SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

VI CONGRESO NACIONAL

ESTIMACION DEL GASTO SOLIDO AFLUENTE Y DEL EMBANQUE PRODUCIDO EN EL EMBALSE DE LA CENTRAL RAPEL DURANTE EL PERIODO DE 11 AÑOS 01/04/68-31/03/79

* Andrés Benítez Girón

R E S U M E N

Este trabajo es un resumen del estudio realizado para analizar y estimar el embanque que se ha producido en el embalse de la central Rapel, después de 11 años de operación, que comprende el período 01/05/68 - 31/03/79.

Consta de los siguientes puntos :

- Estimación del gasto sólido en suspensión y del arrastre por el fondo afluente al embalse, utilizando las estadísticas sedimentométricas y antecedentes recopilados en este período. Comparación de estos resultados con los obtenidos en el estudio de 1962, realizado para el proyecto de la central Rapel.
- Estimación del volumen de sedimentos depositados en la cola del embalse, utilizando perfiles topográficos y batimétricos realizados con este fín. Comparación de los resultados con los del punto anterior y con la distribución teórica obtenida aplicando el método de Lara.
- Conclusiones y recomendaciones basadas en los resultados obtenidos.

* Jefe División Estudios Hidrológicos. ENDESA

1. INTRODUCCION. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Como es sabido, uno de los problemas de la Ingeniería Hidráulica que todavía no han sido resueltos satisfactoriamente, es el concerniente al arrastre de sólidos, sean sólidos en suspensión o arrastre de fondo, producidos por los rios, esteros, quebradas, etc.

En primer lugar depende de la metodología que se utilice el resultado que se obtenga, obteniéndose resultados que fácilmente pueden variar de 1 a 10, especialmente al estudiar el arrastre de fondo.

En segundo lugar, la mayor parte de los rios que se han estudiado en este aspecto, pertenecen a ríos de características muy diferentes a la de los ríos chilenos.

Las primeras medidas de gasto sólido en suspensión y arrastre por el fondo que se ejecutaron en Chile, se comenzaron a mediados del año 1957 con motivo del proyecto de la central Rapel.

El primer estudio que se efectuó para estimar la sedimentación del futuro embalse de la central Rapel, se realizó en Agosto de 1959 con apenas 1 año y medio de antecedentes y el segundo en el año 1962, el cual fué revisado por el Dr. Vito Vanoni. Sin embargo siempre permanecía la duda de si las estimaciones realizadas eran representativas de la realidad.

Como uno de los métodos más exactos para determinar el transporte de sólidos por un rio, es medir la sedimentación que se ha producido en un determinado tiempo y en un lugar cerrado, en este caso un embalse, se decidió estimar el embanque que se había producido en el embalse de central Rapel durante un período de 10 años que hubo que alargar a 11 años por problemas en la operación del embalse, o sea el estudio abarcará el período 01/04/68-31/03/79.

De esta forma se podrían cumplir los siguientes objetivos :

1° Determinar el sólido que ha entrado al embalse en 11 años y compararlo con las predicciones realizadas en el año 1962, con muy pocos antecedentes.

2° Estimar el volumen de sólido sedimentado en el embalse y especialmente la pérdida de volumen de regulación.

3° Verificar si se cumple el método de Lara para estimar la distribución del sedimento en un embalse.

4° Obtener conclusiones de los resultados obtenidos para mejorar los estudios futuros.

Finalmente se debe tener en cuenta que este trabajo es un resumen de un estudio muy extenso y que ha sido terminado recientemente, del cual se ha extraído aquello que se ha considerado más importante.

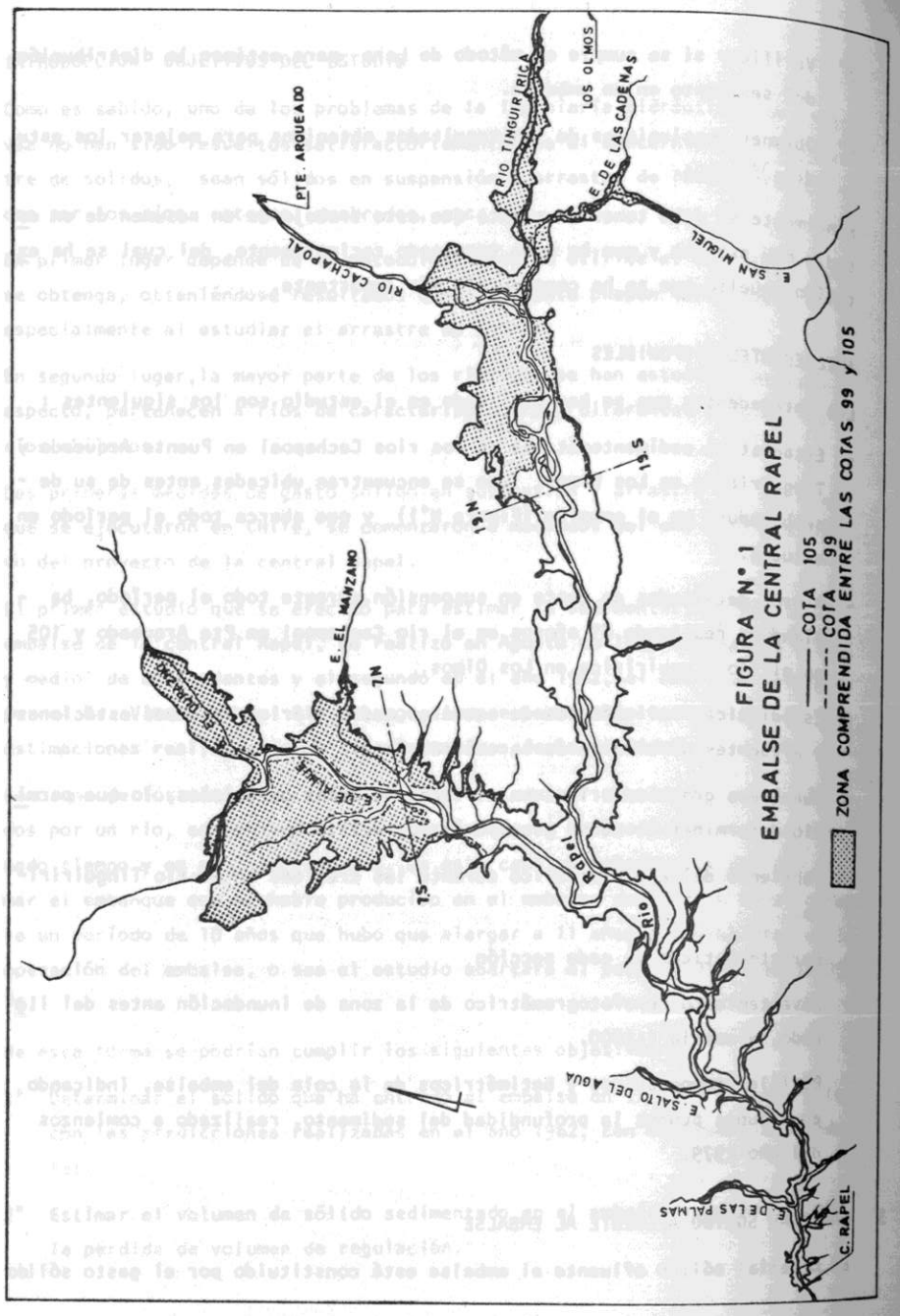
2. ANTECEDENTES DISPONIBLES

Los antecedentes que se han utilizado en el estudio son los siguientes :

- Estadística sedimentométrica en los rios Cachapoal en Puente Arqueado y Tinguiririca en Los Olmos, que se encuentran ubicadas antes de su desembocadura en el embalse (Figura N°1) y que abarca todo el período en estudio.
- Aforos detallados de gasto en suspensión durante todo el período, habiéndose realizado 83 aforos en el rio Cachapoal en Pte Arqueado y 105 en el rio Tinguiririca en Los Olmos.
- Estadística fluviométrica de caudales medio diarios en ambas estaciones y afluentes al embalse de la central Rapel.
- Muestreos granulométricos en el lecho de ambas estaciones, lo que permitió determinar la curva granulométrica del lecho.
- Pendiente del eje hidráulico durante las crecidas en el rio Tinguiririca.
- Características de cada sección
- Levantamiento aerofotogramétrico de la zona de inundación antes del llenado, a escala 1:2000.
- Perfiles topográficos y batimétricos de la cola del embalse, indicando en algunos puntos la profundidad del sedimento, realizado a comienzos del año 1979.

3 MATERIAL SOLIDO AFLUENTE AL EMBALSE

El material sólido afluente al embalse está constituido por el gasto sólido



en suspensión y el arrastre por el fondo.

3.1 Gasto sólido en suspensión.

Puede determinarse utilizando la estadística sedimentométrica obtenida a partir de la concentración de una o dos muestras diarias de 500 c.c. o bien por el método clásico de determinar una curva de descarga del sedimento, relacionando el gasto sólido en suspensión obtenido a par - tir de los aforos detallados y el correspondiente caudal líquido.

Los resultados alcanzados por los dos métodos son muy diferentes en las dos estaciones de control, como puede observarse en la siguiente tabla :

	Cach.Pte Arq. 10^6 ton/año	Ting.Los Olmos 10^6 ton/ año	Total 10^6 ton/año
Est. sedimentométrica	1,75	0,53	2,28
Curva de descarga	3,18	1,82	5,00

es decir, un método proporciona valores que son 2.20 veces superiores al otro.

Si consideramos que existe una cuenca intermedia colaborante entre el muro del embalse y estas estaciones el resultado total es el siguiente

Est. sedimentométrica	2,52	10^6 ton/año
Curva de descarga	5,84	10^6 ton/año

En el estudio realizado el año 1962, los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes

	Cah.Pte Arq. 10^6 ton/año	Ting.Los Olmos 10^6 ton/ año	Total 10^6 ton/año
Est.sedimentométrica	0,56	0,21	0,77
Curva de descarga	0,60	0,16	0,77

valor que se adoptó como afluente total de sólido en suspensión.

La comparación de estos valores nos permite concluir

1° La determinación del gasto sólido en suspensión, a pesar de ser medi ble, está sujeta a muchos errores de operación, por lo cual los re- sultados que se obtienen son siempre dudosos y afectos a errores

difíciles de cuantificar. En las Figuras N° 2 y 3 se han dibujado las curvas de descarga, donde se aprecia una dispersión de los puntos, en el gráfico log-log, que es la normal de estos casos.

2° La estimación del gasto sólido en suspensión empleando una estadística sumamente corta, es peligrosa por los errores que pueden cometerse en su evaluación.

En este caso, la estimación actual es 3,3 a 7,6 veces superior a la del año 1962, incluyendo la influencia de la cuenca intermedia no considerada en este año.

3.2 Arrastre por el Fondo.

En el año 1962 se emplearon, para su estimación, los métodos de Shields, Eintein y Meyer-Peter adoptando el proporcionado por este último método como aceptable.

En la evaluación realizada por el período en estudio se utilizó únicamente el método de Meyer-Peter y Muller.

Los resultados obtenidos en ambos casos fueron los siguientes

	Cach.Pte Arq. 10^6 ton/ año	Ting.Los Olmos 10^6 ton/año	Total 10^6 ton/año
Estudio 1962	0,700	0,080	0,78
Estudio actual	0,103	0,074	0,227(1)

(1) Considera el aporte de la cuenca intermedia, lo que no ocurre en el estudio de 1962.

En este caso se puede observar que mientras los resultados obtenidos en el rio Tinguiririca son análogos,en el rio Cachapoal son muy diferentes.

Esta discrepancia se debe principalmente a que en el año 1962 se consideró como ancho del rio, B , el total del cauce y ahora se adoptó como B, el ancho del cauce principal, considerándose que en la zona de inundación no hay arrastre de fondo de importancia. Esta suposición influye en los cálculos restantes.

3.3 Afluente total de Sólido

El afluente total es la suma del gasto sólido en suspensión más el

FIGURA N° 2
TINGUIRIRICA EN LOS OLMOS
CURVA DE DESCARGA DEL GASTO SOLIDO EN SUSPENSION

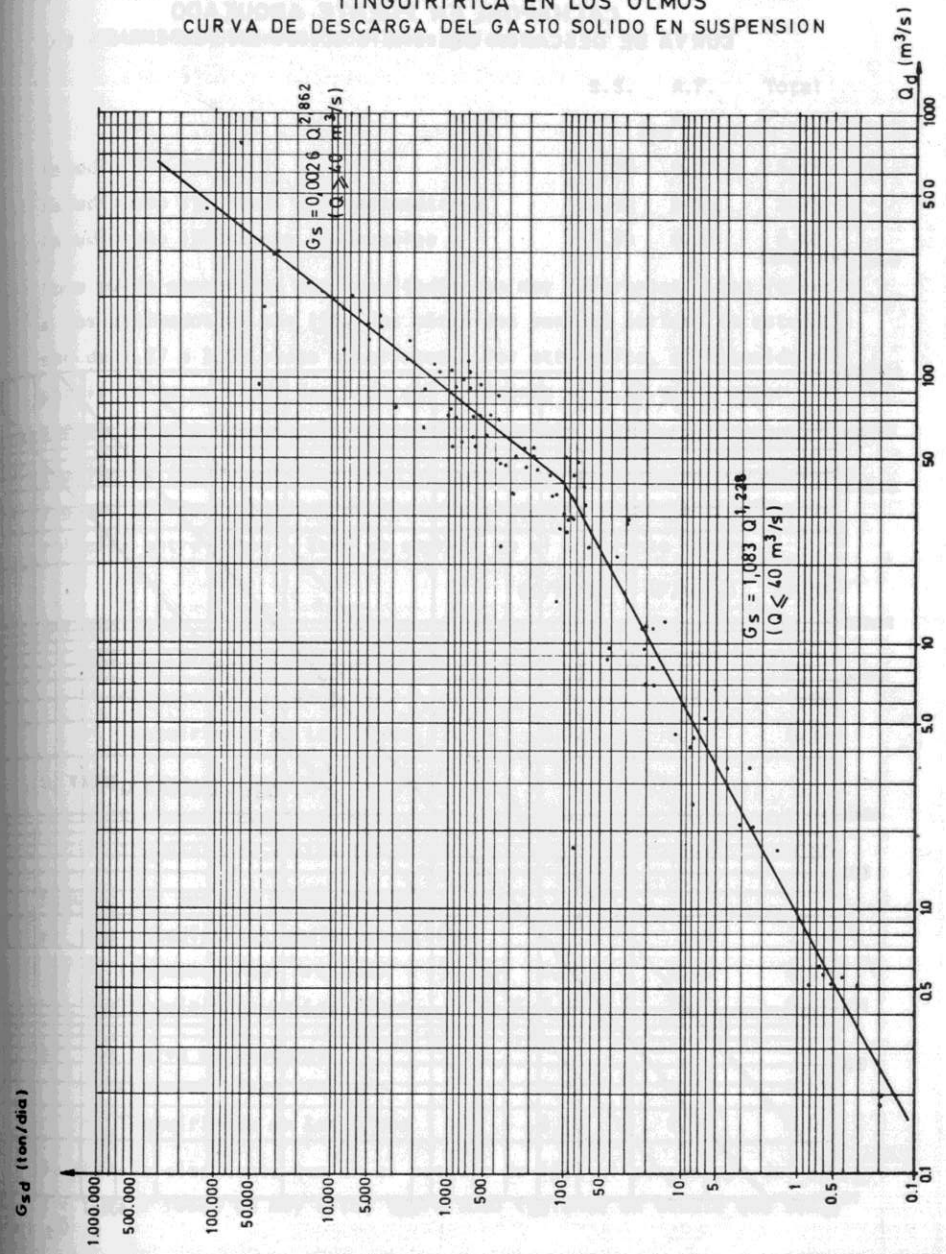
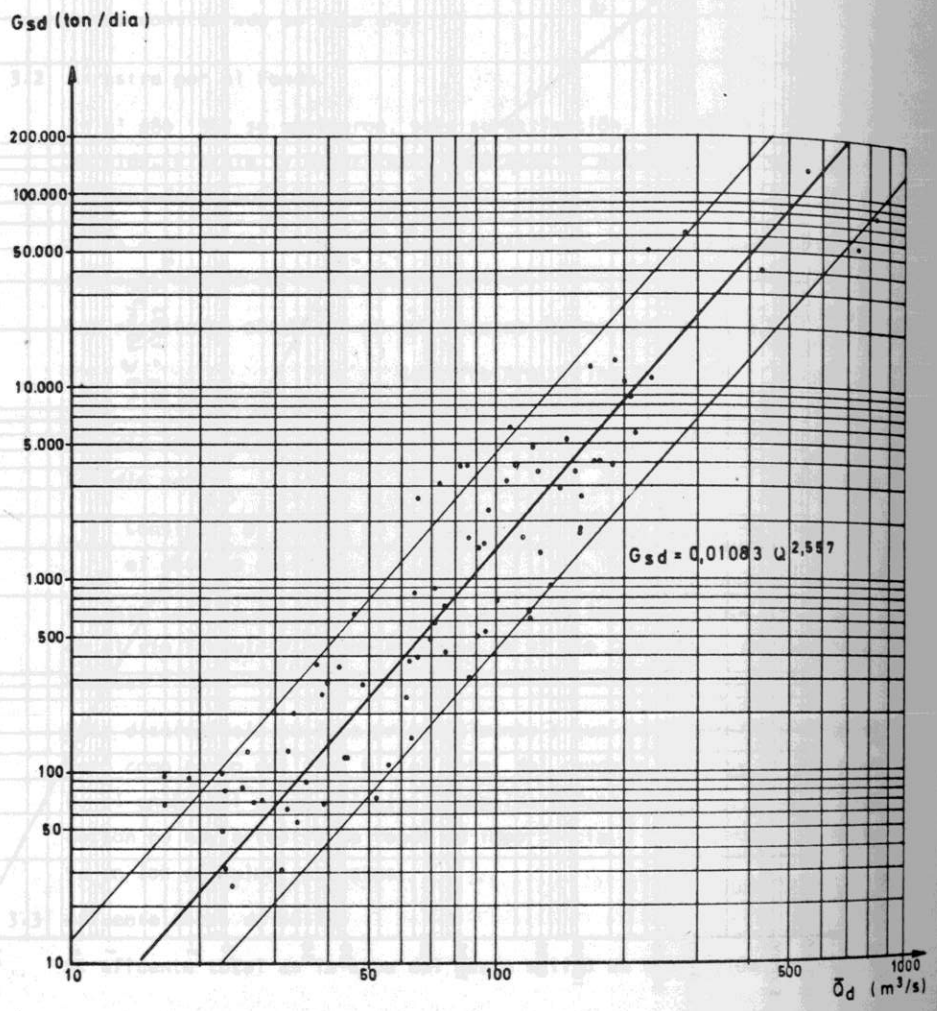


FIGURA N° 3
CACHAPOAL EN PUENTE ARQUEADO
CURVA DE DESCARGA DEL GASTO SOLIDO EN SUSPENSION



arrastre de fondo.

Los resultados obtenidos son los siguientes

	G.S.	A.F.	Total
	(10^6 ton/año)		
Estudio año 1962	0,78	0,77	1,55
Estudio año 1983-Est. sedimentométrica	2,52	0,23	2,75
Estudio año 1983-Curva de descarga	5,84	0,23	6,07

Como puede observarse los resultados son muy diferentes. Con respecto a los estimados el año 1962 los obtenidos para el período en estudio son de 1,77 a 3,93 veces superiores. Por otra parte, el obtenido a partir de la curva de descarga del sedimento es 2,21 veces mayor al que se obtiene con las estadísticas sedimentométricas.

También es interesante comparar el porcentaje de arrastre por el fondo y gasto sólido en suspensión respecto al aporte total de sólido y la relación entre ambos. Esto se expresa en el siguiente cuadro.

	GS/Total	AF/Total	AF/GS
Estudio 1962			
a) Con estadísticas sedimentométricas			
- Cachapoal Pte. Arqueado	0,44	0,56	1,25
- Tinguiririca en Los Olmos	0,72	0,28	0,38
b) Con curva de descarga			
- Cachapoal Pte.Arqueado	0,46	0,54	1,17
- Tinguiririca en Los Olmos	0,67	0,33	0,50
Estudio del período 68/69-78/79			
a) Con estadísticas sedimentométricas			
- Cachapoal Pte. Arqueado	0,94	0,06	0,06
- Tinguiririca en Los Olmos	0,88	0,12	0,14
b) Con curva de descarga			
- Cachapoal Pte. Arqueado	0,99	0,01	0,03
- Tinguiririca en Los Olmos	0,96	0,04	0,04

Se observa claramente que en el estudio de 1962 el porcentaje del arrastre por el fondo es muy alto, sobre todo teniendo en cuenta que son

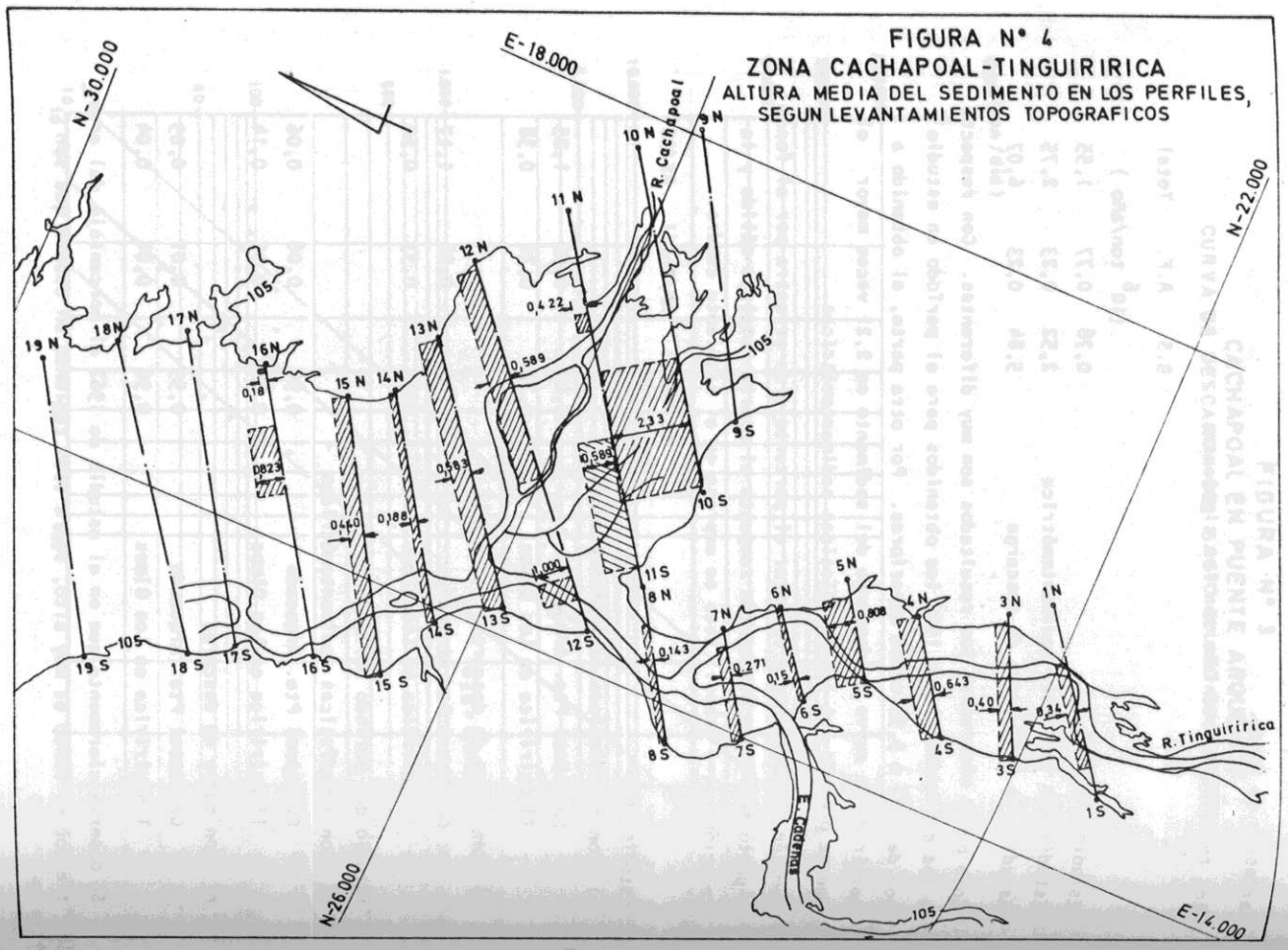


FIGURA N° 4
ZONA CACHAPOAL-TINGUIRIRICA
ALTURA MEDIA DEL SEDIMENTO EN LOS PERFILES, SEGUN LEVANTAMIENTOS TOPOGRAFICOS

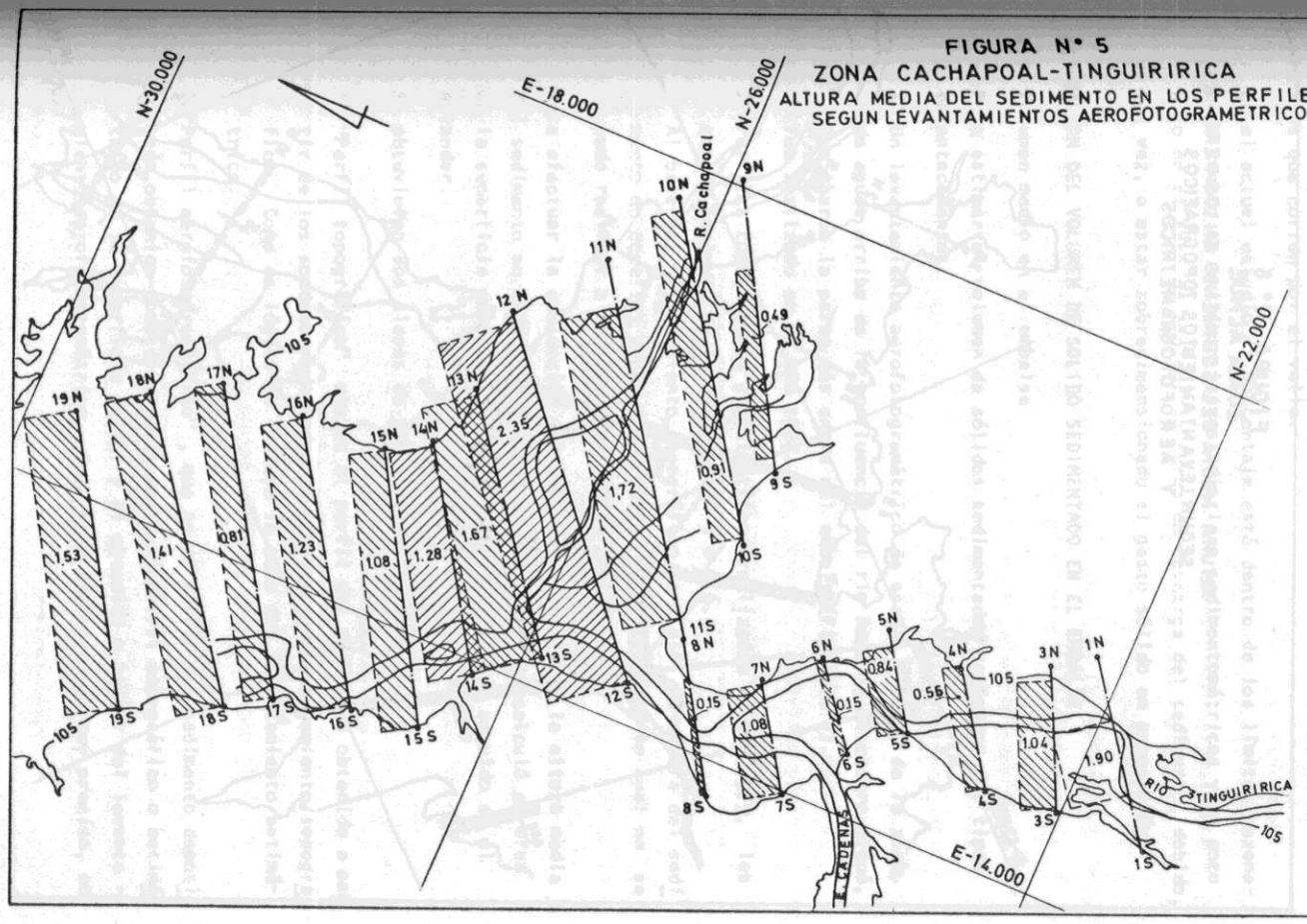


FIGURA N° 5
ZONA CACHAPOAL-TINGUIRIRICA
ALTURA MEDIA DEL SEDIMENTO EN LOS PERFILES SEGUN LEVANTAMIENTOS AEROFOTOGRAMETRICO

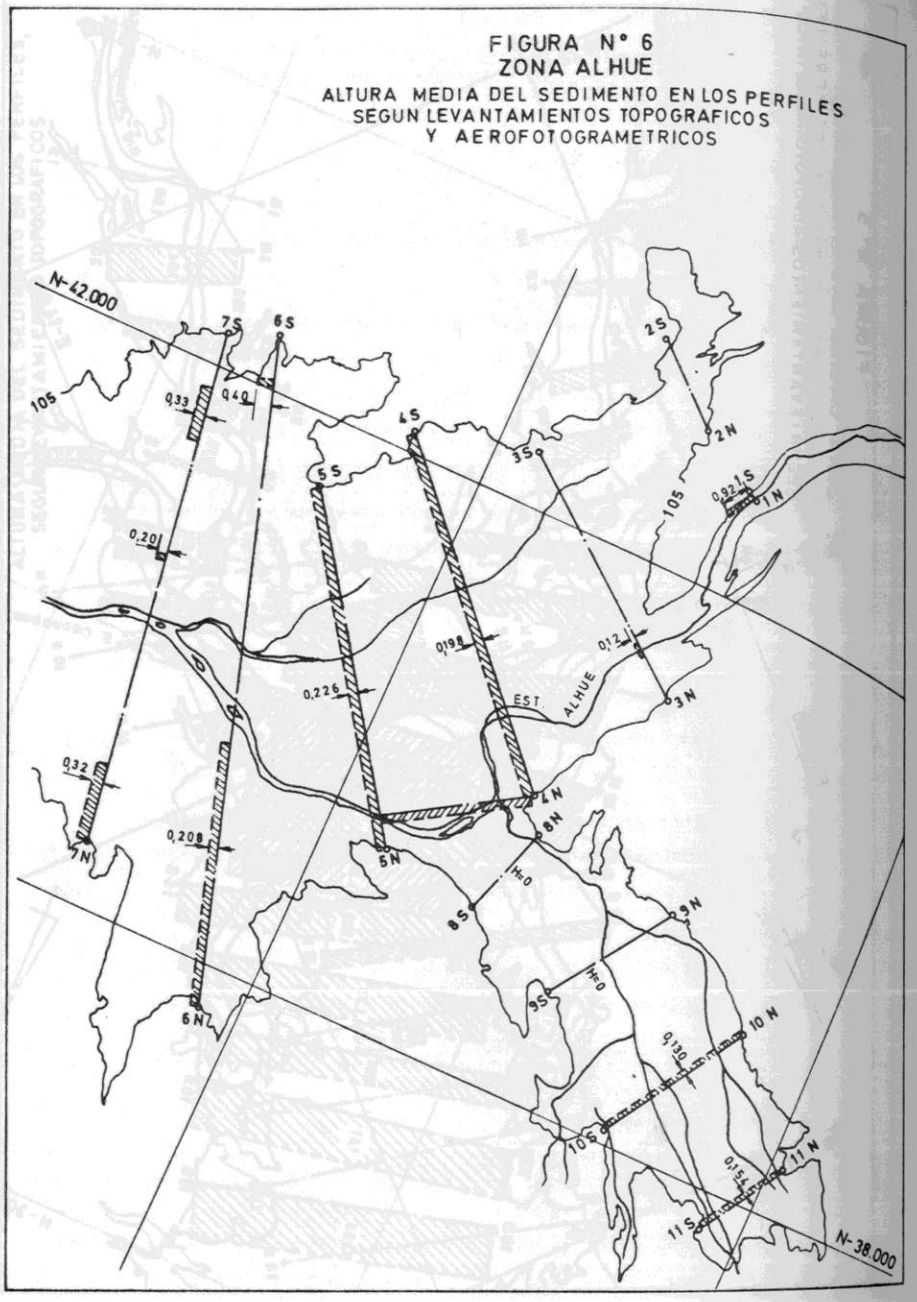


FIGURA N° 6
ZONA ALHUE
ALTURA MEDIA DEL SEDIMENTO EN LOS PERFILES SEGUN LEVANTAMIENTOS TOPOGRAFICOS Y AEROFOTOGRAMETRICOS

ríos que corren por el valle.

En el actual estudio el porcentaje está dentro de los límites razonables cuando se utilizan las estadísticas sedimentométricas y un poco bajo en el caso de emplear la curva de descarga del sedimento, debido, tal vez, a estar sobredimensionado el gasto sólido en suspensión.

4. ESTIMACION DEL VOLUMEN DE SOLIDO SEDIMENTADO EN EL EMBALSE.

4.1 Volumen medio en el embalse

Para estimar el volumen de sólidos sedimentados se poseen dos tipos de antecedentes.

1° Un levantamiento aerofotogramétrico de escala 1:2000, de la zona de aguas arriba de la confluencia del rio Rapel y el estero Alhué, que abarca la parte más ancha del embalse(Figura N°1). Fue realizado en el año 1957.

2° Perfiles topográficos y batimétricos realizados el año 1979, los que se incluyen en las Figuras N° 4 a N°6. Al hacer el levantamiento topográfico se midió, la altura del sedimento en aquellas zonas que ofrecían seguridad, por lo cual no se pudo realizar a lo largo de todo el perfil.

Para efectuar la cubicación del sedimento se calculó la altura media del sedimento en cada perfil y entre cada perfil se calculó el area de la superficie comprendida entre ellos. El método seguido es el estandar.

Se obtuvieron dos clases de perfiles de sedimento:

1° "Perfil topográfico" que es el perfil del sedimento obtenido a partir de los sondeos realizados al efectuar el levantamiento topográfico. Como es lógico no incluye la zona del levantamiento batimétrico.

2°"Perfil aerofotogramétrico" , que es el perfil del sedimento depositado obtenido como diferencia entre el perfil topográfico o batimétrico de la superficie actual y el obtenido a partir del levantamiento aerofotogramétrico. Como este último no es muy preciso, en

algunos puntos el espesor del sedimento era muy grande, en cuyo caso se disminuía de acuerdo a lo que ocurria en el entorno. Otras veces el terreno antiguo resultaba con una cota más alta que la actual, en cuyo caso se consideraba que el grosor del sedimento era 0, o sea no había sedimento.

En las Figuras N° 4, 5 y 6 se han dibujado los perfiles sedimentométricos de las zonas de los ríos Cachapoal y Tinguiririca y del estero Alhué. En este último caso los dos perfiles coincidieron.

En la zona de la desembocadura de los ríos Cachapoal y Tinguiririca se observa que la altura del sedimento en los perfiles aerofotogramétricos es mayor que en los perfiles topográficos (Figuras N° 4 y 5); de esta forma se puede suponer que al calcular el volumen del embanque podemos tener un límite inferior proporcionado por los perfiles topográficos y uno superior entregado por los perfiles aerofotogramétricos. También se observa que el espesor del sedimento en esta zona es mucho mayor que en el Alhué.

Además se estimaron dos casos de volúmenes de sedimentación o embanque.

1° Volumen del embanque total que incluye al Alhué y el que fue medido aguas arriba del perfil 19N-198 de la zona Cachapoal-Tinguiririca.

2° Volumen del embanque producido sobre la cota 99 m.s.n.m., que corresponde a la pérdida del volumen de regulación del embalse en la zona de operación.

Juntando las cuatro posibilidades de cálculo se obtienen estos cuatro volúmenes de embanque.

VTT = Volumen total medido a partir de los perfiles topográficos y batimétricos.

VTA = Volumen total medido a partir de los perfiles aerofotogramétricos.

V99T = Volumen medido sobre la cota 99 a partir de los perfiles topográficos.

V99A = Volumen medido sobre la cota 99 a partir de los perfiles aerofotogramétricos.

Por otra parte, hay perfiles en los cuales no se pudo realizar el levantamiento topográfico por lo cual se debieron utilizar los perfiles batimétricos y aerofotogramétricos para estimar el espesor del sedimento. Como es natural estas medidas son menos confiables y corresponden a los perfiles 16 al 19 de la zona Chachapoal-Tinguiririca. En el caso que estos volúmenes se incluyan en el cálculo, las siglas empleadas anteriormente se afectarán por un asterisco * .

De acuerdo con estos criterios los resultados obtenidos fueron los siguientes :

Aguas arriba perfil 15	Aguas arriba perfil 19
VTT = 5,9 10^6 m^3	VTT* = 11.0 10^6 m^3
VTA = 12,5 "	VTA* = 17,6 "
V99T = 5,6 "	V99T* = 7,4 "
V99A = 11,8 "	V99A* = 13,6 "

4.2 Volumen sedimentado en el embalse

Antes de analizar estos resultados, se debe tener en cuenta que en estos 11 años de operación del embalse de central Rapel, el material sólido afluente al embalse fue, como vimos anteriormente, igual a

según est. sedimentométrica G = 2,75x11 = 30,3 ton/11 años

según curva de descarga sedimentos G = 6.7x11 = 66,8 ton/11 años

Aplicando el método de Lane y Koelzer para determinar la densidad del sedimento y los de Brune y Churchill para calcular el porcentaje de retención, se obtienen los siguientes valores para el volumen acumulado en el embalse

Brune-Est. sedimentométrica	VBS = 24.5 x 10^6 m^3
Brune-curva de descarga	VBC = 55,1 10^6 m^3
Churchill-est. sedimentométrica	VCS = 18,3 10^6 m^3
Churchill-curva de descarga	VCC = 40,9 10^6 m^3

4.3 Distribución teórica del sedimento en el embalse. Método de Lara

Uno de los problemas que se presentan en los estudios de sedimentación de un embalse, es determinar como se distribuye espacialmente el sedimento.

Lara estableció un procedimiento, en 1962, basado en la revisión de un estudio desarrollado por Borland y Miller (1958), fundamentado en la clasificación de los embalses en cuatro tipos.

Aplicando este método al embalse de la central Rapel, se determinó el volumen sedimentado sobre la cota 99, m.s.n.m., obteniendose los siguientes resultados para los cuatro casos anteriores.

	TOTAL	SOBRE COTA 99	
	10^6 m^3	10^6 m^3	%
VBS	24,5	1,8	7,34
VBC	55,1	4,2	7,62
VCS	18,3	1,4	7,65
VCC	40,9	3,0	7,33

Estos valores del volumen sedimentado sobre la cota 99 y sus porcentajes respecto al total, son muy bajos con respecto a la realidad y a la experiencia, ya que en un caso como este, un alto porcentaje del sólido debe quedar sedimentado en la cola del embalse; un 7,5% del total es muy poco. En las medidas realizadas en terreno, se vió (Punto 4.1) que en el caso mas desfavorable, el volumen del embanque es de 5.6 10^6 m^3.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del trabajo y del estudio realizado se pueden extraer conclusiones valiosas que permiten realizar recomendaciones para el futuro. Estas conclusiones son de variada índole que vamos a exponer.

1. Una vez mas queda demostrado el peligro que representa trabajar con estadísticas cortas, por los erroneos resultados que se obtienen.

2. También queda demostrado que los estudios que se realizan sobre gasto sólido, en suspensión o arrastre, están sujetos a unas bases técnicas y teóricas que conducen a resultados cuya dispersión es muy alta, siendo difícil determinar cual se acerca más a la realidad.

3. Para obtener buenos resultados en la determinación del embanque producido en un embalse, es indispensable contar con una topografía de precisión del terreno que va a ser cubierto por las aguas, ya que determinar por sondeo el espesor del sedimento es muy inexacto y en algunos puntos peligroso por lo blando del terreno. Por otra parte en las zonas cubiertas de agua permanentemente, es imposible.

4. De los resultados obtenidos se puede establecer que

a) En la zona del Cachapoal-Tinguiririca el volumen de embanque es unas 5,5 veces mayor que el volumen de embanque en la zona del Alhué y representa el 84% del total medido.

b) El volumen obtenido a partir de los perfiles topográficos se puede considerar como límite inferior y el obtenido a partir de los perfiles aerofotogramétricos como un nivel superior.

c) De los dos métodos el que parece se acerca más a la realidad es el basado en el perfil aerofotogramétrico.
Este puede estar afectado de errores puntuales grandes por lo cual se le puede aplicar al espesor un término correctivo promedio que se ha estimado es del orden de $\pm$ 0,25 m. Este factor afecta solamente a la zona Cachapoal-Tinguiririca, ya que en la zona Alhué se obtienen iguales valores por los dos métodos.

d) Considerando que la mayor parte de la superficie que se encuentra sobre la cota 99 pertenece a las zonas estudiadas, los valores obtenidos en este caso pueden considerarse como más representativos. Adoptando el criterio del punto c), el embanque sobre la cota 99, o sea la pérdida de volumen de regulación en estos 11 años, está comprendida entre los valores

$$7{,}4 \times 10^6 m^3 \leq \Delta V_R \leq (13{,}6 \pm 2{,}4) \times 10^6 \ m^3$$

lo que equivale a una perdida porcentual de

$$2{,}07\ \% \leq \Delta V_R \leq (3{,}79 \pm 0{,}68)\%$$

La pérdida anual será por lo tanto de

$$0{,}68 \times 10^6 \ m^3 \leq \Delta V_R \leq (1{,}24 \pm 0{,}22) \times 10^6 \ m^3$$

$$0{,}19\% \leq \Delta V_R \leq (0{,}34 \pm 0{,}06)\ \%$$

e) El método de Lara no representa la realidad del embalse de C. Rapel, por lo que debe ser verificado en otros embalses antes de asegurar si es aceptable o no. La forma del embalse de central Rapel no es representativa de la generalidad de los embalses.

Consecuentes con los problemas que se han tenido al efectuar este estudio, se pueden realizar las siguientes recomendaciones :

1. Siendo este método el más atractivo para medir el arrastre de los rios y por consecuencia la erosión de las cuencas, es conveniente y necesario tomar las medidas para que pueda realizarse en el futuro un estudio análogo en todos los embalses en construcción y operación. Para ello deberán levantarse perfiles topográficos antes del llenado del embalse o en su situación actual. Esto permitiría cubicar el embanque anual en algunos años más .

2. Para verificar la exactitud de los métodos actuales de muestreo y estudio, es conveniente medir el gasto sólido en suspensión de los principales rios que desaguan en el embalse.

3. En forma análoga, en estos rios deberá determinarse la granulometría del lecho haciendo varios muestreos anuales, 2 a 3 , y medir el eje hidráulico durante las crecidas, para aplicar con suficientes antecedentes las fórmulas teóricas.

4. Empezar a medir el gasto sólido en suspensión, la granulometría del lecho y el eje hidráulico, con al menos 10 años antes de desarrollar el proyecto de un embalse.

BIBLIOGRAFIA

-Basso S., E. et al. 1959. Medidas de sedimentación para el proyecto de la central Rapel. ENDESA.

-Basso S., et al 1962. Nueva estimación para la sedimentación en el embalse de la central Rapel. ENDESA.

-Basso S., et al. 1962. Informe complementario del estudio "Nueva estimación para la sedimentación en el embalse de la central Rapel". ENDESA

-Benítez G., A. 1983. " Estimación del gasto sólido afluente y del embanque producido en el embalse de la central Rapel durante el período de 11 años Abril /68 - Marzo/79". ENDESA. (en impresión)

-Vanoni, Vito A., 1977 " Sedimentation engineering " ASCEM & R N° 54.