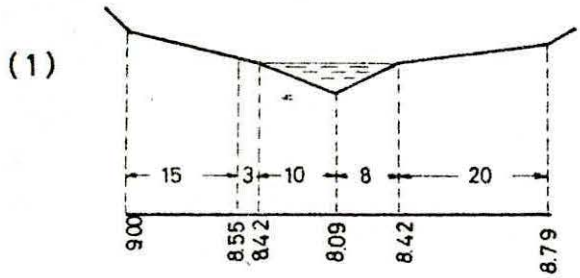
V 1 cm : 1 m

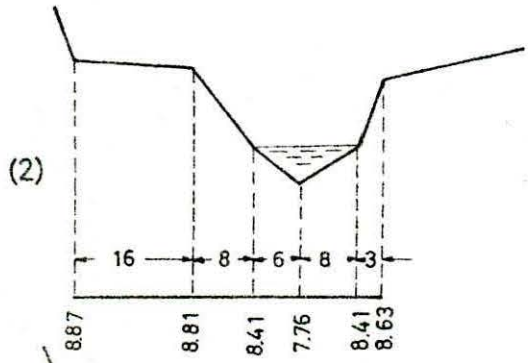
PENDIENTE DEL EJE HIDRAULICO

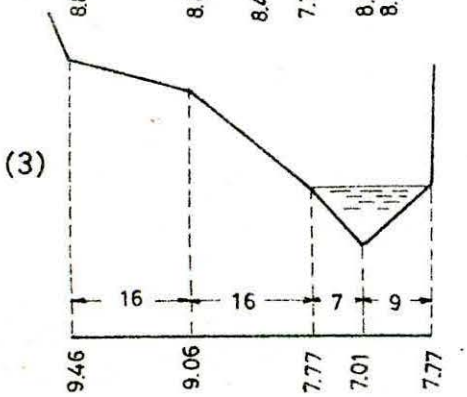


GRANULOMETRIA DEL LECHO

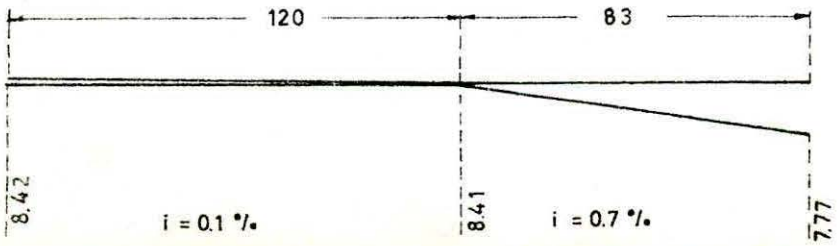








PENDIENTE DEL EJE HIDRAULICO



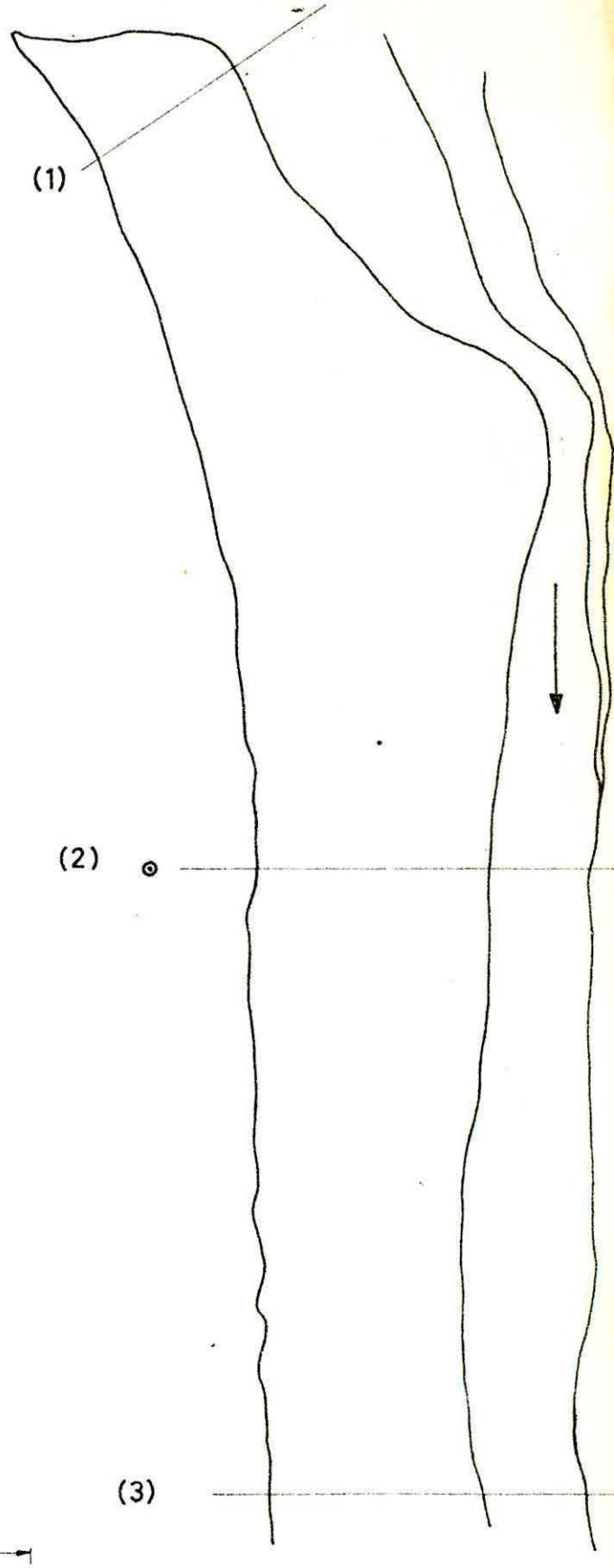


FIG. Nº8

TINGUIRIRICA EN LOS OLMOS

CARACTERISTICAS DE LA SECCION

4.1 <u>Fórmula moderna de Meyer-Peter.</u> La operatoria esquemática se - guida fué:

Para cada aforo se calculó:

Q : Gasto m3/seg
F : Sección m2
Vm : Velocidad media m/seg
t : Profundidad media m
b : Ancho m
R : Radio medio hidráulico. No se comete error de importancia si se hace igual a t.

(Deltabildung in Ammersee und Chemisee Dr. Jean Burz München 1956).

Con el valor de R y tomando una rugosidad de n = 0.04, se calculan los valores de C para cada aforo. De aquí se calcula

J_r que es la pendiente del eje hidráulico con la fórmula de Manning. Se determina luego

$$\tau = \gamma_w R J_r$$

siendo γ_w : peso específico del agua

τ_o vale :

$$\tau_o = A (S - Sw) dm$$

siendo

A : una constante sin dimensión igual a 0,047

s : peso específico del arrastre = 2 650 kg/m3

Sw : peso específico del agua = 1 000 kg/m3

dm : tamaño medio de la partícula en metros

El gasto sólido kg/seg/metro, vale:

$$gs = \left[\frac{\tau - \tau_o}{B \left(\frac{\gamma_w}{g} \right)^{1/3}} \right]^{3/2}$$

siendo B, otra constante igual a 0,25

La determinación del tamaño medio presenta algunos problemas. Este tamaño medio se determinó a varias profundidades como se indica en el Cuadro VI.

CUADRO VI

Tamaño del material del lecho a distintas profundidades (bajo el fondo)

Profundidad de la muestra metros	Cachapoal (mm)	Tinguiririca (mm)
0	40	28
0.5	24	25
1.0	34	16

El cálculo del arrastre por el fondo se ha hecho considerando el valor del diámetro medio superficial.

Los cálculos se indican en los cuadros VII y VIII del Anexo N° 1 y en las figuras N° 9 y 10. Para el cálculo del arrastre total se ha empleado el mismo método indicado en 3.2.4.

Se llega así a las siguientes cifras:

Cachapoal : 670 000 ton/año

Tinguiririca : 60 000 ton/año

4.2 Fórmula de Einstein. La operatoria se hizo de acuerdo con el siguiente plan:

(1) Para un cierto gasto se ha calculado el radio hidráulico, R; y la pendiente del eje hidráulico, S, con la fórmula de Manning.

(2) Luego se calcula el valor:

$$\psi = (S_s - 1) \frac{ds}{R\,S}$$

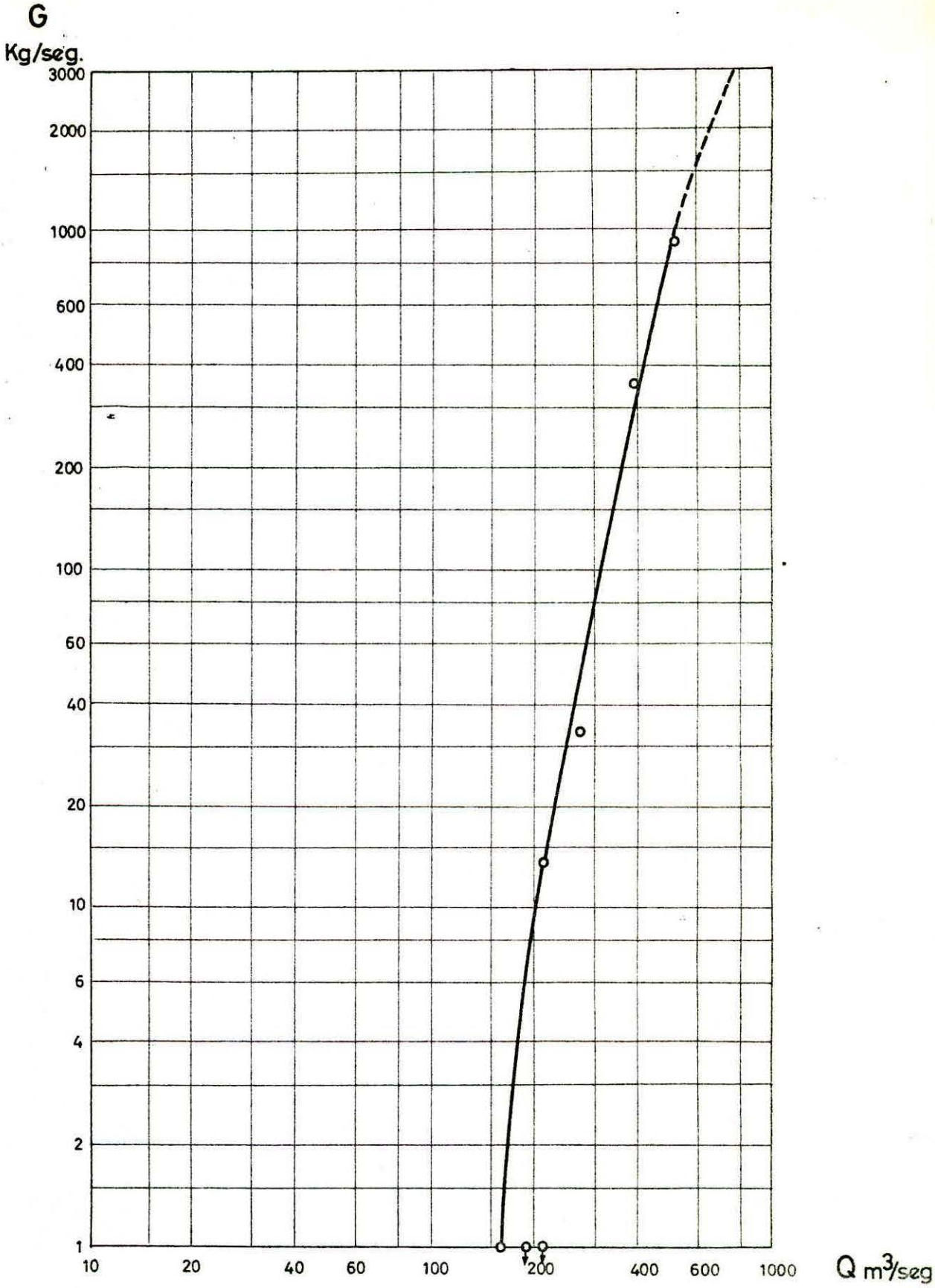
S_s : peso específico relativo del sólido = 2,65

ds : tamaño medio de las partículas.

(3) Con el abaco de Einstein se calcula $\phi = f(\psi)$ (Fig. N° 11)

(4) Se calcula F, que es función de ds de acuerdo con la siguiente tabla:

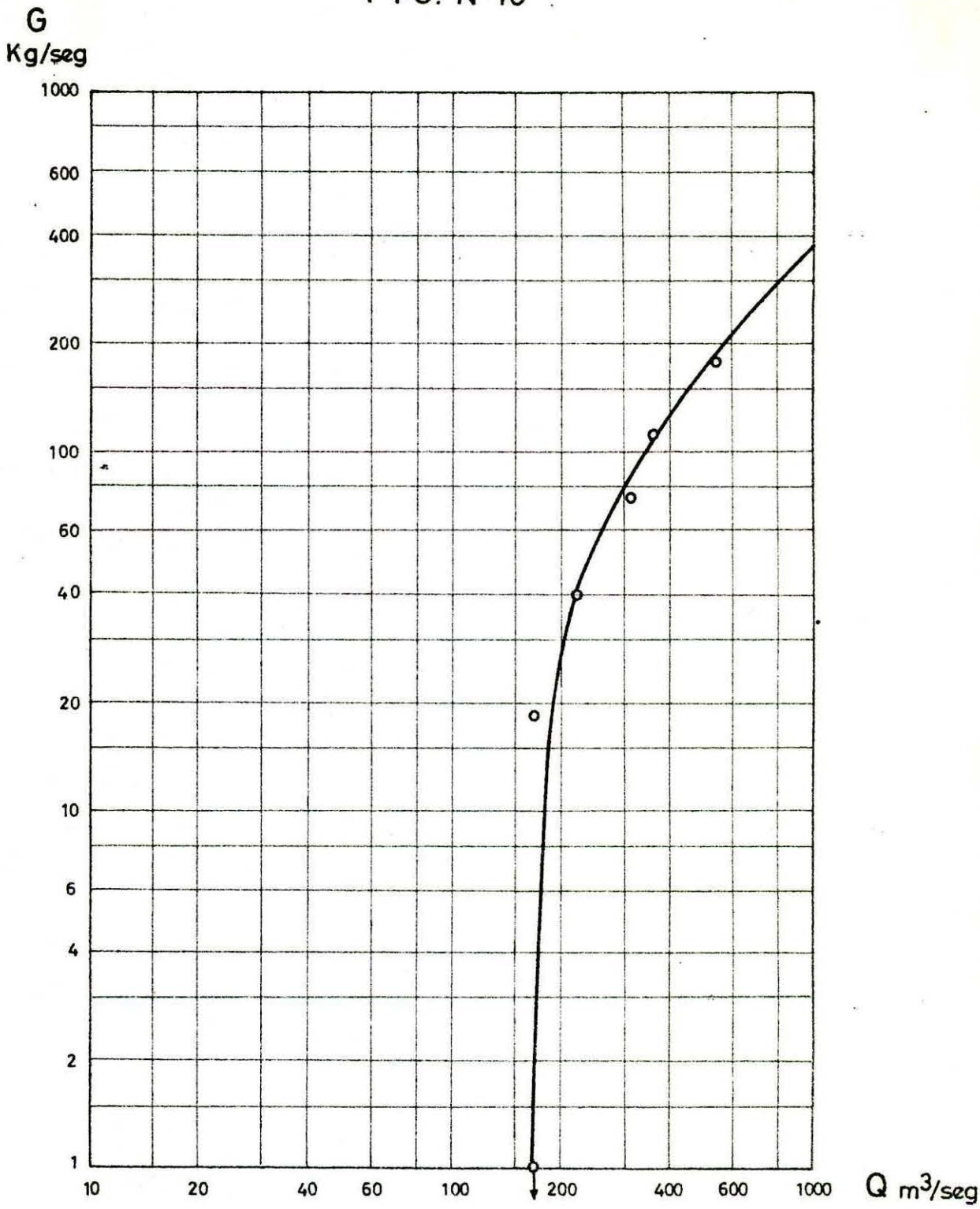
FIG. Nº9



CACHAPOAL EN PUENTE ARQUEADO

FORMULA DE MEYER-PETER

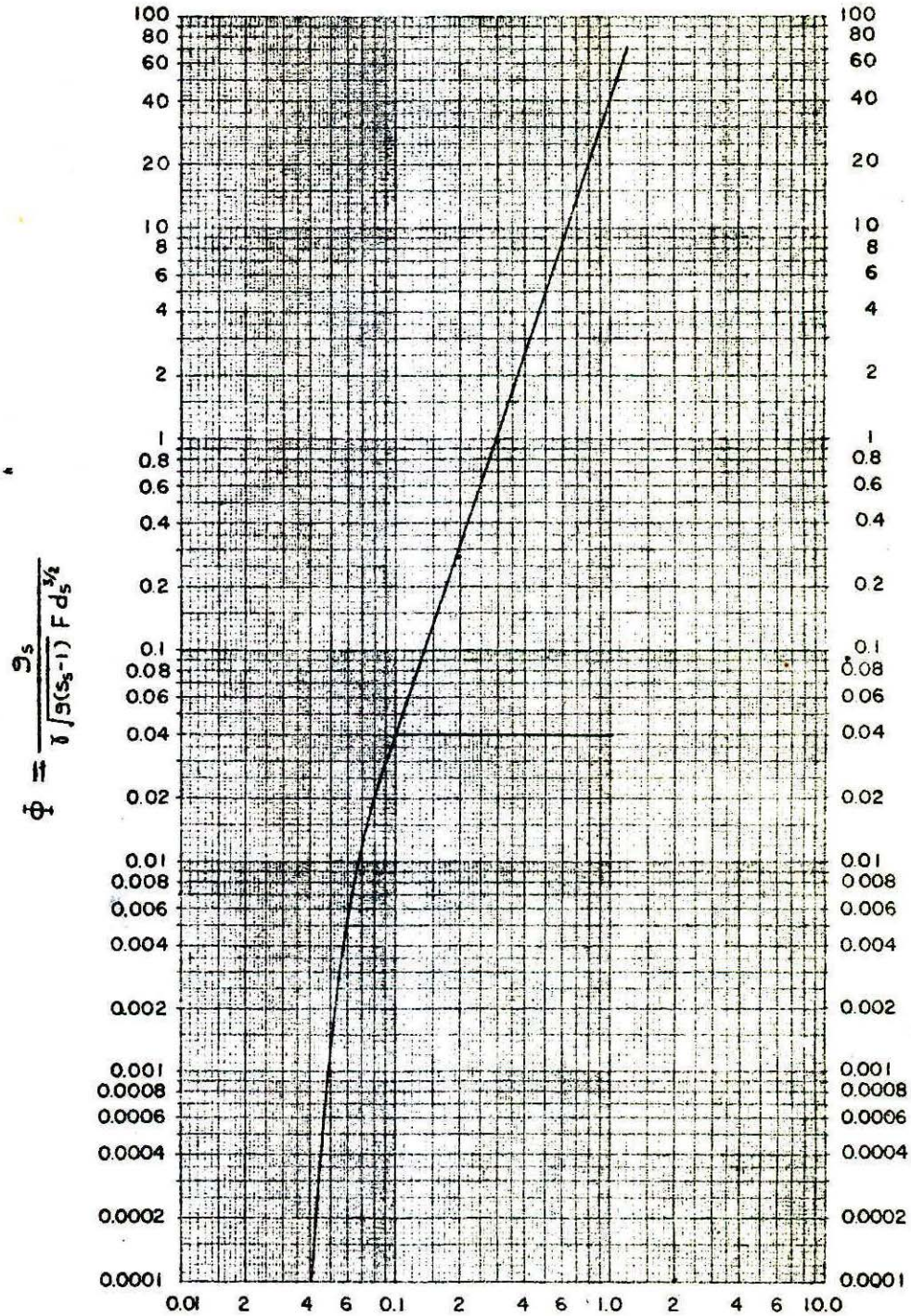
FIG. N°10



TINGUIRIRICA EN LOS OLMOS

FORMULA DE MEYER-PETER

FIG. Nº11



$$\frac{1}{\Psi} = \frac{\tau}{\gamma(S-1)d_s} = \frac{dS}{(S_s-1)d_s}$$

GRAFICO DE LA FUNCION $\phi = f(1/\psi)$
PARA LA FORMULA DE EINSTEIN

ds (mm)	F
0,3	0,6
0,5	0,7
1	0,8
2	0,8
5	0,8
10	0,8

(5) Se calcula gs, gasto sólido en kg/seg/m con la fórmula:

$$gs = \gamma s \, \emptyset \, F \; ds \sqrt{g \, ds} \; \sqrt{(Ss - 1)}$$

siendo Ss el peso específico del sólido: = 2 650 kg/m3

(6) Luego se continúa en la forma ya expuesta.

Se han utilizado también el valor superficial de ds. Los cálculos se indican en los cuadros IX y X del Anexo N° 1, y en las Figuras 12 y 13.

Los resultados son:

Cachapoal : 370 000 ton/año

Tinguiririca : 40 000 ton/año

4.3 <u>Fórmula de Shields</u>. El procedimiento seguido fué:

(1) Para cada aforo se calculan h y la pendiente S.

(2) Se calcula $\xi = \frac{ds\sqrt{g \, d \, s}}{\nu}$; $= \frac{ds\sqrt{g R S}}{\nu}$ R. radio hidráulico

ds : tamaño medio de la partícula = 0,04 m

? (t) : profundidad media

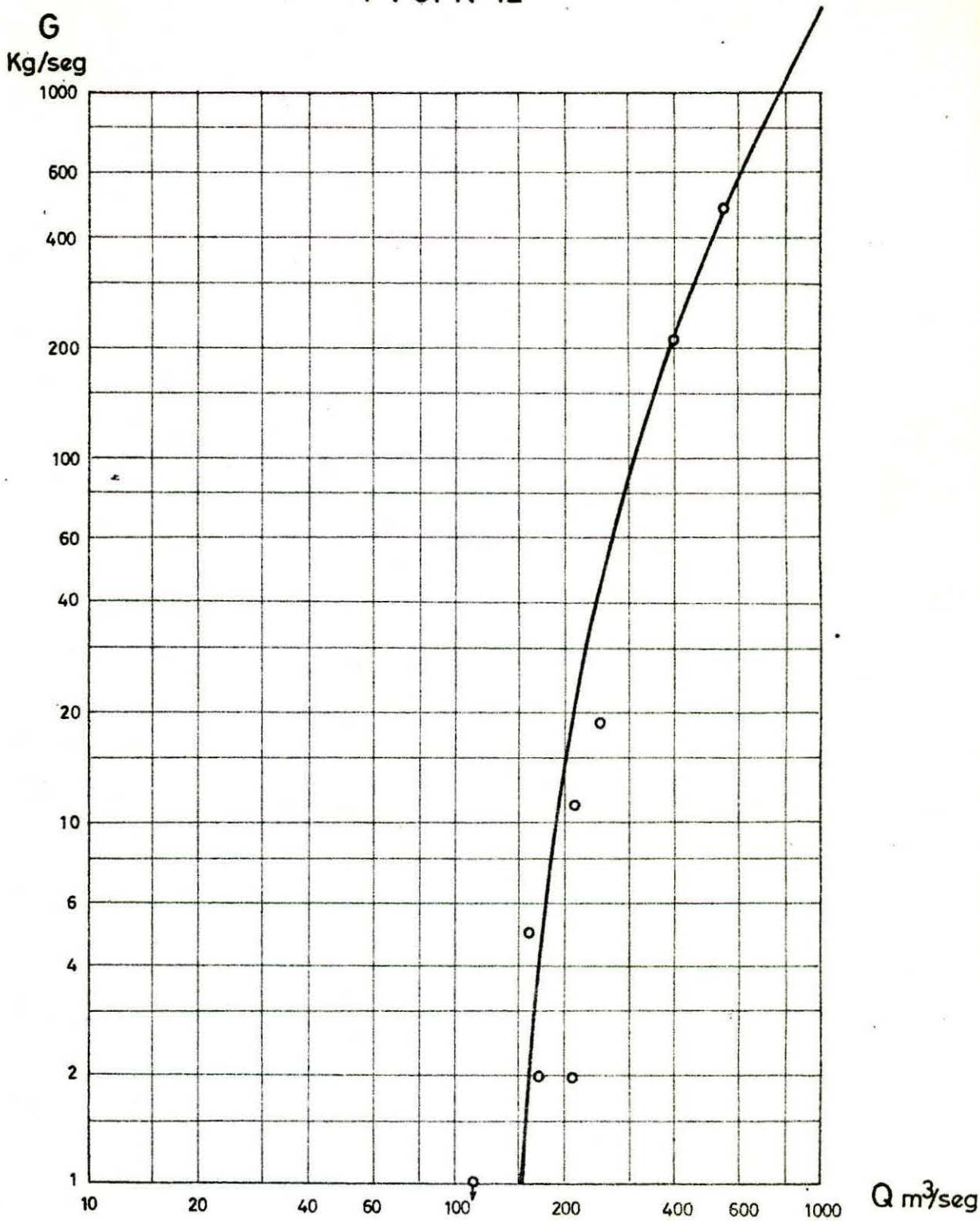
(3) a través del abaco de Shields, se calcula $\frac{\tau c}{\gamma (s_s - 1) \, ds} = f(\xi)$

(4) se calcula $\tau c = f(\xi) \, \gamma \cdot (s_s - 1) \, ds$

(5) se calcula $\tau = \gamma dS$

γ: peso específico del líquido.

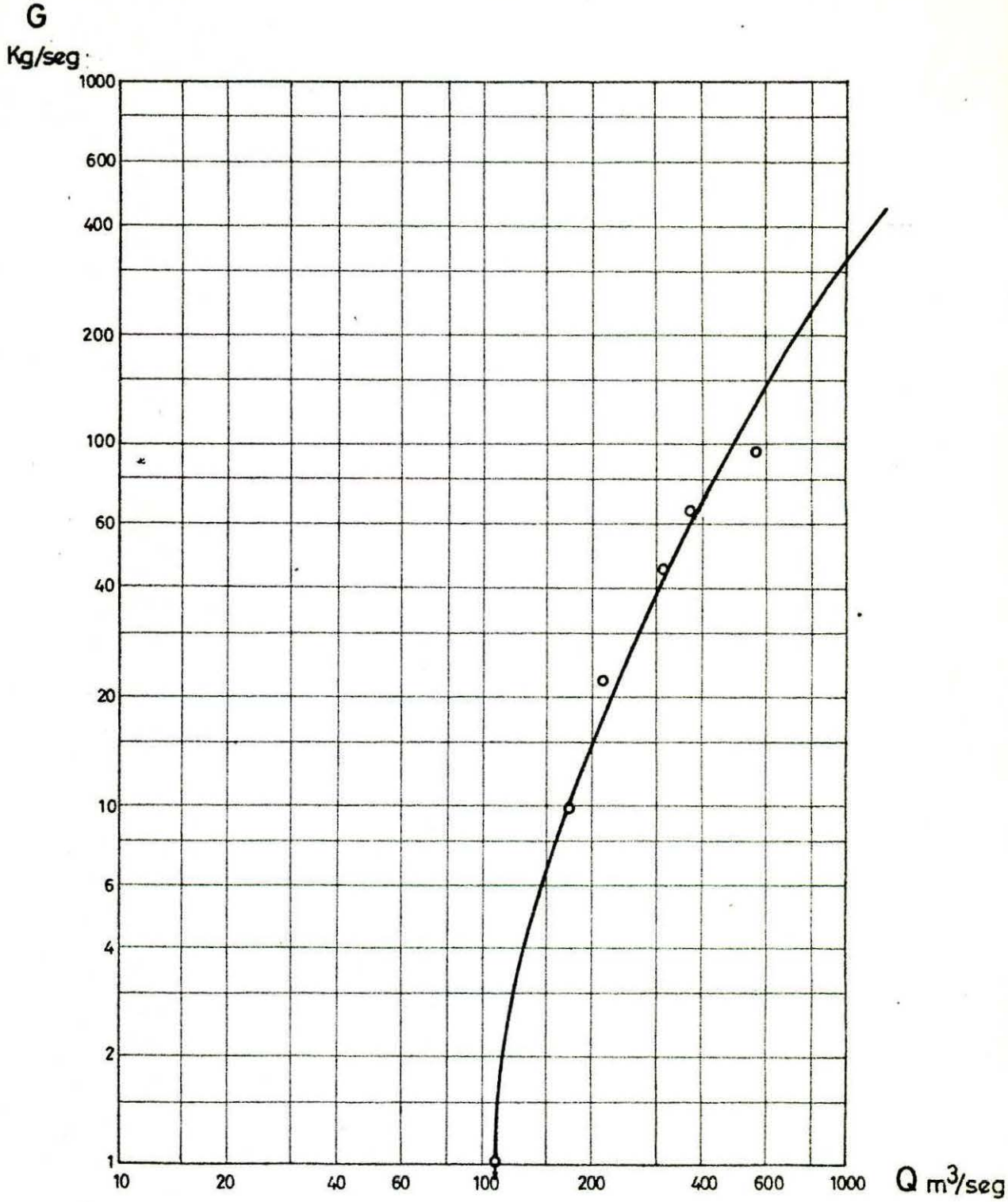
FIG. Nº12



CACHAPOAL EN PUENTE ARQUEADO

FORMULA DE EINSTEIN

FIG. Nº13



TINGUIRIRICA EN LOS OLMOS

FORMULA DE EINSTEIN

(6) se calcula gs, que vale

$$gs = \frac{10\ q\ S \cdot Ss\ (\tau - \tau_c)}{(S_s - 1)^2\ ds}$$

siendo q : el gasto por unidad de ancho.

(7) se continúa como en los casos anteriores.

Los cálculos se indican en los cuadros XI y XII del Anexo N° 1 en las Figuras 14 y 15, llegándose a los siguientes resultados:

Cachapoal : 750 000 ton/año

Tinguiririca : 85 000 ton/año

4.4 Estimación basada en experiencia extranjera. Nos hemos basado en el artículo de J. Messines en la "Houille Blanche" N° especial B, 1957, en el cual se dan valores del coeficiente de transporte específico: m3 de sedimento (km2 de Hoya/año).

Estos valores son:

	Gg
Macizo central (Francia)	20 - 50
Pirineos	70
Hoyas torrenciales de Los Alpes	500 - 800
Ródano y Valais (Suiza)	900
Apeninos (Italia)	5 280
Africa del Norte (Argelia)	3 100 - 10 000
Los Angeles (U.S.A.)	400 - 9 600
Missouri, desembocadura (U.S.A.)	118
Moravia del Sur (Yugoeslavia)	6 700
Neretva (Yugoeslavia)	1 000

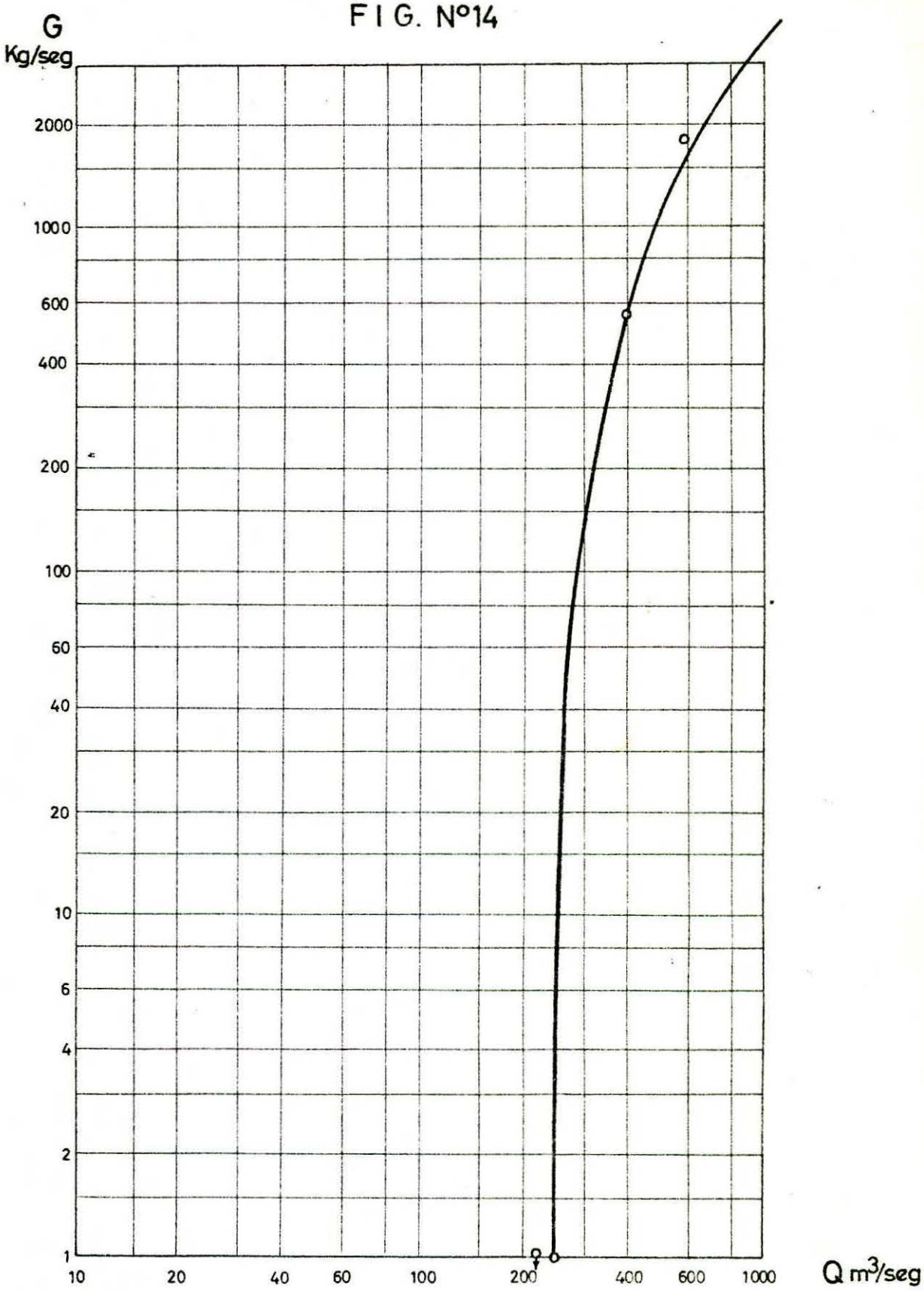
también da datos para el % de arrastre por el fondo:

Santet	30 %
Serre Ponçou	8 - 12 %
Ródano	30 %
Missouri	10 %

El valor 800 000 ton/año para el arrastre en suspensión corresponde a unos 70 ton/año/km2, que es muy bajo.

De acuerdo con las cifras para porcentaje de arrastre por el fondo y considerando un máximo (40 %), tendríamos un total de 1 120 000 de toneladas al año: 800 000 en suspensión y 320 000 por el fondo.

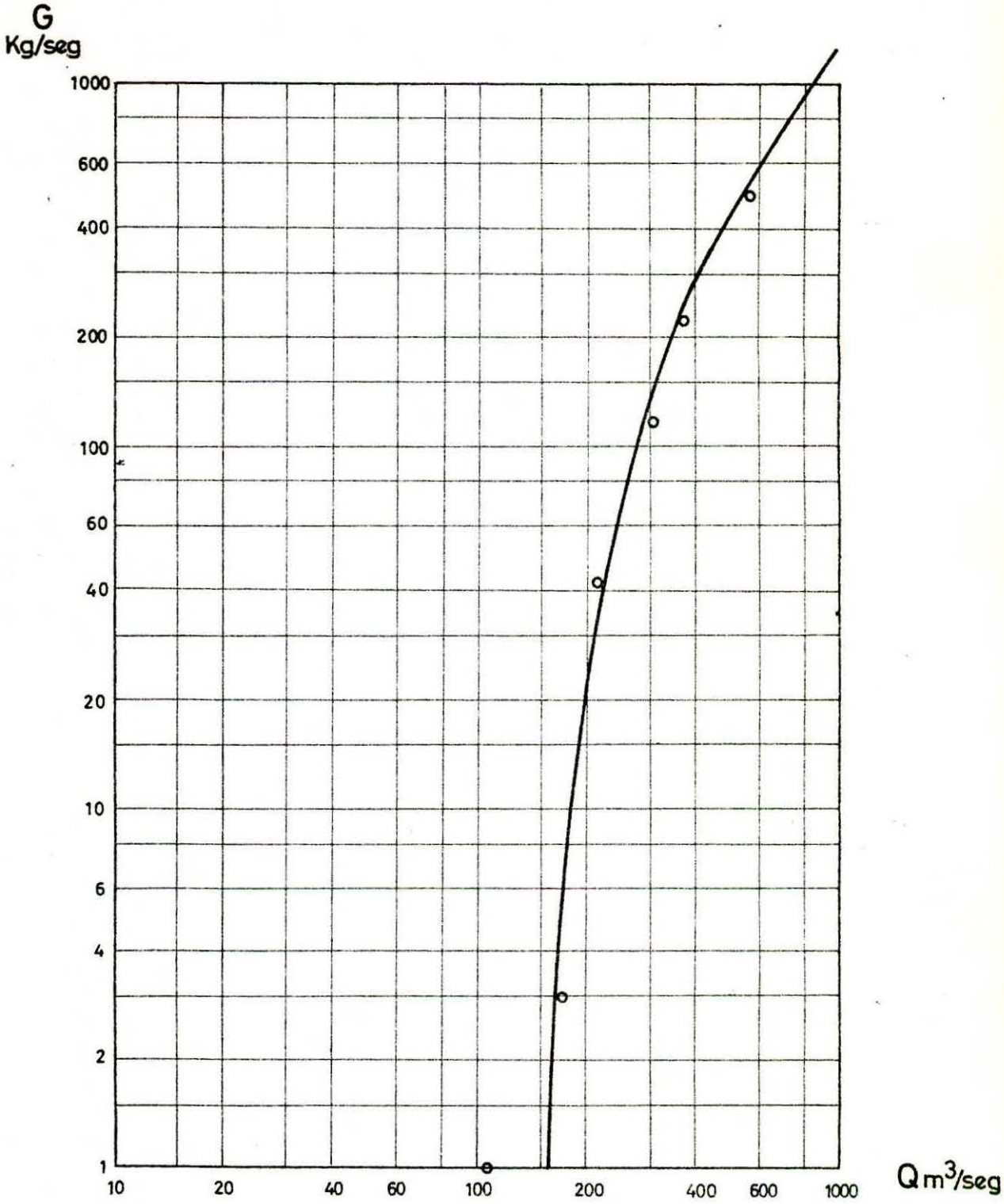
FIG. Nº14



CACHAPOAL EN PUENTE ARQUEADO

FORMULA DE SHIELDS

FIG. Nº15



TINGUIRIRICA EN LOS OLMOS

FORMULA DE SHIELDS

Si se utilizan los valores dados por : Maddock

$$\frac{\text{Arrastre por el fondo}}{\text{Arrastre en suspensión}} = 5 - 12\ \%$$

Es decir que el arrastre por el fondo podría variar entre 40 000 y 96 000 ton/año.

4.5 Estimación del porcentaje de arrastre por el fondo, mediante la determinación de "z".

4.5.1 Teoría. La distribución de la concentración del sedimento en un escurrimiento uniforme bi-dimensional queda dada por : (1)

$$\frac{c}{ca} = \left[\frac{d - y}{y} \cdot \frac{a}{d - a}\right]^{z}$$

siendo:

$$z = \frac{w}{K\sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}}} = \frac{w}{K\sqrt{ghS}}$$

siendo c : la concentración a la profundidad y desde el lecho.
ca : la concentración a un nivel de referencia y = a
w : la velocidad de sedimentación del material.
k : constante de Von Karman que tiene un valor de 0.4 en los fluídos claros
τ_o : esfuerzo de corte en el lecho
ρ : densidad del agua

En la figura N° 16 se indican varias distribuciones de $\frac{c}{ca}$ en función de la profundidad relativa $\frac{y - a}{d - a}$ y de los valores de z.

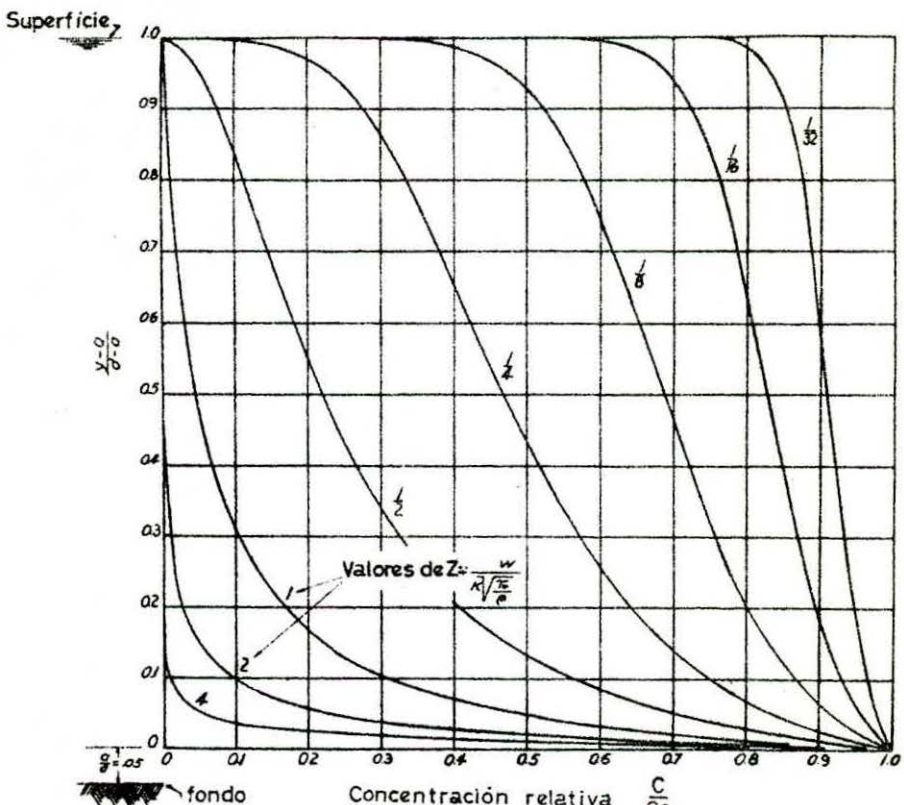
Puede notarse que los valores de z pequeños $z < \frac{1}{8}$, por ejemplo corresponde casi unicamente a arrastre en suspensión. En cambio para $z > 4$ se trata de arrastre exclusivo por el fondo.

De ahí que el conocimiento de z sea de interés para la determinación del arrastre por el fondo.

---

(1) Lecture Notes on Sediment Transportation and Channel Stability por V. Vanoni, N. Brooks y J. Kennedy.

FIG. Nº16



Concentración de $\frac{C}{Ca}$ en función de Z

4.5.2 Determinación de w. Se cuenta con datos granulométricos del arrastre en suspensión relativamente restringidos, ya que el tamizado solo considera las mallas 40, 100 y 200.

Para la determinación del tamaño medio de las partículas, que se requiere para calcular w, a los valores disponibles se les ha ajustado una recta en papel logarítmico de probabilidades.

La distribución media de los tamaños del sedimento en suspensión es la siguiente:

CUADRO XIII

Granulometría del material en suspensión.

Malla		mm	Cachapoal %	Tinguiririca
Retenido malla	40	0.42	0,2	0,4
" "	100	0.149	0,9	1,8
" "	200	0.074	2,7	3,6
Residuo			96,2	94,8

Estos datos se han llevado a las figuras 17 y 18., de las cuales se ha deducido el tamaño medio y la desviación Standard geométrica, que resulta ser (1) :

Cachapoal 0.0145 mm σg = 1,94
Tinguiririca 0.0155 mm σg = 2,14

Los valores de w valen; para una temperatura de 15°, utilizando el gráfico de la referencia (2).

Cachapoal : w = 0.017 cm/seg
Tinguiririca : w = 0.019 cm/seg

4.5.3 Cálculo de "z".

Cachapoal. Para Q = 546 m3/seg se tiene S = 0.0046, de acuerdo con lo que se indica más adelante, y h = 1,46 m.

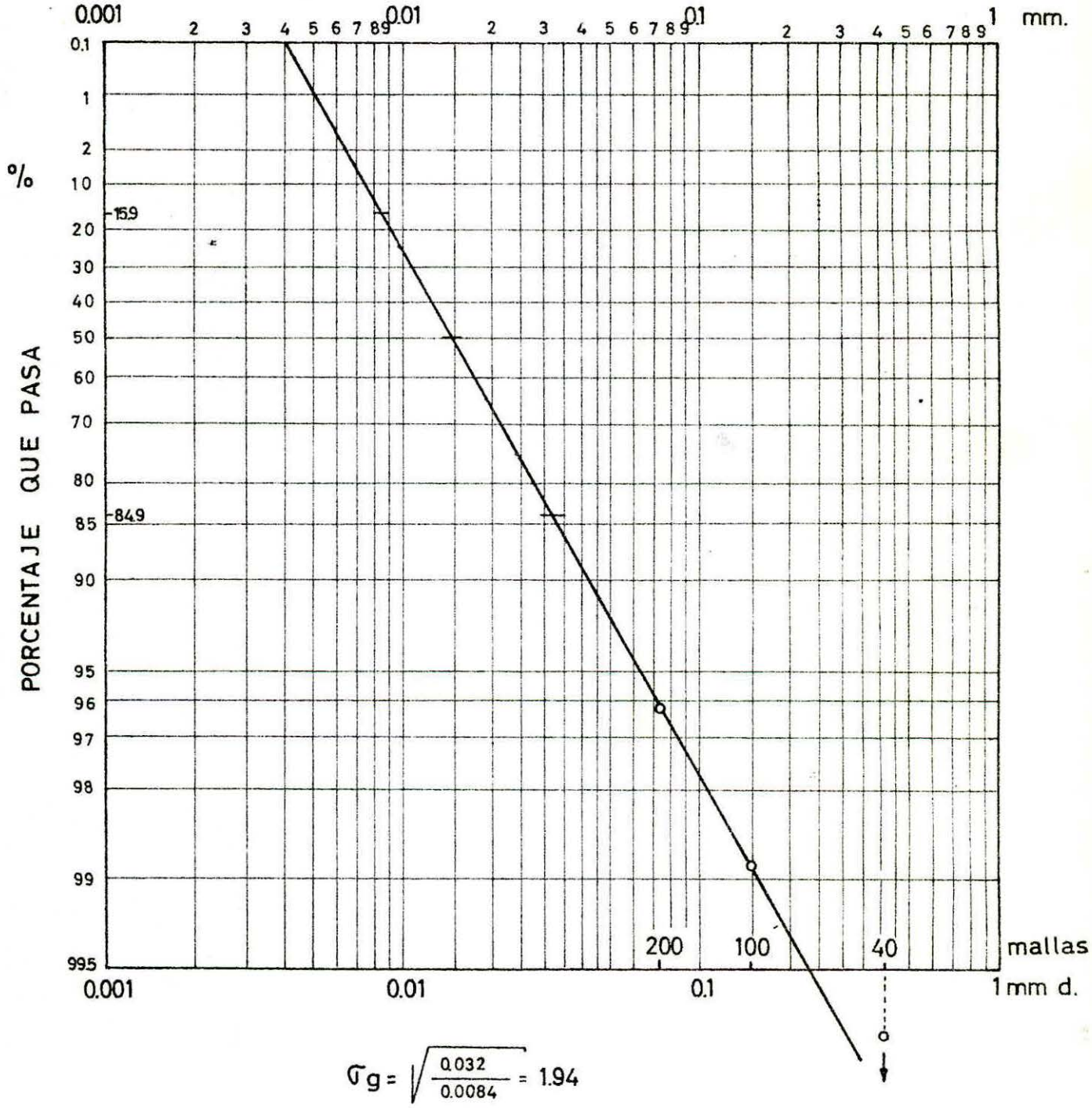
---

(1) Véase: A Study of Errors in Sieve Analysis of Fine Sand por Eduardo Basso S.

(2) Lecture notes on Sediment Transportation and Chanuel Stability por V. Vanoni, N. Brooks y J. Kennedy, pág.3-3

FIG. Nº17

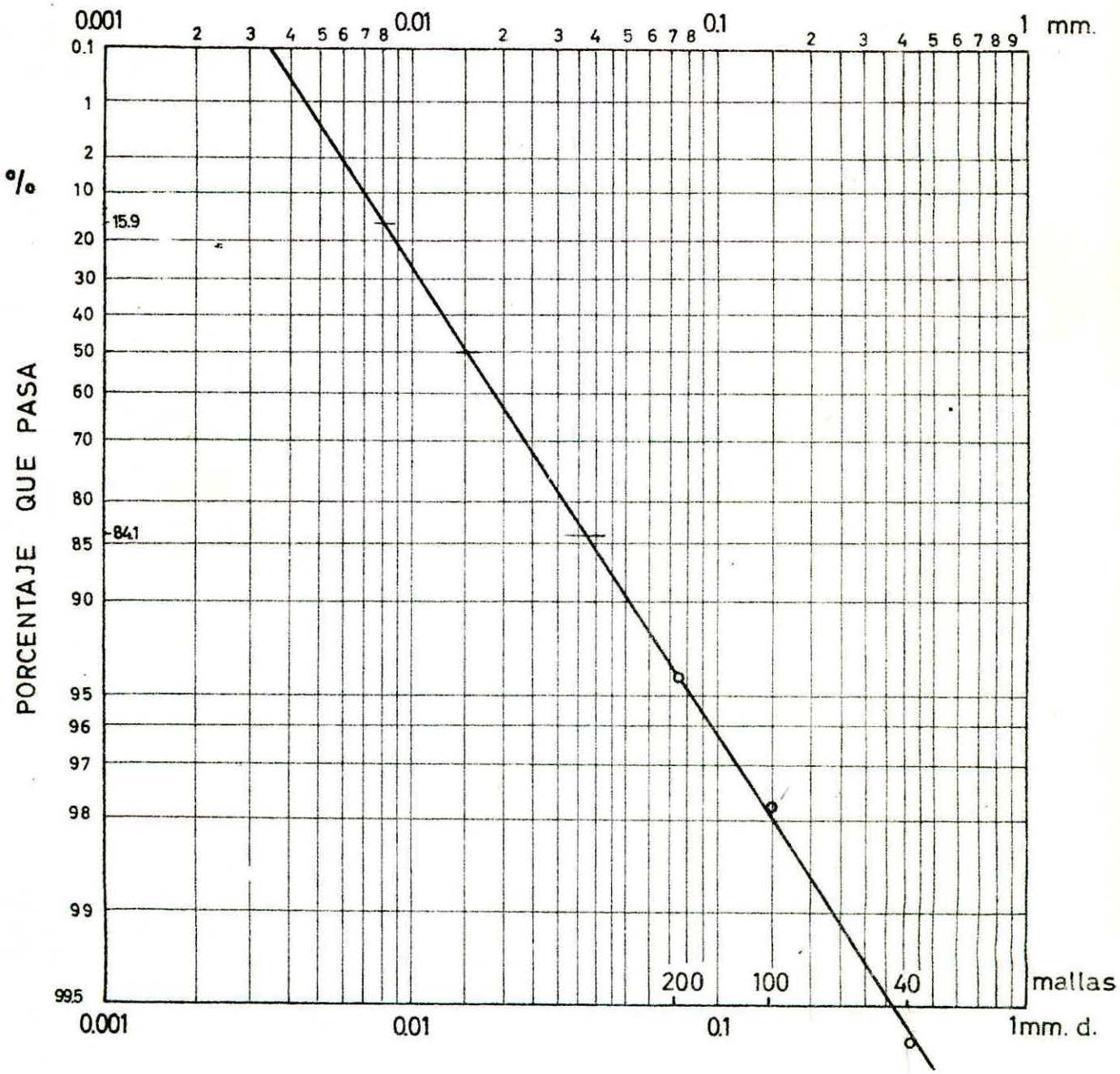
DISTRIBUCION DE TAMAÑOS
CACHAPOAL EN PUENTE ARQUEADO



$$\sigma_g = \sqrt{\frac{0.032}{0.0084}} = 1.94$$

FIG. N°18

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS
TINGUIRIRICA EN LOS OLMOS



$$\sigma g = \sqrt{\frac{0.038}{0.0082}} = 2.14$$

Se tomará K = 0.4

Luego:

$$z = \frac{w}{K \sqrt{g\ h\ s}} = \frac{0.017}{0.4\sqrt{980 \cdot 146\ 0.0046}} = 0.0016$$

Tinguiririca. Tomando Q = 186 m3/seg S = 0.0012 y h = 3.51 m

$$z = \frac{0.019}{0.4\sqrt{980 \cdot 351 \cdot 0.0012}} = 0.0023$$

Esto reforzaría la idea de que el arrastre por el fondo no debe ser de gran importancia en relación al arrastre en suspensión.

4.5 Resumen de resultados.

CUADRO XIV

Arrastre por el Fondo (G) (ton/año)

Fórmula o método	Cachapoal	Tinguiririca
Meyer - Peter	670 000	60 000
Einstein	370 000	40 000
Shields	750 000	85 000
Messines	240 000	80 000
Maddock (máx)	72 000	24 000
Valor adoptado	700 000	80 000

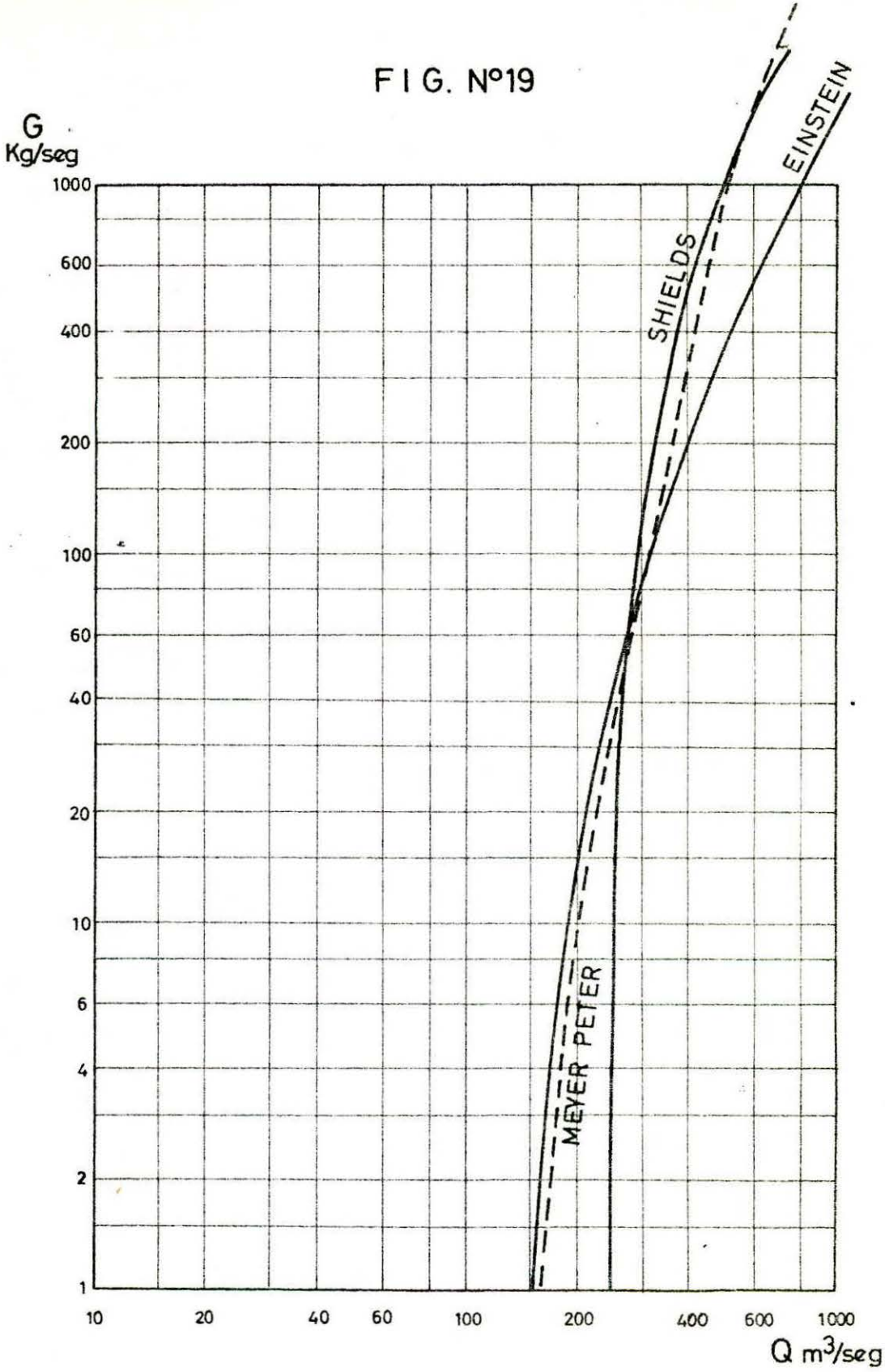
Ante la dispersión de los resultados se ha elegido valores elevados.

En las figuras N° 19 y 20 se han dibujado las relaciones G - Q para las distintas fórmulas.

Como la dispersión de estos valores pueden sorprender a alguien que no estuviera familiarizado con los problemas del arrastre por el fondo se ha estimado conveniente reproducir en la Fig. N° 21, los resultados de la experiencia del Profesor Vanoni al respecto. (1)

(1) Véase referencia dada en 4.5.1.

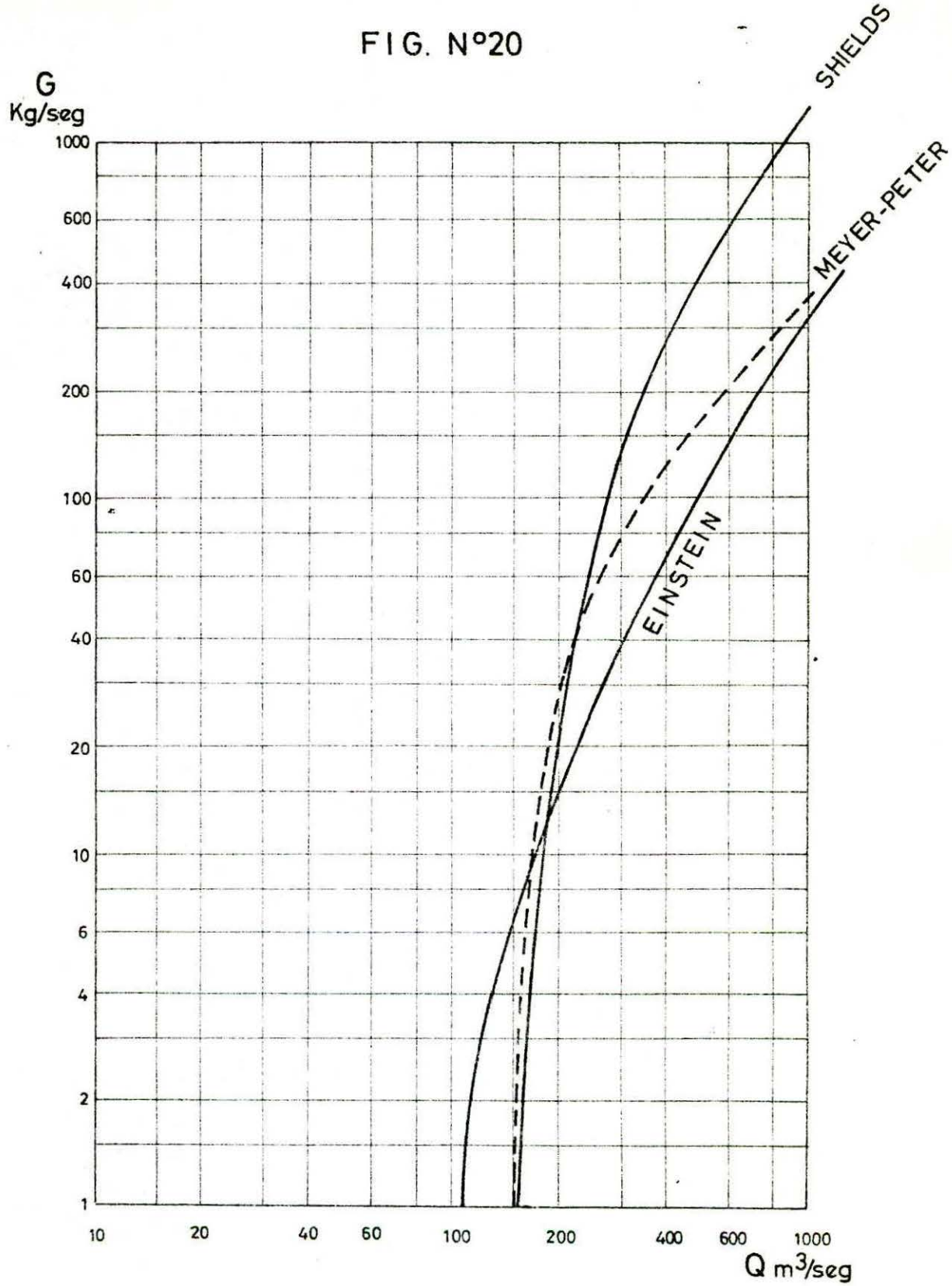
FIG. Nº19



CACHAPOAL EN PUENTE ARQUEADO

SUPERPOSICION DE LOS RESULTADOS
DE LAS TRES FORMULAS.

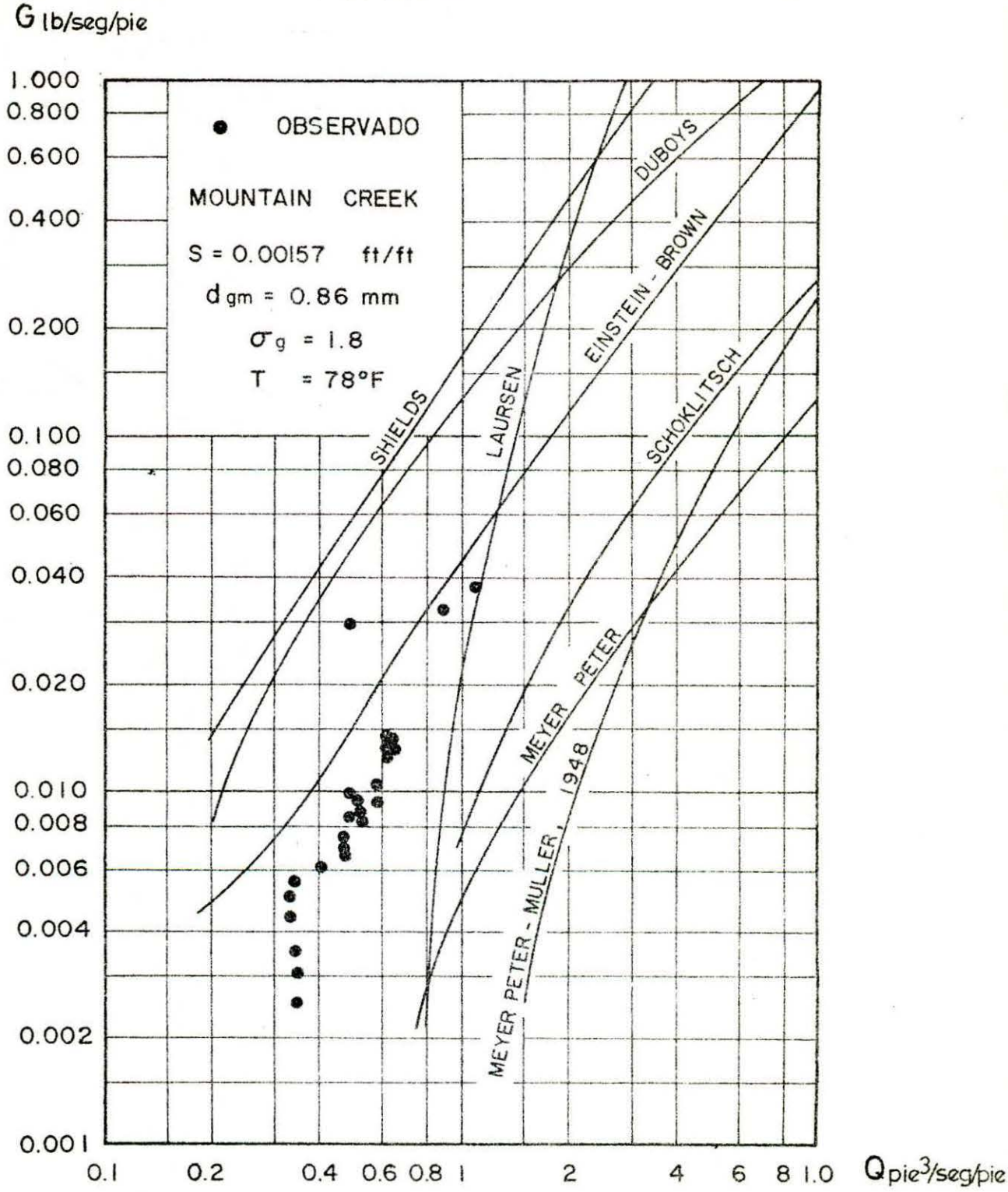
FIG. Nº20



TINGUIRIRICA EN LOS OLMOS

SUPERPOSICION DE LOS RESULTADOS
DE LAS TRES FORMULAS.

FIG. N°21



COMPARACION DE VARIAS FORMULAS
CON VALORES OBSERVADOS EN EE.UU.

5. Tiempo de llenado del embalse.

5.1 Determinación de la densidad del sedimento en el embalse.

5.1.1 Material en suspensión. Para esta determinación se ha aplicado la fórmula modificada propuesta por el Bureau of Reclamation y otras Instituciones en el Report N° 9 (1), que se expresa de la siguiente manera:

$$W_o = W_1 + 0{,}4343\ K\left[\frac{T}{T-1} \cdot (\log_e T) - 1\right]$$

donde

W_1 = peso unitario del material después de un año de decantado
K = constante de consolidación
W_1 y K son parámetros dependientes del tipo de sedimento y de la regulación del embalse.
T = período después del cual se desea conocer la densidad del sedimento.

El detalle de los cálculos se indica en el Anexo N° 2, llegándose a los siguientes valores

CUADRO XV

Densidad del material en suspensión T/m3

Después de años decantación	Cachapoal	Tinguiririca
300	1.26	1.27
400	1.27	1.28
500	1.28	1.29
600	1.29	1.29
700	1.30	1.30
800	1.31	1.31
900	1.31	1.31

(1) Publicado por St. Paul District Sub-Office, Corps of Engineers Hydraulic Laboratory, University of Iowa Iowa City, Iowa.

5.1.2 Material de fondo. Para este caso se considera la siguiente tabla también propuesta por los organismos anteriores:

a) bolones grava y arena - 2,34 t/m3
b) grava gruesa y arena - 2,20 t/m3
c) grava media y arena - 2,10 t/m3
d) grava fina y arena - 1,91 t/m3

Nuestra granulometría corresponde a la clasificación b.

5.2 Tiempo de llenado. Los valores adoptados para el arrastre son:

Suspensión :	Cachapoal	600 000	t/año
	Tinguiririca	200 000	t/año
	total	800 000	t/año
Fondo :	Cachapoal	700 000	t/año
	Tinguiririca	85 000	t/año
	total	785 000	t/año

Para un primer tanteo se considera un tiempo de llenado de 700 años.

Se tiene así, suponiendo que todo el material se decante en el embalse, suposición altamente pesimista. (1)

Material	Densidad	Peso Ton.	Vol. m3
Susp. del Cachapoal	1.30	600 000	465 000
" " Tinguiririca	1.30	200 000	155 000
Arrastrado por el Fondo	2.20	785 000	355 000
		total	975 000

Si el volumen del embalse se toma igual a $690 \cdot 10^6$ m3, se llegaría a un tiempo de llenado de 710 años.

En general la vida util es la necesaria para sedimentar el 50 % de la capacidad. Esta sería por lo tanto del orden de los 350 años, sobrepasando en mucho al plazo de previsión de las obras.

(1) Se estima que un gran porcentaje del material en suspensión se depositará en los deltas de entrada y que una parte del material en suspensión saldrá con el efluente.

6. Curvas de descarga del gasto sólido. Los coeficientes de las curvas

$$QS = A\ Q^n$$

resultan ser :

Cachapoal : $n = 1.72$ $(G = 0.7\ Q^{1.72})$

Tinguiririca : $n = 1.48$ $(G = 1.3\ Q^{1.48})$

Estos valores caen dentro del rango de variación de las otras curvas estudiadas, y que se indican en el cuadro XVI.

CUADRO XVI

Curvas de descarga del gasto sólido recopiladas en la literatura.

Nº	Río	Estación	Curva	% puntos bajo 100% error	Período muestreo
1	Black	Lorain	$1.63 \times 10^{-8}\ Q^{1.78}$	69	2-3 años
2	Cuyahonga	Cleveland	$3.90 \times 10^{-11}\ Q^{2.45}$	61	"
3	Grand	Fairport	$2.55 \times 10^{-12}\ Q^{2.77}$	84	"
4	Red	Denison	$9.5 \times 10^{-9}\ Q^{2.04}$	90	
5	Red	Gainesville	$1.04 \times 10^{-8}\ Q^{2}$	-	1936-37
			$3.85 \times 10^{-8}\ Q^{2}$	-	1938-39
6	Washita	Durwood	$9.2 \times 10^{-8}\ Q^{2}$	-	1936-37

Nº	Río	Estación	Curva	% puntos bajo 100% error	Período muestreo
7	Durance	Archidiacre	$6.4 \times 10^{-17}\ Q^{3.6}$	50	3 años
8	Durance	Mirabeau	$5.2 \times 10^{-12}\ Q^{2.5}$	"	"
9	Missouri	Kansas	$3.04 \times 10^{-10}\ Q^{2.15}$	96	2 meses
10	Cachapoal	Puente Arqueado	$1.82 \times 10^{-8}\ Q^{1.72}$	63%	1 ½ años
11	Tinguiririca	Los Olmos	$7.7 \times 10^{-8}\ Q^{1.48}$	70% (x)	1 ½ "
12	Tisza	Zahori	$1.04 \times 10^{-7}\ h^{2.54}$ (☆)		
13	Tisza	Razompzta	$2.0 \times 10^{-8}\ h^{3.79}$ (☆)		
14	Powder	Arvada	$2.6 \times 10^{-6}\ Q^{1.82}$		
15	Colorado	Yuma	$A\ Q^{1.86}$ (☆ ☆)		
16	San Juan	Bluff	$1.08 \times 10^{-9}\ Q^{1.88}$		1 crecida
17	Cheyene	Hot Springs	$9.2 \times 10^{-6}\ Q^{1.92}$		Valores medios
18	Middle Loup	St. Paul	$6.2 \times 10^{-11}\ Q^{2.61}$		"
19	Rio Grande	San Acacia	$2.3 \times 10^{-5}\ Q^{1.55}$		"
20	Rio Grande	San Felipe	$1.02 \times 10^{-7}\ Q^{1.83}$		"
21	Moreau		$3.9 \times 10^{-6}\ Q^{1.46}$		"
22	White	Oglala	$3.8 \times 10^{-6}\ Q^{1.20}$		"
23	Belle Fouche	Moorcroft	$2.7 \times 10^{-7}\ Q^{2.03}$		"
24	Virgin	Virgin	$8.2 \times 10^{-7}\ Q^{2.23}$ (☆ ☆ ☆)		"
25	Río Puerco	Río Puerco	$2.9 \times 10^{-5}\ Q^{1.39}$		"

Notas: Todas las curvas excepto las marcadas con ☆ son en las siguientes unidades: G : tons/sec Q : pie3/seg.

☆ G en tons/seg h en metros
☆☆ Solo existe el dato del exponente
☆☆☆ Curva mal definida
(x) Solo para Q> 10 m3/sec

Nº	Río	Estación	Curva	Período muestreo
25	Río Puerco	Río Puerco	$2.9 \times 10^{-5}\ Q^{1.39}$	Valores medios
26	Río Grande	Bernalillo	$7.6 \times 10^{-7}\ Q^{1.60}$	"
27	Smoky Hill	Ellwordth	$3.9 \times 10^{-6}\ Q^{1.52}$	"
28	Republican	Bloomington	$3.4 \times 10^{-7}\ Q^{1.88}$	"
29	Bighom	Kane	$1.50 \times 10^{-8}\ Q^{2.08}$	"
30	Bighom	Manderson	$1.03 \times 10^{-8}\ Q^{2.93}$	"
31	Grand	Stadehill	$7.8 \times 10^{-7}\ Q^{1.15}$	"

Se ha podido encontrar una relación entre los coeficientes A y n que se indica en la figura Nº 22 y en la cual los puntos correspondientes a este caso guardan la relación general.

7. Comparación con medidas en la zona cordillerana. Se cuenta con datos de arrastre en suspensión en los siguientes ríos:

	ton/ año en suspensión	Hoya Km2	Rendimiento ton/año/km2
Cachapoal en Coya	720 000	2 066	350
Maule en Los Baños	880 000	1 248	700

Para el río Tinguiririca se aceptará también un valor de 350 ton/año/km2 para el rendimiento de material sólido de la hoya.

El arrastre por el fondo se ha supuesto que guarda la misma relación con el gasto en suspensión en las tres secciones en estudio. El material sólido que el río lleva en la hoya alta debería ser inferior al que lleva en la hoya baja, ya que a la contribución de la primera debe agregarse el gasto sólido producido por las lluvias sobre el valle central.

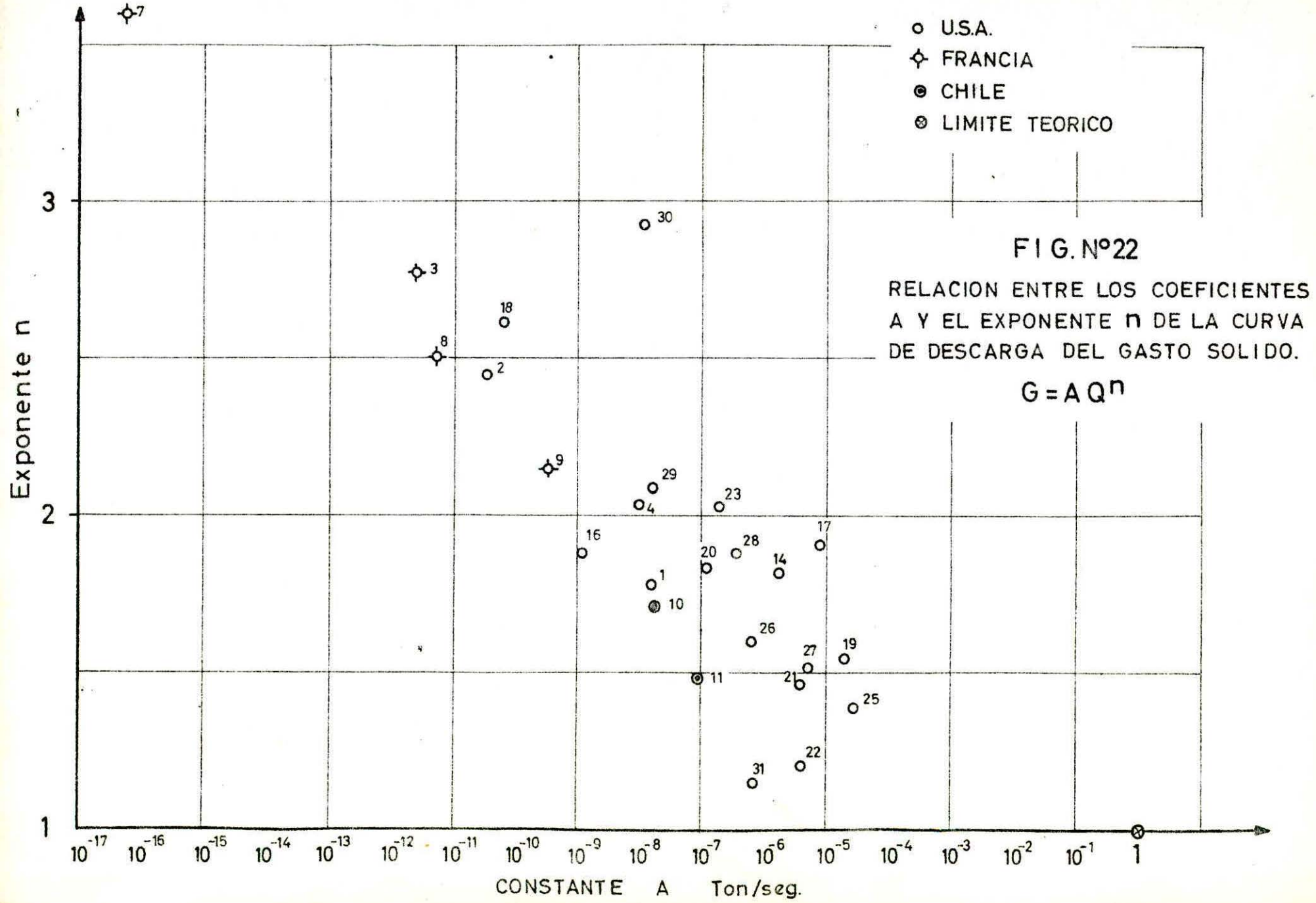


FIG. Nº22

RELACION ENTRE LOS COEFICIENTES A Y EL EXPONENTE n DE LA CURVA DE DESCARGA DEL GASTO SOLIDO.

$G = A Q^n$

Pero esto no es así, ya que en la hoya alta el arrastre es:

Cachapoal	Suspensión	: 720 000 ton/año
	Fondo	: 840 000
Tinguiririca	Suspensión	: 450 000 ton/año
	Fondo	: 190 000
	Total	2 200 000 ton/año

y en la hoya baja (Rapel)

Suspensión	: 800 000
Fondo	: 785 000
	1 585 000

Analicemos el balance hidrológico del sistema. Esta se representa esquematicamente como sigue :

	m3/seg	
	Cachapoal	Tinguiririca
Caudal a la entrada al Valle Central	72	50
Demanda media de riego (1)	42	36
Saldo	30	14
Aporte por lluvia en un año medio	57	33
Total a la entrada del embalse	87	47

(1) Inventario de los Recursos Hidrlógicos superficiales de Chile. Dirección de Planeamiento, Ministerio de Obras Públicas.

Se puede proceder en forma análoga para el arrastre sólido:

	miles ton/año en suspensión	
	Cachapoal	Tinguiririca
Caudal sólido a la entrada del Valle Central	720	450
Caudal sólido tomado por canales de riego	420	320
Saldo	300	130
Aporte por lluvia en un año medio	300	70
Total a la entrada del embalse	600	200

Además deberían depositarse en el Valle Central la diferencia entre el arrastre por el fondo en ambos puntos de control. Las 430 000 ton/año que se depositan en los terrenos de cultivo, representan considerando una densidad de 1.30, una capa del orden de 0,1 mm sobre las 260 000 hectáreas que se han considerado bajo riego. Como este valor es lógico se estima que hay concordancia entre las diferentes medidas.

7. Programa para el futuro.

7.1 Tamizado del sedimento en suspensión. No ha sido posible efectuar grandes progresos al respecto debido a que aún no se cuenta con el equipo de laboratorio adecuado. Este se encuentra ordenado y se espera recibirlo en dos o tres meses más. Entonces se procederá a un análisis hidrométrico del sedimento, el que se estima indispensable.

7.2 Temperatura. La temperatura es un factor de importancia en relación al gasto sólido, razón por la cual se está midiendo en todas las secciones de control del gasto sólido. Sin embargo aún no se cuenta con datos suficientes para un análisis de alguna seriedad.

7.3 Medida de los depósitos. Esto se considera fundamental, por lo que se estudia en el momento el detalle de los levantamientos topográgicos previos al llenado del embalse.

8. Conclusiones. El gasto sólido total afluente al Embalse Rapel se estima en 1.500.000 toneladas al año para un año medio.

De éstas, 800.000 ton/año, corresponden a material en suspensión y 780.000 ton/año a material arrastrado por el fondo.

De acuerdo con estos valores la vida útil del embalse (tiempo para llenar el 50% de su capacidad) sería del orden de 350 años.

A N E X O N°1

SEDIMENTACION EN EL EMBALSE DE LA C E N T R A L R A P E L

CUADRO VII

CALCULO DEL ARRASTRE POR EL FONDO

Sección : Cachapoal en Puente Arqueado
Fórmula : Meyer - Peter
d_{50} : 40 mm

$n = 0.04$
$\tau_o = 3.102$

Aforo	Q m3/seg	F m^2	Vm m/s	t m	b m	R m	C	C^2R	Vm^2	1000 J	τ Kg/m^2	$\tau - \tau_o$ Kg/m^2	gs Kg/s/m	Gs Kg/s
29	156.75	108.25	1.45	1.19	91.0	1.19	25.8	790	2.10	2.66	3.16	0.06	0.0106	1.0
33	172.5	122.5	1.41	1.32	92.8	1.32	26.1	900	1.99	2.21	2.92	0.00		
30	205.25	132.5	1.55	1.44	92.0	1.44	26.5	1.010	2.40	2.38	3.43	0.33	0.15	14
16	210	144	1.46	1.53	94.0	1.53	26.7	1 090	2.13	1.95	2.98	0.00		
28	241.25	147.25	1.64	1.59	92.4	1.59	27.0	1 160	2.69	2.32	3.69	0.59	0.36	33
32	400	193	2.07	1.75	110	1.75	27.3	1 300	4.28	3.29	5.76	2.66	3.4	374
26	546.5	251	2.18	1.46	172	1.46	26.6	1 030	4.75	4.61	6.73	3.63	5.45	940

CACHAPOAL EN PUENTE ARQUEADO

FORMULA DE MEYER-PETER

Q m3/seg	p	Q m3/seg	$\bar{p}$	n días	n miles seg.	G kg/seg	G ton	$\sum$ G ton/año
150	0.14							
200	0.08	175	0.06	21.8	1 880	2,1	4 000	
300	0.03	250	0.05	18.2	1 570	25	39 400	
400	0.015	350	0.015	5.5	475	150	71 200	
600	0.004	500	0.011	4.0	345	800	276 000	
800	0.0015	700	0.0025	0.9	77,9	2 200	171 800	
1 000	0.0006	900	0.0009	0.33	28,5	3 800	108 000	670 400

CUADRO VIII

CALCULO DEL ARRASTRE POR EL FONDO

Sección : Tinguiririca en Los Olmos
Fórmula : Meyer - Peter
d_{50} : 28 mm

$n = 0.04$
$\tau_o = 2.18$

Aforo	Q m3/seg	F m^2	V_m m/seg	t m	b m	R m	C	C^2R	V_m^2	1 000 J	τ Kg/m^2	$\tau - \tau_o$ Kg/m^2	gs Kg/s/m	Gs Kg.seg
18	174	113	1,54	2,45	46,2	2,45	29	2 060	2,37	1,15	2,82	0,64	0,405	19
15	178.8	133,6	1,34	2,84	47	2,84	29.5	2 470	1,80	0,73	2,07	-	-	-
27	214.4	128,8	1,66	2,66	48,4	2,66	29,3	2 280	2,76	1,21	3,22	1,04	0,84	40
31	314	168	1,87	3,29	51	3,29	30,5	3 060	3,50	1,14	3,75	1,57	1,55	79
16	373	186,5	2,00	3,51	53,2	3,51	30,8	3 340	4,00	1,20	4,21	2,03	2,28	121
9	593	265	2,24	5,06	52,3	4,15	32	4 250	5,02	1,18	4,90	2,72	3,56	187

TINGUIRIRICA EN LOS OLMOS

FORMULA DE MEYER - PETER

Q m3/seg	p	$\bar{Q}$ m3/seg	$\bar{p}$	n días	n miles de seg.	G Kg/seg	G ton	$\sum G$ ton/año
100	0,10							
150	0,04	125	0,06	21,9	1 892			
200	0,02	175	0,02	7,3	631	14	8 834	
300	0,0052	250	0,0148	5,4	467	52	24 284	
400	0,0025	350	0,0027	1,0	86,4	100	8 640	
600	0,0010	500	0,0015	0,5	43,2	170	7 344	
800	0,0002	700	0,0008	0,29	25,0	250	6 250	
1 000	0,00006	900	0,00014	0,05	4,3	340	1 462	56 814

$\approx$ 60 000

CUADRO IX

CALCULO DEL ARRASTRE POR EL FONDO

Sección : Cachapoal en Puente Arqueado
Fórmula : Einstein n = 0,04
d_{50} : 40 mm

Aforo	Q m3/seg	R m	1 000 S	$\frac{1}{\psi}$	ϕ	g_s Kg/seg/m	b m	G_s Kg/m
20	104	1,0	2,05	0,031				
29	156,75	1,19	2,66	0,048	0,00074	0,05	91,0	5
33	172,5	1,32	2,29	0,044	0,00025	0,017	92,8	2
30	205,25	1,44	2,38	0,052	0,0017	0,116	92,0	11
16	210	1,53	1,95	0,045	0,0003	0,0205	94,0	2
28	241,25	1,59	2,32	0,056	0,003	0,205	92,4	19
32	400	1,75	3,29	0,087	0,027	1,85	110	204
26	546,5	1,46	4,61	0,102	0,041	2,80	172	480

Cachapoal en Puente Arqueado

Fórmula de Einstein

Q	p	$\overline{Q}$	$\overline{p}$	n días	n miles seg	G Kg/seg	G ton	$\sum$G ton/año
		75			9 320			
		125			3 760			
		175			1 880	5	9 000	
		250			1 570	40	63 000	
		350			475	140	67 000	
		500			345	380	132 000	
		700			77.9	800	62 000	
		900			28.5	1 400	40 000	373 000

CUADRO X

CALCULO DEL ARRASTRE POR EL FONDO

Sección : Tinguiririca en Los Olmos
Fórmula : Einstein
d_{50} : 28 mm

n = 0,04

Aforo	Q m3/seg	R m	1 000 S	$\frac{1}{\psi}$	ϕ	gs Kg/seg/m	b m	G_s Kg/seg
29	105,4							0
18	174	2,45	1,15	0.0610	0.0055	0,219	46,2	10
27	214.4	2,66	1,21	0.0695	0.0115	0,457	48,4	22
31	314	3,29	1,14	0.0814	0.0210	0,835	51	43
16	373	3,51	1,20	0.0914	0.030	1,19	53,2	63
9	593	4,15	1,18	0.1060	0.045	1,79	52,3	94

Tinguiririca en Los Olmos

Fórmula de Einstein

Q m3/seg	p	$\bar{Q}$ m3/seg	$\bar{p}$	n días	n miles seg	G Kg/seg	G ton	$\sum$G ton/día
		75						
		125			1 892	3	5 676	
		175			631	10	6 310	
		250			467	25	11 675	
		350			86,4	50	4 320	
		500			43,2	100	4 320	
		700			25,0	190	4 750	
		900			4,3	270	1 161	38 212

≈ 40 000

CUADRO XI

CALCULO DEL ARRASTRE POR EL FONDO

Sección : Cachapoal en Puente Arqueado
Fórmula : Shields
d_{50} : 40 mm

n = 0,04

Aforo	Q m3/seg	R m	1 000 S	$\frac{\tau_o}{\gamma (S_s-1) d_s}$	τ_o Kg/m2	τ Kg/m2	$\tau-\tau_o$ Kg/m2	q m3/seg/m	gs Kg/seg/m	b m	Gs Kg/seg
20	104,4	1,00	2,05	0,06	3,96						
29	156,75	1,19	2,66	0,06	3,96	3,16				91,0	
18	171,75	1,16	3,37	0,06	3,96	3,91				92,8	
33	172,5	1,32	2,21	0,06	3,96	2,92				92,8	
30	205,25	1,44	2,38	0,06	3,96	3,43				92,0	
16	210	1,53	1,55	0,06	3,96	2,98				94,0	
28	241,25	1,59	2,32	0,06	3,96	3,69				92,4	0
32	400	1,75	3,29	0,06	3,96	5,76	1,80	3,63	5,25	110	580
26	546,5	1,46	4,61	0,06	3,96	6,73	2,77	3,18	9,90	172	1 700

Cachapoal en Puente Arqueado

Fórmula de Shields

Q	p	$\overline{Q}$	$\overline{p}$	n días	n miles seg	G Kg/seg	G ton	$\sum$ G ton/año
		175			1 880			
		250			1 570			
		350			475	320	152 000	
		500			345	1 050	363 000	
		700			77.9	2 050	160 000	
		900			28.5	2 800	79 000	754 000

CUADRO XII

CALCULO DEL ARRASTRE POR EL FONDO

Sección : Tinguiririca en Los Olmos
Fórmula : Shields
d_{50} : 28 mm

n = 0,04

Aforo	Q m3/seg	R m	1 000 S	$\frac{\tau_o}{\gamma(S_s-1)d_s}$	τ_o Kg/m2	τ Kg/m2	$\tau-\tau_o$ Kg/m2	q m3/seg/m	gs Kg/seg/m	b m	G_s Kg/seg
29	105,4	2,13	0,84	0,06	2,77	1,79				41,6	
18	174	2,45	1,15	0,06	2,77	2,82	0,05	3,77	0,075	46,2	3
15	178,8	2,84	0,73	0,06	2,77	2,07				47,0	
27	214,4	2,66	1,21	0,06	2,77	3,22	0,45	4,43	0,84	48,4	41
31	314	3,29	1,14	0,06	2,77	3,75	0,98	6,16	2,39	51,0	122
16	373	3,51	1,20	0,06	2,77	4,21	1,44	7,00	4,2	53,2	223
9	593	4,15	1,18	0,06	2,77	4,90	2,13	11,30	9,85	52,3	515

Tinguiririca en Los Olmos

Fórmula de Shields

Q	p	$\overline{Q}$ m3/seg	$\overline{p}$	n días	n miles seg	G Kg/seg	G ton	Σ G ton/año
		75						
		125			1 892			
		175			631			
		250			467	60	28 020	
		350			86,4	200	17 280	
		500			43,2	400	17 280	
		700			25,0	700	17 500	
		900			4,3	1050	4 515	84 595

$\approx$ 85 000

ANEXO Nº 2

SEDIMENTACION EN EL EMBALSE DE LA CENTRAL RAPEL

DENSIDAD DE LOS DEPOSITOS PROVENIENTES DEL ARRASTRE EN SUSPENSION.

La densidad de los depósitos está dada por

$$W_o = W_1 + k \left[\frac{T}{T-1} \ln T - 1 \right]$$

donde $k = 0{,}4343\ K$
$K =$ constante de consolidación
$W_1 =$ densidad del material después de un año de decantación.

De las tablas 7 y 10 del Report 9 extraemos los valores de W_1 y K.
Los valores que se indican de W_1 son aplicables cuando los depósitos están constituídos predominantemente de limos y arcillas.

	Arcilla	Limo	Arena
W_1 (lb/pie^3)	13	67	88
K	16	5,7	0

Para depósitos de granulometría variada la densidad del material después de un año de decantación (W_1) y la constante de consolidación (K) son función de los porcentajes de arena, limo y arcilla.

Composición granulométrica del material en suspensión			
Río	Arcilla %	Limo %	Arena %
Cachapoal	0,1	94,9	5
Tinguiririca	0,3	92	7,7

Así obtenemos los siguientes valores:

Cachapoal

$$W_1 = 0{,}001 \times 13 + 0{,}949 \times 67 + 0{,}05 \times 88 = 67{,}9 \ \text{lb/pie}^3$$

$$K = 0{,}001 \times 16 + 0{,}949 \times 5{,}7 = 5{,}42$$

Tinguiririca

$$W_1 = 0{,}003 \times 13 + 0{,}92 \times 67 + 0{,}077 \times 88 = 68{,}44 \text{ lb/pie}^3$$

$$K = 0{,}003 \times 16 + 0{,}92 \times 5{,}7 = 5{,}3$$

Se procede luego al cálculo de la densidad de los depósitos después de cierto número de años.

Cachapoal

Período de decantación T (años)	W_1	K	$0{,}4343\left[\frac{T}{T-1} \ln T-1\right]$	Wo lb/pie^3	Wo t/m3
300	67,9	5,42	2,15	79,5	1,27
400	67,9	5,42	2,16	79,6	1,27
500	67,9	5,42	2,26	80,1	1,28
600	67,9	5,42	2,34	80,6	1,29
700	67,9	5,42	2,41	81,0	1,30
800	67,9	5,42	2,47	81,0	1,31
900	67,9	5,42	2,52	81,6	1,31

Tinguiririca

Período de decantación T (años)	W_1	K	$0{,}4343\left[\frac{T}{T-1} \ln T-1\right]$	Wo lb/pie^3	Wo t/m3
300	68,44	5,3	2,15	79,7	1,27
400	68,44	5,3	2,16	79,8	1,28
500	68,44	5,3	2,26	80,4	1,29
600	68,44	5,3	2,34	80,8	1,29
700	68,44	5,3	2,41	81,2	1,30
800	68,44	5,3	2,47	81,6	1,31
900	68,44	5,3	2,52	81,8	1,31