



# V Seminario Latinoamericano de Irrigación III Jornadas Venezolanas de Riego

Caracas, 20 al 31 de Octubre de 1968

COLEGIO DE INGENIEROS DE VENEZUELA

Tema **III**

Documento N° 54

## SEDIMENTACION

### DISPOSITIVOS PARA DETENER SEDIMENTOS EN BOCATOMAS

Trabajo presentado por:  
Instituto Colombiano de la  
Reforma Agraria-INCORA  
Bogotá - Colombia

## INTRODUCCION

Uno de los aspectos más interesantes observados durante la asesoría en obras de irrigación en el Instituto Colombiano de la Reforma Agraria- INCORA - en la República de Colombia, fué el relacionado con el problema que presentan los materiales sólidos que acarrean los ríos en arrastre y suspensión.

Aunque ya se tenían algunos conocimientos sobre el particular, al contemplar la magnitud que este problema representa en algunos distritos de riego en operación, y considerar el que podría formarse en otros proyectos similares, hoy en estudio y construcción, motivó que se particularizará la atención sobre el mismo. Con esta inquietud se siguieron observando y estudiando más detalladamente las diferentes fases que origina este problema, y en pláticas posteriores con algunos compañeros de labores, nació la idea de cooperar, aunque fuese en esta forma modesta, con algunos apuntes y sugerencias sobre la factibilidad de posibles cambios en en las bocatomas a los ríos, con el objeto de disminuir los volúmenes de sedimentos captados en las obras actuales construídos con diseños convencionales.

El problema se presenta principalmente en aquellos proyectos que aprovechan el agua de ríos no controlados. Cuando la magnitud de estas fuentes es tal que no requiere la construcción de obras de almacenamiento para regulación de la escorrentía, el agua que circula por ellos acarrean los cuatro tipos conocidos de materiales sólidos: disueltos, en suspensión, en saltación, y en arrastre de fondo. En estos apuntes únicamente trataremos de los materiales acarreados en las tres últimas formas ya que este problema es el que más comúnmente se presenta en los proyectos de riego y/o producción de energía hidroeléctrica.

El problema es en ocasiones de tal magnitud que se puede afirmar viene siendo uno de los más costosos y difíciles de resolver. Se origina al variar las mayores velocidades no controladas de los ríos a las velocidades menores y controladas de las obras de conducción. En esta disminución brusca de velocidades, las obras sirven de decantadoras y retenedores de sólidos. Al efectuarse la sedimentación se hace necesaria una constante remoción de estos materiales para conservar las áreas hidráulicas necesarias. Con el transcurso del tiempo, el costo que por esta conservación adicional se acumula adquiere proporciones inusitadas y se van creando otro tipo de problemas tales como la falta de espacio para deponer los materiales removidos, deterioro de las obras de arte en los canales, etc.

Se podría pensar que si se diseñan y construyen canales revestidos que tengan el mismo régimen del río, estos materiales no se depositarían en ellos, pero de hacerlo así, se estaría provocando un problema mayor, ya que estos sólidos llegarían directamente a los terrenos de cultivo o a la maquinaria transformadora de energía, dañándolos en corto tiempo. Por esta misma razón se han buscado soluciones tales como poner obras desarenadoras, aguas abajo de las bocatomas, con el objeto de sedimentar las aguas y, habiéndose efectuado esta operación, dejarlas pasar a los canales. Sin embargo, a pesar de tener ya cierta experiencia en este tipo de

obras, se ha observado que son sumamente costosas y en ocasiones, su funcionamiento no se ajusta a lo previsto en los diseños. Además se razona que el proceso de derivar las aguas con materiales, desarenarlas y después tener que botar estos sedimentos otra vez al río, no deja de ser un doble movimiento que es factible suprimir.

El presente trabajo reúne algunas ideas sobre posibles mejoramientos en los diseños de las bocatomas, que permitan detener una mayor parte de estos sólidos en el mismo cauce de los ríos, evitando así el doble trabajo anotado anteriormente.

Para una mejor comprensión de las modificaciones a los mecanismos que al final de estos apuntes se sugerirán, se ha dividido este escrito en cuatro capítulos, de los cuales, los tres primeros son un recordatorio muy superficial del comportamiento hidráulico de las bocatomas convencionales, de los ríos y de las presas derivadoras. Lo anterior se hizo con el objeto de recopilar aquellos factores que intervienen en su funcionamiento y que, sumándolos en una estructura, permitan detener un mayor porcentaje de sólidos en proceso de acarreo en el mismo cauce de los ríos. El último capítulo, reúne la suma de las condiciones favorables para lograr este propósito, auxiliando las bocatomas con algunas adiciones estructurales que se supone producción el efecto buscado.

Para evitar una prolongación innecesaria de estas sugerencias se tendió, en ese mismo último capítulo, a concentrar las modificaciones propuestas en dos únicos tipos de bocatoma a saber: Una auxiliada con presa derivadora y otra toma directa a la fuente de abastecimiento.

Nos sentiremos satisfechos si las conclusiones de este escrito, agilizan las inquietudes de los técnicos en la materia (inquietudes que promovieron parte de los lineamientos seguidos en el Sexto Congreso Internacional de Irrigación y Drenaje, en Nueva Delhi, India, en 1966) y se continúe profundizando en la búsqueda de mejores soluciones que reflejen economía, en todos aquellos aprovechamientos que presentan este tipo de problemas.

Se desea, por último hacer mención de la valiosa cooperación que a estos apuntes hicieron algunos compañeros de labores del Instituto Colombiano de la Reforma Agraria, destacándose en especial la obtenida de los señores Ingenieros Leonardo Paredes y Jairo Murillo, así como mi agradecimiento al maestro y amigo, Director de Cieps de México, Señor Ingeniero Oscar Vega Arguelles, quien tuvo la gentileza de leerlos y autorizarlos.

Ricardo Ríos Avendaño  
Bogotá, Agosto de 1968

BREVE REPASO A LOS DIFERENTES TIPOS DE BOCATOMAS,  
SU CALCULO HIDRAULICO. SU FUNCIONAMIENTO Y OPERACION

I. TOMA DIRECTA AL RIO.

La bocatoma más común es aquella que capta las aguas de los ríos en forma directa, sin auxilio de obras derivadoras. Esta bocatoma, a la que llamaremos "Toma Directa al Río" (Ver fig. 1), consta generalmente de las siguientes partes:

- a) Entrada o transición a las compuertas reguladoras.
- b) Orificios reguladores de gastos.
- c) Conducto cerrado para alejar las aguas derivadas del cauce del río.
- d) Transición de salida.

Los orificios reguladores de gastos pueden ser de diferentes formas siendo los más usuales los de sección circular y rectangular. En los orificios circulares, por su misma figura geométrica, se dificulta el instalar compuertas radiales o de sector, por lo que siempre se trata de que para orificios circulares se instalan compuertas deslizantes. En cambio, los diseños en formas rectangular pueden alejar compuertas deslizantes (aguas arriba del orificio) o compuertas radiales (aguas abajo del mismo). Generalmente la elección del tipo de compuertas lo determina precisamente la mayor o menor cantidad de sedimentos que se prevé, puedan depositarse aguas arriba de las bocatomas, ya que, para la operación de una compuerta deslizante, se tiene que agregar el esfuerzo adicional que provoca el empuje de una determinada altura de azolves y en cambio para la compuerta radial, este empuje no afecta a la compuerta y favorece su funcionamiento.

Otro factor que puede determinar la selección del tipo de compuerta es que las radiales, debido a su diseño, tienen fugas proporcionales a la carga que soportan, lo que no sucede en las deslizantes en las cuales a mayores cargas se logra menor filtración.

Recordando el procedimiento de cálculo del dimensionamiento de estas bocatomas, ya conocidos algunos datos necesarios como son el nivel mínimo de aguas en el río y el nivel superior de la superficie del agua a la salida de la toma (H en la fig. 1), podemos sintetizarlo en la forma siguiente:

- a) Pérdida de carga por confinamiento del agua del río a la estructura (transición de entrada).
- b) Cálculo del dimensionamiento del orificio. Pérdida de carga que nos produce con el régimen establecido.
- c) Pérdida de carga producida por el paso del agua en el espacio donde se aloja la compuerta radial, cuando esta existe  $\frac{1}{2}$ .

- d) Pérdida de carga en el conducto.
- e) Pérdida de carga por transición de salida.

La suma de todas éstas pérdidas de carga debe cumplir con la ecuación:

$$H \geq \left(h + \frac{e}{2}\right) - d = \sum (h_e + h_o + h_c + h_f + h_s) \dots \dots \dots (1)$$

en donde: H = Pérdida de carga total para producir el gasto máximo considerado, con el nivel mínimo del río:

h = Carga mínima al centro del orificio de entrada.

$\frac{e}{2}$  = Semi-altura del orificio.

d = Tirante máximo en el canal de conducción.

$h_e$  = Pérdida de carga por entrada.

$h_o$  = Pérdida de carga por orificio.

$h_c$  = Pérdida de carga bajo compuertas radiales.

$h_f$  = Pérdida de carga en el conducto, y

$h_s$  = Pérdida de carga por transición de salida.

El funcionamiento de esta bocatoma se basa en el principio de la continuidad:

$$Q = AV \dots \dots \dots (2)$$

en donde Q = Gastos requeridos

A = Sección hidráulica.

V = Velocidad media del agua.

Por esta misma ecuación se puede determinar que para un gasto igual, el aumentar la velocidad del agua, se tiene que disminuir el área hidráulica. La velocidad aumenta cuando crece la carga sobre el orificio, lo que sucede cuando el río aumenta en su caudal. En consecuencia, a mayor carga en el río se debe cerrar la compuerta para producir un mismo gasto. Por es to mismo el cálculo de las tomas se hace siempre en las condiciones más desfavorables para obtener los gastos máximos con cargas mínimas y poster riormente (ya dimensionada una bocatoma) se calculan las curvas de gastos, aberturas de orificios - alturas de carga disponible para la operación de la estructura en cualquier momento dado.

---

1/ En caso de compuerta deslizante esta pérdida de carga no existe.

Por el comportamiento anterior siempre se tendrá que a mayor carga, mayor velocidad de entrada en las tomas. En los capítulos siguientes se analizará la relación que tiene con la captación de sedimentos el funcionamiento de estas bocatomas, las cuales se pueden considerar bajo el punto de vista hidráulico, como orificios fijos con carga variable.

## 2. TOMA PARA BOMBEO

Las estructuras de toma que sirven para alojar plantas de bombeo, podemos considerarlas como una variante de las "Tomas Directas al Río". Esta bocatoma funciona en forma semejante a la anterior hasta el paso por el orificio de entrada. Posteriormente, el agua llega a un depósito o tanque de quietamiento, donde se instalan los sistemas de bombeo que la elevan a la altura deseada. Por la razón anterior, las compuertas de entrada deben trabajar constantemente abiertas sea cual fuese la carga en el río, pues la regulación del gasto lo ejecutan las propias bombas y por lo tanto el funcionamiento de estas compuertas es diferente al de la toma directa al río, pues el principal objeto de su instalación, es aislar la planta de bombas cuando no esté funcionando o para limpieza del tanque. El cálculo del dimensionamiento del orificio es similar al de las tomas directas, pues se considera el nivel mínimo disponible en el río y en el nivel que puede producir el bombeo para obtener el gasto máximo deseado.

Siguiendo la misma secuela anterior se anotan las principales partes de que consta esta estructura (ver fig. 2).

- a) Entrada o transición a las compuertas de aislamiento.
- b) Orificio de aislamiento.
- c) Tanque de quietamiento o de succión de las aguas y
- d) Planta de bombeo.

En algunos casos especiales, el tanque de succión se encuentra alejado de la fuente de abastecimiento, por lo que se hace necesario una conducción ya sea cerrada o abierta y su transición de salida. En estos apuntes nos referimos a la estructura más común o sea la que consta únicamente de las partes enunciadas.

La salida del agua de las bombas, presenta generalmente una descarga a un tanque disipador de energía antes de entrar al canal de conducción. Para el presente trabajo se puede decir que el tipo de descarga no afecta en ninguna forma el problema de los sedimentos, pero se debe mencionar que cuando se bombean aguas muy turbias se hace indispensable la instalación de tanques sedimentadores para limpiar las aguas. En estas condiciones, el costo que ocasionan estos sedimentos se suma el costo de su elevación más la depreciación adicional que causan los sedimentos en los propios mecanismos elevadores.

El cálculo hidráulico se resume en las consideraciones siguientes:

- a) Pérdida de carga en la transición de entrada y
- b) Pérdida de carga en el orificio de aislamiento

La ecuación por cumplirse podemos anotarla en la forma siguiente:

$$H = (h_e + h_o) \dots \dots \dots (3)$$

El funcionamiento de estas estructuras hace diseñar los tanques de succión en tal forma que se tenga una carga mínima sobre la campana o colador de las bombas, para evitar los remolinos que permiten la entrada de aire a las mismas. Es por esto que, generalmente, el fondo de los tanques se encuentra por debajo del cauce del río considerando una misma sección transversal. Esto origina que los tanques se convierten en verdaderos pozos de decantación de los materiales que se introducen por el orificio. En consecuencia las bombas tiene que absorber la gran mayoría de los sólidos, con un desgaste excesivo de los impulsores de las bombas y por lo tanto en una disminución de la eficiencia y aumento de costo del bombeo. Aquellos que no se absorben se deben constantemente remover. Esta última operación bien puede ser manual o mediante la instalación de unas bombas de sentina que trabajan en forma inversa a las de elevación de las aguas, o sea que arrojan el agua a presión en el fondo de los tanques para desalojar hacia el río, o hacia otros depósitos construídos expreso, los materiales sedimentados. En estas operaciones es cuando, las compuertas de aislamiento, cumplen principalmente su función.

Por el diseño y operación que estas bocatomas tienen, se puede colegir que estas estructuras son las que se presentan como las más favorables para la captación de sedimentos ya que también se hace difícil poner obras desarenadoras en el lecho de los ríos aguas arriba de las mismas. En los capítulos siguientes analizaremos con más detenimiento el funcionamiento de estas tomas así como las sugerencias para su mejoramiento y evitar la captación de sólidos en arrastre y suspensión de los ríos.

### 3. TOMA PARA AGUAS SUBALVEAS.

Esta otra estructura, muy utilizada en aprovechamiento de usos domésticos e industriales y de riego, también se puede considerar como otra variante de las tomas directas al río. La principal diferencia es que estas estructuras toman el agua que escurre a través de los mantos permeables que tienen los ríos en sus cauces. Precisamente por estas condiciones el agua captada está prácticamente filtrada y por eso, al contrario de las mencionadas anteriormente, es la que presenta menos problema en la captación de sedimentos.

Las tomas para aguas subálveas constan de las siguientes partes:

- a) Captación directa de las aguas subálveas (ver fig. 3)
- b) Tanque sedimentador de arenas (este tanque puede inclusive suprimirse).

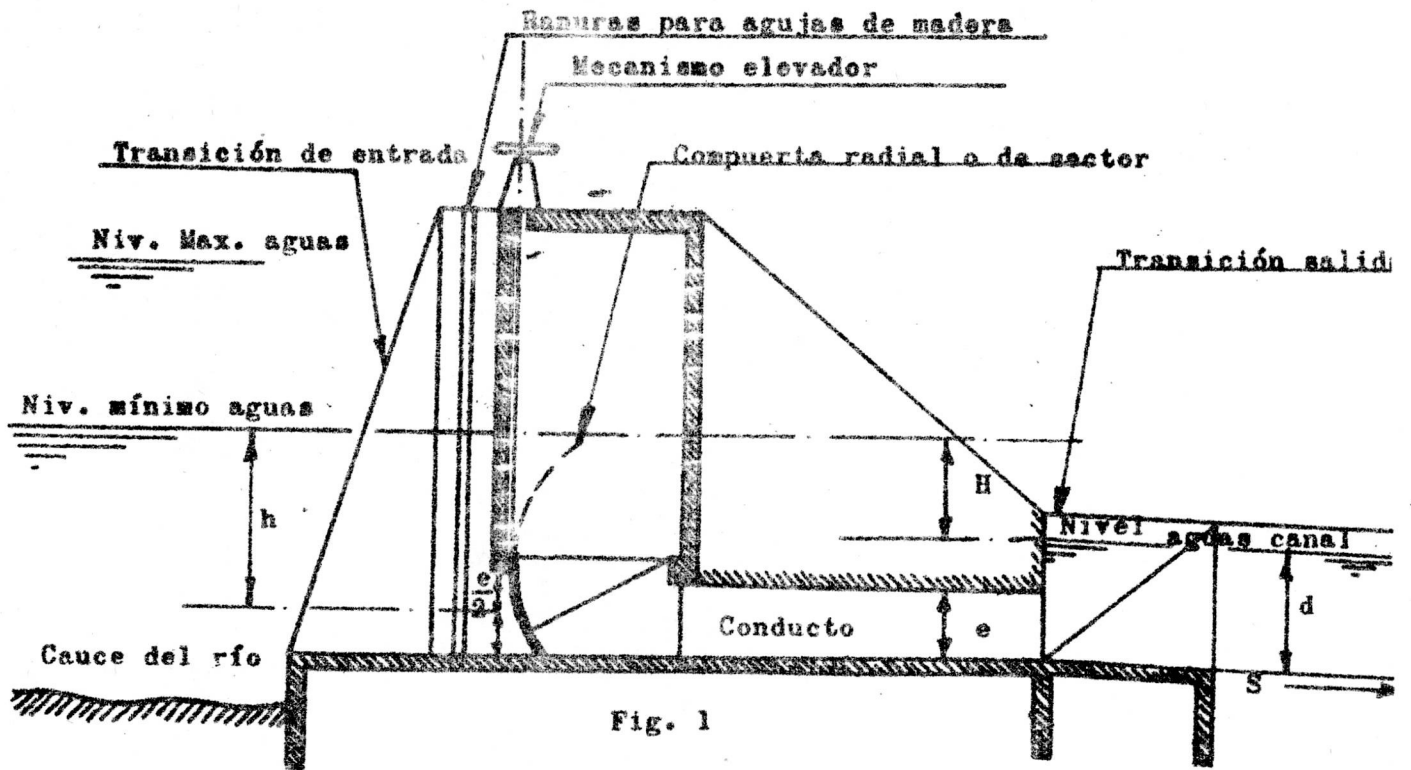


Fig. 1

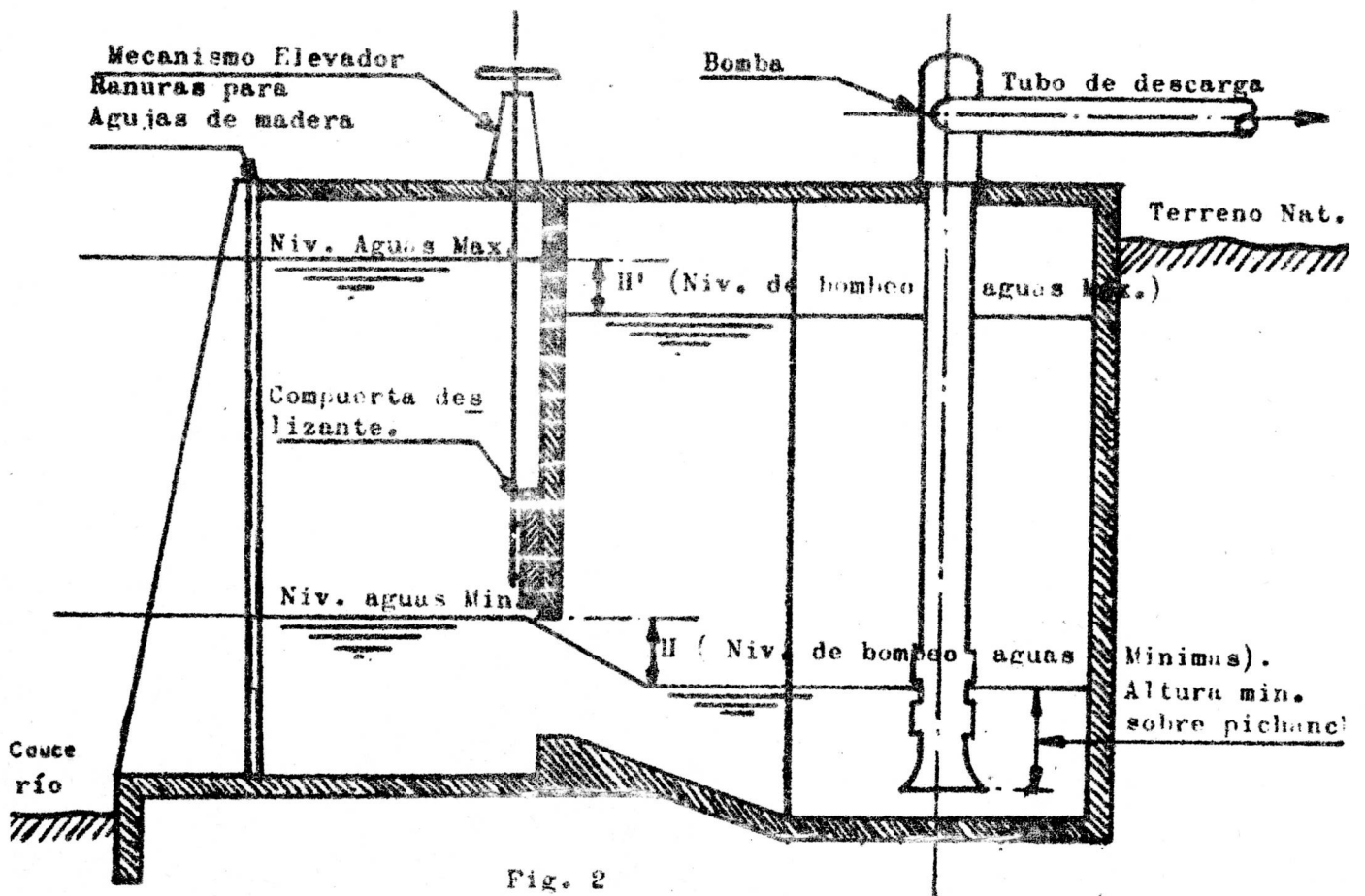


Fig. 2

- c) Conducto de unión del tanque sedimentador al tanque de succión y
- d) Planta de bombeo.

Los tanques mencionados pueden aislarse con compuerta deslizantes tal como se observa en la misma figura N° 3 y con el mismo objeto descrito para las compuertas de la toma anterior.

Las fluctuaciones de los niveles en el río no afectan la captación de las aguas ya que sucede que el agua subálvea, siempre limpia, únicamente se ve presionada por las cargas adicionales. Al originarse, esto, los conductos captadores de agua pueden proporcionar mayor volumen por unidad de longitud lo que redundará en que, a mayor carga en el río, menor velocidad del paso de agua por los filtros hacia la cámara de captación y por lo tanto menor arrastre de sedimentos. Esta propiedad nos será de mucha utilidad cuando se mencione la posibilidad de adaptar a las tomas un filtro artificial, tal como se verá más adelante.

El área transversal de la galería o canal filtrante, relleno de grava y boleó limpios puede estimarse de manera rápida y bastante aproximada aplicando la Ley de Darcy del flujo en medios porosos:

$$Q = AKi \dots A = \frac{Q}{Ki} \dots \dots \dots (4)$$

en donde A = Area en M<sup>2</sup>.

Q = Gasto que se desea obtener en M<sup>3</sup>/s.

K = Coeficiente de permeabilidad del material del filtro en m/s

i = Gradiente hidráulico mínimo =  $\frac{H \text{ en metros}}{L \text{ en metros}}$

(K varía de 0.0000 l a 0.01 m/s para arenas limpias y mezclas de gravas y arenas limpias, y entre 0.01 y 1.0 m/s para gravas limpias. Los valores más pequeños para los granos más pequeños y las mezclas mejor graduadas, dentro de cada grupo de materiales). (\*)

Se recuerdan también los siguientes conceptos para un prediseño adecuado de una bocatoma de aguas subálveas:

- e) El proceso de filtración ya estabilizado es invariable, mientras no existan cambios radicales en la naturaleza de los lechos permeables.

---

(\*) Estos valores se han tomado del libro **Mecánica de Suelos**, por E. Juárez Badillo y A. Rico Rodríguez, Edit. Ingeniería UMAM 1963 y se basan en estudios de A. Casagrande.

- b) Se puede considerar en forma muy aproximada, que se requiere un mínimo de 5 M<sup>2</sup> de superficie permeable y saturada de agua para proporcionar 1 M<sup>3</sup>/seg. a lo largo de los conductos de captación.

#### 4. TOMAS EN PRESAS DE DERIVACION

Cuando las condiciones de un río, regulado o nó, son tales que en aguas mínimas no se pueden obtener las cargas necesarias para derivar los gastos requeridos o bien, en determinadas épocas del año se hace necesario derivar la totalidad de su caudal, se requiere la construcción de obras adicionales para las tomas, tales como son las obras provisionales de desvío o bien las presas definitivas de derivación. Estas estructuras, cuyo fin principal es el proporcionar una carga mínima a las bocas tomas, pueden ser construídas de diferentes formas, de acuerdo con la geología del cauce, las condiciones de las márgenes en las que se ejecuta la obra y los materiales disponibles en la región. Sin embargo, las estructuras de bocatoma se construyen con diseños muy similares. En vista de lo anterior, en estos apuntes no mencionaremos los diferentes tipos de presa de derivación, sino únicamente la carga que estas provocan y la estructura llamada canal de limpia o desarenador que se construye aguas arriba de la toma.

Al igual que las tomas directas al río, el sistema de captación puede hacerse mediante compuertas radiales o deslizantes. El orificio puede alojarse directamente en la pared de confinamiento del río o alejarse aguas abajo requiriéndose una transición de entrada ( ver fig. 4). El canal de limpia o desarenador es un tanque adicional que se instala con el objeto de retener los materiales de arrastre de fondo y en parte funciona también como decantador de sólidos en suspensión. Sin embargo, es necesario que el diseño y funcionamiento de estas estructuras llenen ciertas especificaciones para que cumplan con estas funciones pues ya se ha demostrado que con una mala operación o cuando el río crece no son suficientes para proteger a las tomas de la introducción de materiales sólidos.

La toma más común es aquella que se aloja a cierta distancia del paramento del muro de confinamiento de las aguas, con objeto de obtener un espacio adicional para poder remover los sedimentos que pasan del canal de limpia (transición de entrada). Esta función, como se verá en los capítulos siguientes, no se cumple por la misma forma en que trabajan las tomas y, en cambio, encarecen la estructura. Sin embargo, este espacio podrá ser de beneficio cuando se considere la instalación de un mecanismo filtrante que disminuya la captación de sedimentos. Es por esto su anotación en este escrito.

Finalmente anotamos que el cálculo hidráulico es igual al de las tomas directas al río. Se consideran las mismas pérdidas de carga en la ecuación (1) y se sigue la misma secuencia en su dimensionamiento. El funcionamiento de estas estructuras es similar al anotado en el subcapítulo I, es decir que trabajan como un orificio fijo con carga variable.

5. TOMAS EN PRESA DE ALMACENAMIENTO

Como estas tomas se diseñan de tal modo que dejan un espacio previamente calculado para depósitos de sedimentos, se ha deseado mencionarlas en estos apuntes para recordar las condiciones de su diseño que permitan no captar los sólidos de arrastres de fondo de los ríos y en gran parte los sedimentos en suspensión. Como se recordará ( ver fig. 5) la toma de las presas de almacenamiento se instala a una altura tal que deja una capacidad en la parte inferior del vaso igual al volumen de sedimentos que la presa captará en equis número de años (vida útil de las presas).

La condición que obliga a las tomas en presas de almacenamiento a colocarse en un nivel superior al lecho del río, origina la protección de la misma a no captar los arrastres de fondo. Como generalmente las tomas se colocan en la parte más alejada de las zonas de eyección de los ríos, también gozan de un tiempo de decantación que hace que, en términos generales tomen aguas limpias y por lo tanto libres de sedimentos.

Cuando las presas están próximas a colmatarse las tomas empiezan a captar cada vez más un mayor número de sólidos en arrastre y suspensión y arrojarlos aguas abajo de las presas. Este fenómeno que ya se está produciendo en gran escala en algunas presas de almacenamiento adquiere proporciones muy graves con el tiempo. Sin embargo, como este problema no se relaciona con estos apuntes, no se analizará con mayor detalle.

Lo que puede interesar del funcionamiento de estas tomas, es la condición que ellas tienen al iniciarse la vida útil de las presas de no captar sedimentos. Analizando las causas se observa que las principales son, el estar la toma en un nivel muy superior al lecho del río y a tal distancia de los puntos de eyección, causados por el propio embalse de la presa, que no llegan los sólidos a introducirse en la toma. Bástenos recordar estos datos para nuestros apuntes en los próximos capítulos referentes a las condiciones que pueden tener las tomas para evitar la captación de sedimentos.

El cálculo hidráulico, al igual que las estructuras anteriores, podemos resumirlo en el cumplimiento de la siguiente ecuación:

$$H = (h_e + h_f + h_t + h_v + h_f' + h_v') \dots \dots \dots (5)$$

en donde H' = pérdida de carga total

$h_e$  = pérdida de carga por entrada

$h_f$  = por conducto

$h_t$  = por transición

$h_v$  = por compuerta de emergencia

$h_f'$  = por tubería de presión

$h_v'$  = por válvula de control

## 6) OTROS TIPOS DE BOCATOMAS

Existen otros tipos de bocatomas, pues la selección de estas, dependen de las condiciones particulares de cada proyecto; en estos apuntes se ha deseado recordar únicamente los cuatro tipos anotados por ser los más comúnmente empleados y además, con base en el funcionamiento de estas tomas se sugieren las modificaciones que se pretenda hacer. En el capítulo correspondiente a estas sugerencias se verá que las bocatomas propuestas son el resultado de una yuxtaposición de varias de las partes de las enunciadas y además se ha tendido a unificar dos únicos diseños, tal como se mencionó en la introducción de estos apuntes.

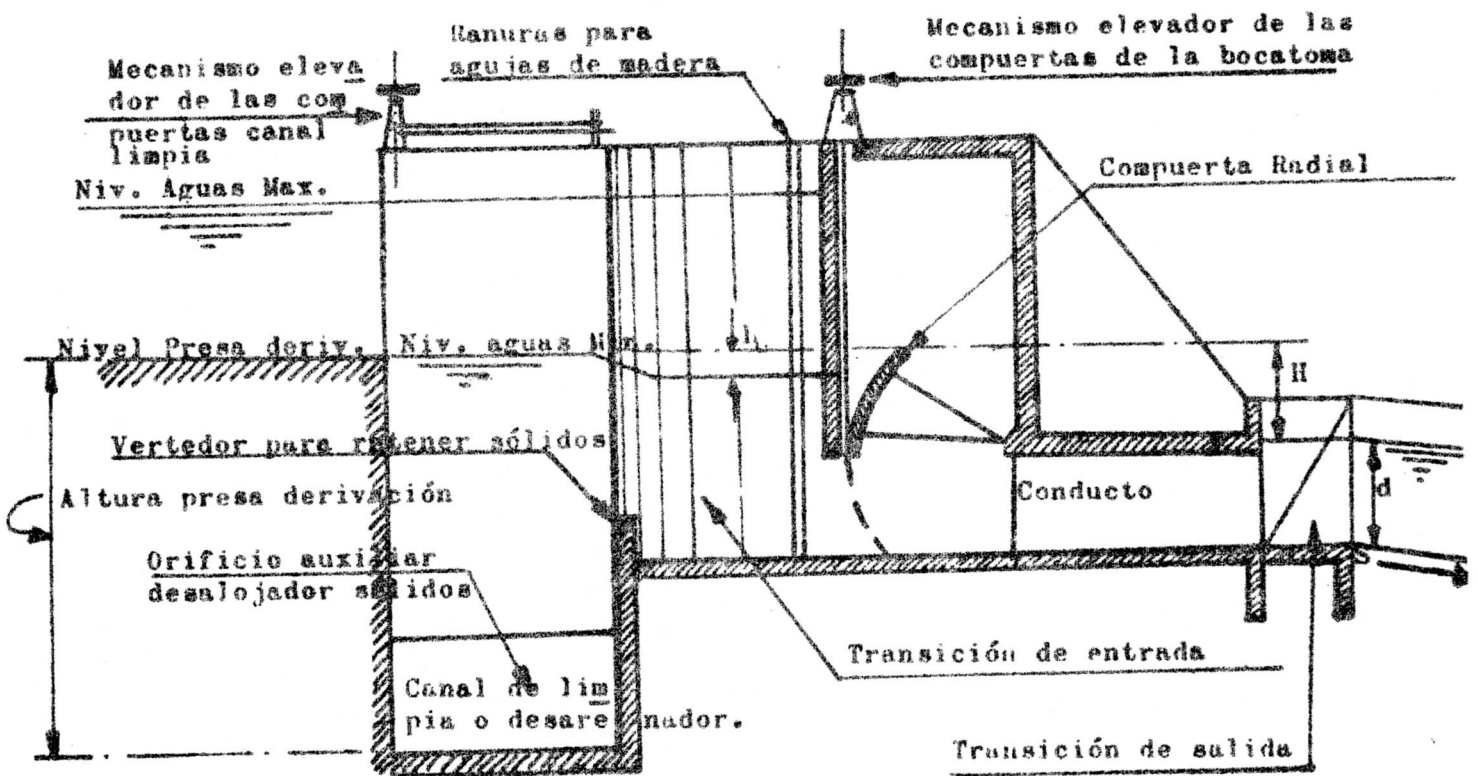
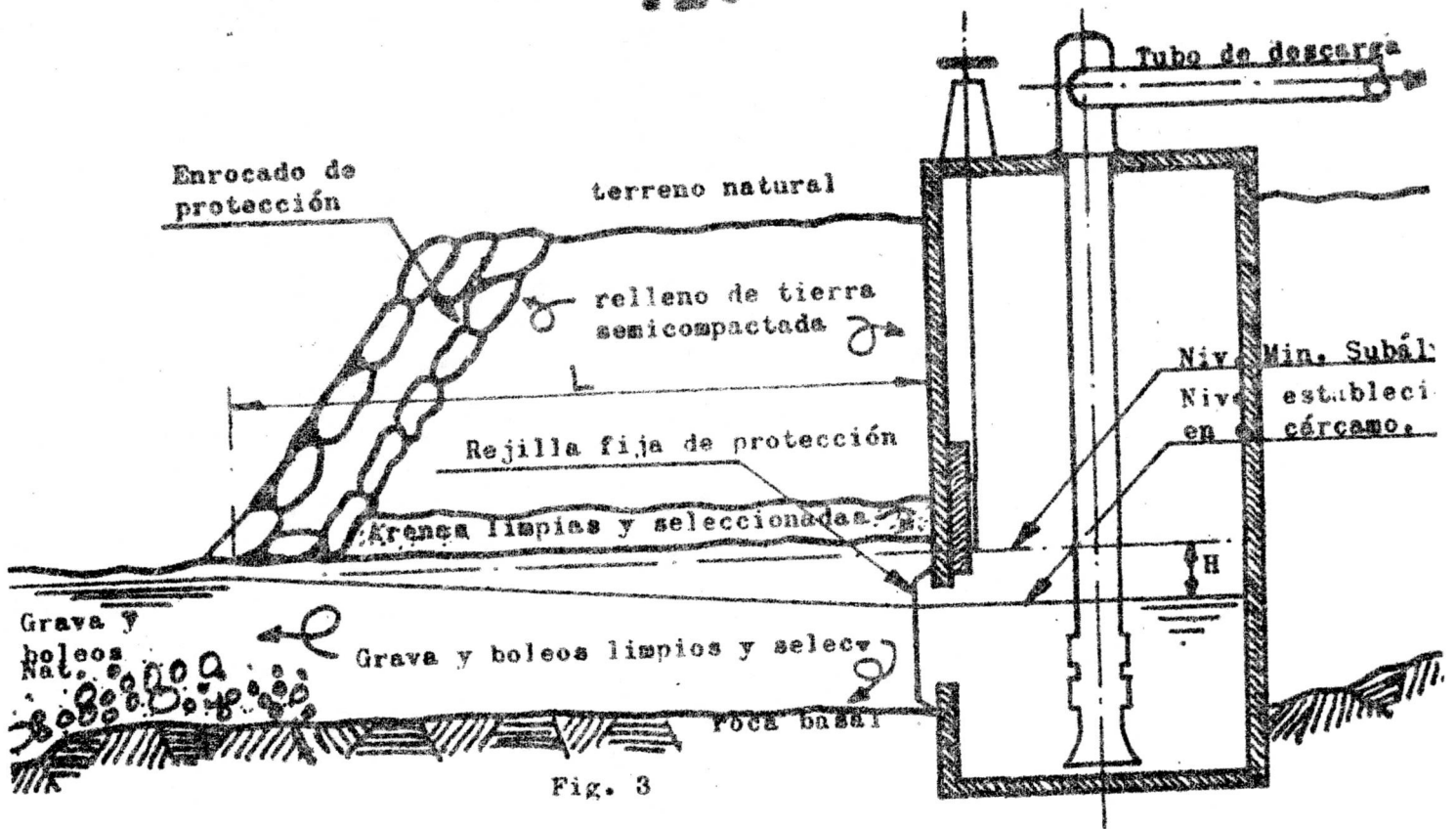
## CAPITULO II

CAUSAS QUE ORIGINAN LAS VARIACIONES QUE SUFREN LOS ACARREOS EN UN RIO A LO LARGO DEL MISMO Y CON DIFERENTES CAUDALES. CONCLUSIONES QUE PUEDEN SERVIR PARA LOS FINES DE ESTOS APUNTES. EJEMPLOS DE RIOS CON ACARREOS DE SOLIDOS Y ALGUNOS VALORES RELACIONADOS CON LA MECANICA EN EL AGUA, DE ALGUNOS MATERIALES

### 1. VARIACIONES QUE SUFREN LOS ACARREOS EN UN RIO

Aunque las observaciones sobre los arrastres de los ríos datan probablemente desde la iniciación del estudio de la Hidráulica, la mecánica de los sedimentos ha sido tan complicada que aun hoy en día se puede decir que no se conocen a fondo las leyes que rigen a estos movimientos. En términos generales se han seguido dos escuelas para definir las leyes de esta mecánica; la primera escuela teórica ha dado por resultado algunas ecuaciones sobre la mecánica de los arrastres que han sido comprobadas posteriormente por estudios experimentales, pero la escuela empírica es la que hasta la fecha ha encontrado más fórmulas aplicables a los estudios de los problemas que presentan los arrastres de sedimentos.

Basados en los estudios anteriores podemos sintetizar algunas conclusiones que pueden servir para la exposición que se pretende hacer; a grandes rasgos se puede definir los arrastres de los ríos como un transporte de sólidos y del producto de su desgaste que se origina a lo largo de su recorrido. Lo anterior implica que, a menor recorrido, se tendrán tamaños mayores que irán disminuyendo en peso y volumen hasta llegar a ser muy pequeños en la desembocadura de los ríos. Esta diferencia de tamaños ha sido estudiada por varios autores y se ha encontrado que sigue aproximadamente una función logarítmica cuya ecuación es:



$$W = W_0 e^{-\alpha L} \dots\dots\dots(6) (+)$$

en donde W = Peso o tamaño de las partículas en el lugar que se requiere conocer.

W<sub>0</sub> = Peso de la misma partícula en el origen de su arrastre.

e = Base logaritmos Neperianos

α = Coeficiente que depende de la naturaleza petrográfica del material analizado.

L = Longitud en kilómetros desde el origen al lugar donde se pretende conocer el promedio del volumen de las partículas analizadas.

Observaciones posteriores en algunos ríos europeos han dado resultados muy aproximadas a esta fórmula que aunque parezca un poco artificiosa, presenta una función de acuerdo con la realidad pues, por ejemplo, al analizar las observaciones de Von Hochenburger en el río Mur, Heyne (\*) obtuvo los siguientes resultados:

Kilómetro	0	10	26	56	85	120
Volumen de la partícula observada en cm <sup>3</sup> .	224	184	132	61	50	21
Volumen de la partícula calculada en cm <sup>3</sup> .	224	183,4	133.2	73.2	42.7	20.4

(Del cuadro anterior se refiere que el valor de α es aproximadamente igual a 0.0181 Km<sup>-1</sup>., para ese río y con un material determinado)

Con los resultados anteriores se obtiene como conclusiones que el problema de la captación de sedimentos es diferente y de acuerdo con el lugar del río que se pretende estudiar. A medida que más se alejen las tomas de los orígenes de los ríos se tendrán problemas con partículas más pequeñas, las cuales por su propia naturaleza, serán más difíciles de controlar.

Se pueden definir otros dos aspectos en la mecánica de los acarrees en los ríos; una es aquella en la que las velocidades nos producen erosiones y otra es en que estas velocidades al disminuir, producen decantaciones que hacen que a través de una serie de sucesión de años los

(+) Fórmula de H. Sternberg.  
 (\*) Introducción a la Hidráulica Fluvial - Serge Leliavsky.

cauces permanecen inalterables. Esto hace reflexionar a definir otra propiedad de los ríos y es que estos funcionan como unos simples conductores de las erosiones continentales hacia las partes bajas de los mismos. Por lo anterior, en un término de tiempo cualquiera, el agua que corre por los cauces siempre estará con determinada cantidad de azolves en arrastre, suspensión o decantación. Si se derivan las aguas tal como vienen en cualquier parte de un río no controlado siempre se derivarán parte o la totalidad de los azolves que lleva en su caudal.

También se observa que en una misma corriente la cantidad de arrastres por unidad de volumen varía de acuerdo con las estaciones. En las estaciones lluviosas al ser más caudalosos los ríos, se acarrea por consecuencia mayor número de sólidos y estos aumentan siguiendo también aproximadamente una función exponencial. Por consiguiente, los arrastres de fondo también se ven incrementados con una función similar, llegando algunos autores a relacionar este aumento en forma proporcional al séxtuplo de la velocidad media de los ríos.

Otras causas que originan una mayor o menor cantidad de azolves anuales en un determinado río, son la topografía de su cuenca, la naturaleza de los suelos, porcentaje de vegetación y la mayor o menor diferencia climatológica en las estaciones del año. Algunas causas físicas como son la deforestación o la mala conservación de los suelos en superficies explotadas, tienden a aumentar considerablemente estos acarreos. Es por esto muy necesario evitar el deforestar las hoyas y una cuidadosa planeación de la conservación de los suelos.

Un factor que tiende disminuir momentáneamente los grandes arrastres es la conservación adecuada mediante sistemas de escalonamiento de los arroyos en las partes altas de las cuencas. Pero de cualquier modo, aun en corrientes que se tengan controles estrictos sobre las erosiones de sus hoyas, se tendrá, después de un tiempo, más o menos acarreos de sedimentos que pueden perjudicar a los sistemas de aprovechamiento.

Las partículas coloidales, las cuales están formadas en su mayoría por material orgánico, son las únicas que no perjudican a la agricultura y que, al contrario, contribuyen en su aportación como abonos agrícolas. Estos materiales, por su misma naturaleza, son los más difíciles de evitar pero, por lo enunciado anteriormente se puede y se deben derivar hacia los terrenos agrícolas. Estas partículas coloidales se encuentran distribuidas en igual proporción en una misma sección transversal de un río. Esto da como consecuencia que si se toman aguas en la superficie o en el fondo de los ríos, siempre se estarán tomando en una misma sección transversal de un río una misma cantidad de partículas coloidales. Esta es una consecuencia que se aprovechará en las conclusiones de este capítulo.

Se ha adoptado en términos generales, el expresar el peso de los volúmenes de los sólidos totales, por un millón de partes de agua; la expresión de partes por millón se abrevia comúnmente "p.p.m.". Este número se determina de la siguiente manera: Se pesa la muestra y se evapora la totalidad del líquido; se determina el peso del residuo. El resultado requerido se obtiene multiplicando este peso por un millón y dividiendo el producto por el peso de la muestra original así:

$$\text{p.p.m. de s\u00f3lido seco} = \frac{\text{Peso seco} \times 1'000.000}{\text{Peso de la muestra original}} \dots\dots\dots (7) (*)$$

Con los conocimientos que se tienen de las variantes que sufre un r\u00edo a lo largo de su trayectoria, se pueden dividir en cuatro grandes partes a saber: (ver fig. 6).

a) INICIACION DE LOS RIOS. PEQUE\u00d1OS ARROYOS

1. Pendientes muy fuertes y variables. Saltos de agua (cascadas) que provocan fuertes erosiones.
2. Cauces angostos pero bien definidos en el fondo de los talwegs. Las crecientes no inundan grandes superficies por estar sus cauces enca\u00f1onados.
3. R\u00e9gimen hidr\u00e1ulico muy variable y siempre turbulento. L\u00e1minas de agua peque\u00f1as. Variaciones bruscas en sus caudales.
4. En estiajes cuando hay escurrimiento, las aguas son muy claras, exentas de part\u00edculas coloidales. Las l\u00e1minas de agua se pierden en tramos dentro de los materiales estables del fondo. Cuando el escurrimiento no existe, pr\u00e1cticamente desaparecen los dep\u00f3sitos de agua sub\u00e1lveas. Los materiales s\u00f3lidos, formados en su mayor parte por cantos rodados grandes, gravas y arenas gruesas, permanecen estables en el fondo de los cauces. No existen los fen\u00f3menos de arrastre de fondo saltaci\u00f3n o suspensi\u00f3n. No hay forma de aprovechar los escurrimientos por falta de caudales estables y por lo accidentado de la topograf\u00eda donde generalmente nacen estos arroyos.
5. Cuando crecen los arroyos, existe un movimiento de traslaci\u00f3n de los materiales s\u00f3lidos, en las tres formas enunciadas, por los movimientos de los arrastres de fondo son muy discontinuos. Los s\u00f3lidos que entran en proceso de saltaci\u00f3n se mueven a la misma velocidad del agua. Existen muy pocos s\u00f3lidos en suspensi\u00f3n y pocas part\u00edculas coloidales. Pr\u00e1cticamente no hay separaci\u00f3n de estos movimientos, pero se puede anotar que en la superficie del agua se encuentran las arenas de menor tama\u00f1o. Las velocidades del agua son muy fuertes y el proceso de erosi\u00f3n es muy notorio, quebr\u00e1ndose, en ocasiones, los s\u00f3lidos de gran tama\u00f1o.

b) ARROYOS

1. Pendientes y velocidades menos fuertes, pero aun turbulentas.
2. Cauces menos angostos empezando a querer divagar. Las crecientes empiezan a inundar peque\u00f1as vegas de los arroyos.

---

(+) Sewerage and Sawage treatment, Handerberg 3th edition.

3. Régimen hidráulico menos variable y turbulento. Menores variaciones en los caudales. Láminas de agua aun pequeñas. En estos tramos ya se empiezan a aprovechar derivaciones para pequeños aprovechamientos agrícolas y producción de energía eléctrica.
4. En los estiajes ya se puede aprovechar aguas subálveas con derivaciones. Las aguas superficiales, aun se encuentran con pocos sólidos en proceso de acarreo. Empieza a notarse la presencia de partículas coloidales y los materiales de fondo están formados por gravas y arenas gruesas. En estiajes permanecen estables pero cuando existen pequeñas láminas de agua se observan claramente los arrastres de fondo en láminas muy delgadas.
5. En avenidas se incrementa notablemente los arrastres de fondo y los sólidos en saltación, pero ya empiezan a disgregarse las arenas más finas que se mueven a todo lo alto de la lámina de agua, no así las arenas gruesas y las gravas que se mueven por el fondo. Aumento de partículas coloidales. Para evitar el captar materiales sólidos que en su mayoría son gruesos, bastará con operar adecuadamente los mecanismos desarenadores, tales como los canales de limpia que se instalan en las presas de derivación.

e) RIOS

1. Pendientes suaves ligeramente mayores que las requeridas en los canales de riego. Velocidades del agua más continuas y tirantes menos variables.
2. Cauces bien definidos pero divagantes. Las avenidas producen inundaciones en los valles que atraviesan estas corrientes. En estos tramos donde se encuentran los mayores aprovechamientos para irrigación.
3. Régimen hidráulico más constante pues ya se nota la influencia de las aguas subálveas de los arroyos y de los depósitos marginales. Los aforos se pueden ejecutar con más precisión y son sus bancos de materiales los más utilizados en construcción.
4. En los estiajes, los materiales sólidos del fondo se encuentran estables, pero después de las avenidas se producen cambios de lugar de los bancos de depósito de materiales que pueden ser localizados. Los bancos iniciales aguas arriba son sustituidos por nuevos bancos que eyectan los arroyos aguas abajo de los conos de eyección. La lámina de arrastre de fondo aun es muy pequeña pero más bien definida que en los arroyos. Empieza a notarse el fenómeno de saltación. Las aguas empiezan a colorearse por aumento de partículas coloidales. En aquellos ríos que la lámina de aguas es suficiente para derivar los gastos deseados no se construyen presas de derivación. Las aguas superficiales se encuentran casi limpias de arenas.

Si se toman aguas cercanas al fondo se tiene el peligro de captar parte de los sólidos en saltación y arrastre de fondo que, como se verá más adelante, tienen un mayor porcentaje de sólidos, por unidad de volumen de agua. En los ríos generalmente existen grandes depósitos de aguas subálveas que pueden ser aprovechadas, pues el espesor de los bancos llega a ser considerable. Los materiales de estos bancos están formados por gravas, gravillas y arenas, lo que facilita la captación de las aguas. Cuando en un río se observa un pequeño escurrimiento, se puede colegir que todo el banco está saturado. Esta agua subálvea está en constante movimiento pero muy lento y se restituye generalmente por los desechos de las aguas marginales que dejan los ríos en sus avenidas y por aguas subálveas de bancos situados aguas arriba.

5. En avenidas los materiales de fondo se empiezan a mover en forma continua variando sus espesores y en proporción a los tirantes del río. Los materiales en suspensión aumentan notablemente pues se confunden a veces los límites de la lámina de influencia de los sólidos en saltación con las arenillas y limos en suspensión continua. Generalmente las láminas de agua son suficientes para derivar los caudales requeridos. Al igual que en las divisiones anteriores, las aguas superficiales son aquellas que se encuentran con menor proporción de sólidos en cualquier momento dado con relación a los sólidos totales. Las derivaciones que quedan cerca del fondo, invariablemente captan los mayores porcentajes de azolves, por captar principalmente los arrastres de fondo. Aumento considerable de partículas coloidales. En estas condiciones es cuando se producen los mayores arrastres de materiales y es cuando se captan los mayores volúmenes de sólidos por las bocatomas en funcionamiento.

d) DESEMBOCADURA DE LOS RIOS. RIAS

1. Pendientes de fondo sumamente pequeñas y en ocasiones existen contrapendientes. Las velocidades son pequeñas y en aquellos lugares cerca de la desembocadura, en los estiajes. Se notan cambios de dirección de las aguas originadas por las mareas. Los tirantes son profundos y de muy poca variación. Los ríos grandes se aprovechan para tránsito fluvial.
2. Los cauces se presentan bien definidos pero muy divagantes. En avenidas se producen grandes inundaciones, por falta de capacidad en los cauces. En estos tramos ya no existen aprovechamientos de sus aguas, principalmente por estar contaminadas con sólidos en solución y por el carácter de los suelos que atraviesan las rías.

3. En estiajes, los arrastres de fondo se mueven en forma continua pero muy lentamente. Desaparece el fenómeno de saltación y hay un gran aumento de partículas coloidales. La lámina de influencia de los arrastres de fondo se encuentra permanentemente definida. Los materiales de fondo lo constituyen principalmente limos y arcillas (fangos) y no se encuentran gravas ni arenas que pudiesen ser empleadas para construcción.
4. Tampoco se pueden explotar aguas del subálveo por la condición fangosa de estos arrastres y por la concentración de sólidos en solución.
5. En avenidas aumenta el espesor de los arrastres de fondo, disminuyendo su concentración de sólidos por unidad de volumen de agua pero aumentando considerablemente los sólidos en suspensión. El proceso de sólidos en saltación se confunde con los acarrees por suspensión, pero siempre en la parte superior de las rías al igual que en todas las consideraciones anteriores se encuentran menores porcentajes de sólidos en proceso de acarreo en relación con los sólidos totales. La turbidez del agua aumenta considerablemente. En ciclos más o menos definidos para cada ría se produce el rompimiento de los bancos de fango y se precipitan al océano. Igual que en la condición de estiaje anotados anteriormente, no se pueden aprovechar estas aguas, por sus concentraciones de sales. Por la poca pendiente de sus cauces es difícil la rectificación de los mismos.

e) VARIACIONES DE PORCENTAJES DE SÓLIDOS POR UNIDAD DE VOLUMEN DE AGUA A LO ALTO DE UNA SECCIÓN CUALQUIERA DEL CAUCE DE UN RÍO

Después de esta diferenciación aproximada del comportamiento de los sólidos a lo largo de un río, se expondrá a continuación y también en forma aproximada, la distribución de estos, a lo alto de cualquier sección (supongamos una columna cuadrada de base igual a la unidad, alojada dentro del mismo cuadro de análisis "A" de la figura 6).

Para una mejor comprensión de la distribución de los sólidos a lo alto de la columna hipotética, se supondrá un río cualquiera que en un momento dado acarrea un peso igual a 1.200 p.p.m. (ver fig.6A).

El volumen total de sólidos acarreados en un segundo será:

$$K = 1.200 Q \dots\dots\dots (A)$$

Este valor se encuentra representado por el área comprendida en la gráfica anterior y las coordenadas bases. En este ejemplo dividiremos la ordenada en diez partes iguales a 0.1e. Al mismo tiempo se supone también que los valores de los porcentos de p.p.m., son los anotados en la gráfica.

Por lo anterior se tiene entonces que:

$$K = k_1 + k_2 = k_3 \dots\dots\dots + k_{10} \dots\dots\dots (B)$$

Si en un momento cualquiera se deriva la totalidad del gasto Q, se estará derivando por lo tanto la totalidad de los sólidos K. Pero su poniendo que derivemos únicamente 0.1Q, este caudal puede tomar diferen tes valores de k, de acuerdo con la distancia al fondo del río en que ejecute la derivación. Si esta se produce en la superficie, se estará derivando un porcentaje igual a  $k_1 = 0.2K = 0.2 \times 1200 = 240$  p.p.m. y en cambio si se deriva en el fondo, el porcentaje será:  
 $k_{10} = 2.5K = 2.5 \times 1200 = 3000$  p.p.m.

De estos análisis aproximados del comportamiento de los sólidos acarreados por un río en sus diferentes partes y alturas, se observa que la mecánica de sus movimientos, tiene un factor común y es el que las aguas superficiales invariablemente contienen una menor proporción de sólidos, sea cual fueren las condiciones o el lugar del río analizado. Lo anterior nos dá una conclusión importante: el que si se derivan úni camente las aguas superficiales de los ríos se estará derivando un menor porcentaje de sólidos en proceso de acarreo. Como esta lámina superfi- cial siempre cambia de nivel al variar las condiciones de caudal en los ríos, será necesario instalar algunos mecanismos para lograr que esa condición fluctuante se estabilice en una sola carga de entrada a las bocatomas. En el capítulo correspondiente a la instalación de estos meca- nismos se expondrá, con mayor detalle, las sugerencias para lograr este propósito.

2. Para concluir este capítulo, a continuación se anotan las propor ciones de material sólido que acarrear algunos ríos conocidos.

NOMBRE DEL RIO, LUGAR Y CONDICIONES EN QUE SE EFECTUA EL AFORO	p.p.m.
Mississippi, próximo a la desembocadura, en creciente.....	1.750
Mississippi, próximo a la desembocadura, en estiaje.....	670
Colorado, en Yuma, promedio anual.....	5.600
	a
	<b>14.200</b>
Rín, Alemania, en creciente.....	10.000
Po, en Italia, en creciente.....	3.300
Nilo, Egipto, en creciente.....	1.500
Magdalena, Colombia, en creciente.....	1.850
Ganges, India, en creciente.....	1.300
	a
	8.000

Observaciones hechas en La India muestran que para un sedimento determinado en cualquier sección del cauce de un río o de un canal, existe una velocidad crítica Vs con la cual los sólidos no se elevan ni depositan. Si esta velocidad aumenta se produce el arrastre de sólidos y si disminuye se produce la sedimentación. Esta velocidad crítica depende de la profundidad y está dada por la ecuación:

$$V_s = m.d. 0.64 \dots\dots\dots (8) (+)$$

en donde  $V_s$  = Velocidad crítica

= Coeficiente que depende del volumen medio de los materiales.

d = Profundidad o tirante del cauce del canal.

Algunos valores de "m" se anota a continuación:

Para sólidos formados por arenas ligeramente finas.....	0.82
Arenas gruesas.....	0.90
Gravillas y arenas.....	0.99
Gravillas y gravas.....	1.07

La potencia transportadora de sólidos de una corriente se dice que varía como  $v^{2.56}$

Se entiende como velocidad límite de fondo, aquella velocidad que inicie el transporte de materiales. Se anota algunas de estas obtenidas experimentalmente:

MATERIALES	VELOCIDAD EN EL FONDO
Arcilla suelta	0.1 m/seg.
Limo	0.2 m/seg.
Arena	0.3 m/seg.
Grava fina	0.6 m/seg.
Grava mediana	0.7 m/seg.
Grava gruesa	0.8 m/seg.
Cantos rodados chicos	1.3 m/seg.

Finalmente anotamos las velocidades de descenso de algunos materiales finos en aguas quietas:

Arcillas limpias para hacer	0.0005 m/s.
Ladrillo	0.05 m/s.
Arenas medianas de agua dulce	0.06 m/s.
Gravas medianas	0.3 s/s.

(+) Manual de Merriman, Pág. 1350 Quinta Edición.

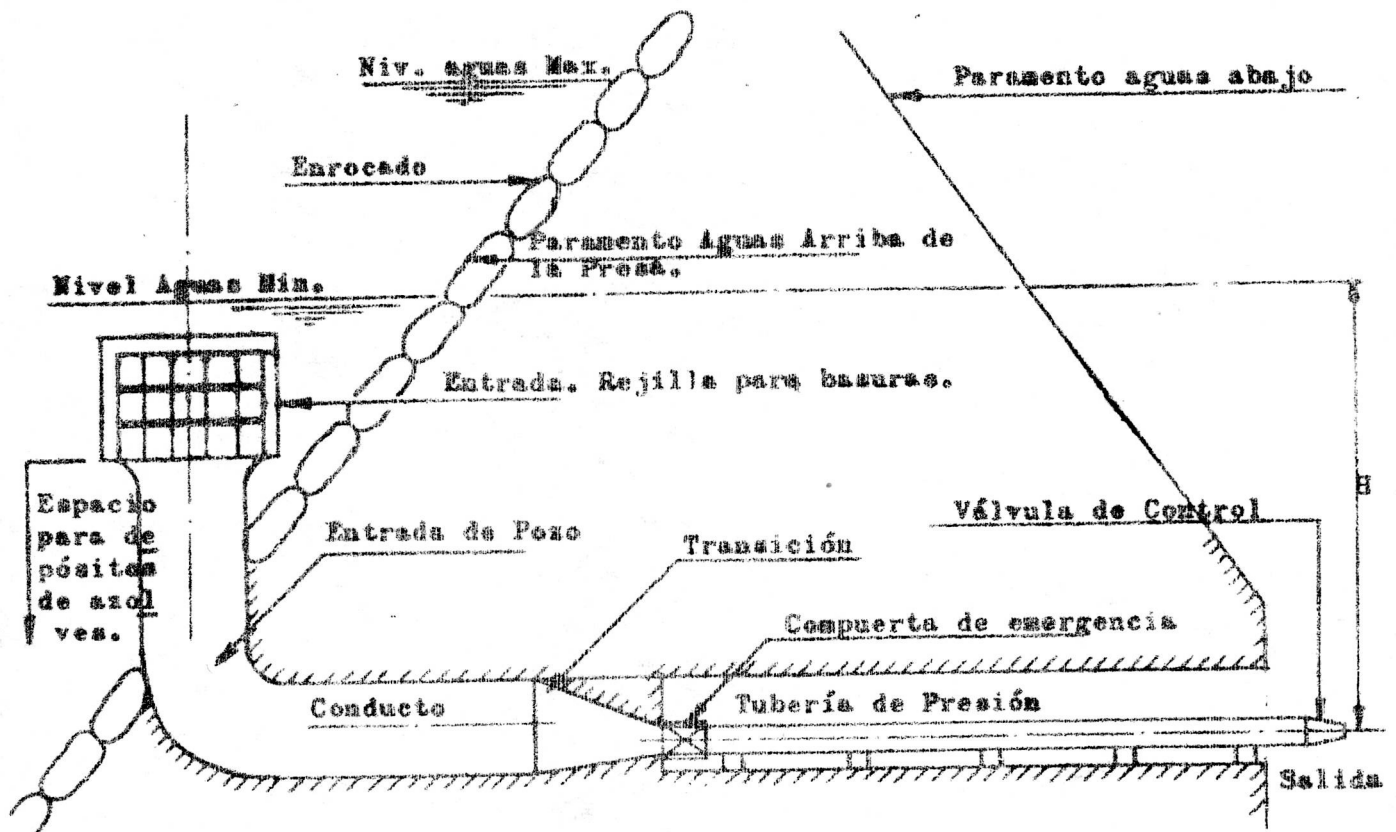


Fig. 5

### CAPITULO III

#### ANALISIS DE FUNCIONAMIENTO DE PRESAS DERIVADORAS, INFLUENCIA QUE TIENE LA OPERACION DE ESTAS ESTRUCTURAS SOBRE LOS MATERIALES SOLIDOS EN PROCESO DE ACARREO. DISPOSITIVOS DETENEDORES DE SEDIMENTOS. COSTOS DE CONSERVACION EN ALGUNOS DISTRITOS QUE PADECEN ESTE PROBLEMA

1. Al construirse una presa de derivación sobre un río cualquiera ocurre, en un tiempo muy corto, el azolvamiento aguas arriba de la cortina vertedora, fenómeno que llega hasta la intersección del plano que confina la parte superior de estos azolves, con la superficie inclinada que forma el cauce natural del río. Cuando esto sucede se modifica la pendiente del río en este tramo azolvado pero ya estabilizado se puede decir que ese cono de sedimentos actúa como parte de la estructura derivadora (ver fig. 7). Debido a lo anterior, el río queda confinado en una sección que tiene como fondo la superficie de esos azolves y a los lados las obras de protección de las márgenes que estas estructuras requieren.

Como el fondo de esta sección es más o menos horizontal y su ancho muy grande con respecto a la altura, se puede decir que cualquier gasto "Q" que escurra el río, se distribuye uniformemente a todo lo ancho de esta sección. Si ese caudal "Q" acarrea consigo un determinado volumen "K" de sólidos, también este volumen se distribuye aproximadamente en toda la sección mencionada y por consiguiente en la sección vertedora que forman la cortina derivadora con los muros que la limitan.

La superficie del azolve de depósito aguas arriba de la cortina se ve interrumpida por los canales de aducción que invariablemente se forman al corto tiempo de operar, en condiciones normales, los canales desarenadores y/o las bocatomas que se encuentran alojadas en ellos. Estos canales de aducción se van desvaneciendo a medida que se acercan hacia el centro del río y convergen hacia el formando una curva de radio muy amplio (ver fig. 8).

Analizando el funcionamiento de una presa de derivación se puede considerar que esta sufre, principalmente, dos condiciones a saber:

- A - Cuando la presa deriva la totalidad del caudal del río, y
- B - Cuando el caudal es mayor que los gastos derivados y el excedente continúa hacia abajo por el río.

En la primera condición los canales desarenadores cumplen eficazmente su función, pues los pequeños arrastres de fondo quedan atrapados en ellos. Al mismo tiempo, se origina un proceso de sedimentación de sólidos en suspensión y saltación que da por resultado captar aguas con un mínimo de sólidos. Este proceso se hace más eficaz, mientras más alta sea la presa de derivación y el orificio de la toma se encuentre más alejado del fondo de los tanques desarenadores (condición que observamos en las tomas en presas de almacenamiento) pero siempre es necesaria una correcta operación de estos canales, tal como se verá más adelante.

La segunda condición modifica en parte el proceso de sedimentación de los sólidos en saltación y suspensión, por lo que, la captación de estos, aumenta proporcionalmente a la magnitud de la avenida, y en ocasiones, se llegan a introducir en las tomas partes de los arrastres de fondo, agravándose este problema con las mayores velocidades, que forzosamente se tienen en las tomas al afectarlas un mayor tirante (ver fig. 9). Este fenómeno podemos anotar que ocurre siempre se tengan las compuertas abiertas o cerradas, variando únicamente la magnitud de la captación de sólidos con la abertura de la compuerta de limpia.

Consideramos ahora una presa de derivación sin canales desarenadores y sin tomas (fig. 10). Si está pasando un gasto "Q" por encima de la presa también estará pasando un volumen de sólidos "K" proporcional a este gasto. Con la consideración de sección uniforme el gasto por unidad de longitud será:

$$q = \frac{Q}{L} \dots\dots\dots(9)$$

Siendo L la longitud de la cresta vertedora.

Por la misma condición  $k = \frac{K}{L} \dots\dots\dots(10)$

Si abrimos ahora un canal (como los desarenadores) en una de las márgenes del río, de un ancho igual a la unidad e instalamos una toma en el fondo al final de esta conducción que derive un gasto igual a "q" (ecuación 9), automáticamente estaremos derivando un volumen de sólidos igual a "k'" (ecuación 10).

Instalamos ahora una compuerta que bote las aguas al río y provoque un gasto igual a "nq". Siguiendo la misma secuela, pasará por el canal un volumen de sólidos igual a "nk". En teoría la toma deberá seguir captando únicamente "k" de sólidos puesto que sigue derivando el mismo gasto "q", pero en la práctica esto no sucede pues al aumentar el volumen de azolves en "nk" veces y no variar el ancho del canal de llamada da, forzosamente tiene que aumentar el espesor de la lámina de influencia de los arrastres de fondo y por lo tanto la toma estará derivando un mayor porcentaje "n'k" de sedimentos.

Al mismo tiempo que aumenta el gasto en esa unidad de longitud considerada, disminuye el gasto unitario sobre la presa y por consiguiente la proporción "k". Esta disminución podemos describirla así:

$$Q' = Lq - nq \dots\dots\dots(A)$$

$$q' = \frac{Q'}{L-1} = \frac{Lq - nq}{L-1} = q \left( \frac{L-n}{L-1} \right) \text{ y por lo tanto también:}$$

$$k' = k \left( \frac{L-n}{L-1} \right) \dots\dots\dots(B)$$

Siendo q' y k' los nuevos valores por unidad de longitud sobre la presa.

Consideremos ahora la margen contraria y se supone que se abre otro canal marginal con las mismas dimensiones al anterior y se instala una toma similar que capte otro gasto "q" sin dejar pasar en esa unidad de longitud ningún gasto al río. Esta toma estará captando un porcentaje de sólidos iguales a k' o sean un porcentaje menor que la toma N° 1, ya que k' < k.

Generalizando la ecuación (B) se tiene:

$$K' = k \frac{(L-n)}{L-1} \dots\dots\dots (11)$$

Siendo l = ancho del canal desarenador.

Analizando la ecuación obtenida se puede concluir que:

- a) En una presa de derivación que opere un río con caudales mayores que sus derivaciones se puede regular a voluntad un mayor o menor número de captación de sólidos por sus tomas.
- b) Para lograr una menor captación de sólidos en una margen es necesario aumentar el gasto al río por las compuertas desarenadoras de la margen contraria.
- c) Siempre que las condiciones lo permitan se deben operar las bocatomas con las compuertas de su canal desarenador, totalmente cerradas.
- d) El factor de disminución de captación de sólidos para una toma es directamente proporcional a la longitud de la presa en cuestión e inversamente proporcional al gasto obtenido en la margen contraria en el canal desarenador.

Para una mejor comprensión de las conclusiones de este último análisis, a continuación se hará un ejemplo numérico.

Suponiendo  $Q = 1000 \text{ M}^3/\text{s}.$

$$p.p.m. = 2000$$

$$L = 100 \text{ m}.$$

$$\text{De lo anterior } K = \frac{1000 \times 2000}{1'000.000} = 2 \text{ M}^3/\text{s} = 2000 \text{ L/s}.$$

$$k = \frac{2000}{100} = 20 \text{ L/s}.$$

y

$$q = \frac{1000}{100} = 10 \text{ M}^3/\text{s}.$$

Si en estas condiciones abrimos una toma que derive 50 M<sup>3</sup>/s., se estará derivando un volumen de sólidos igual a:

$$\frac{50 \times 2000}{1'000.000} ;= \frac{10^5}{10^6} = 0.1 \text{ M}^3/\text{s.} = 100 \text{ L/seg.}$$

Si se abren las compuertas desarenadoras de la margen contraria produciendo un gasto igual a 200 M<sup>3</sup>/s., y el ancho de estas compuertas es igual a 5 m. se tendrá:

$$k' = k \frac{L - n}{L - 1} = 20 \times \frac{100 - 20}{100 - 5} = \frac{20 \times 80}{95}$$

$$k' = 16.8 \text{ L/seg.} \quad k = 20 \text{ L/seg.}$$

Por lo anterior se tiene que el volumen de sólidos totales derivados es igual a  $16.8 \times 50 = 84 \text{ L/s.}$  100 L/seg. o sea que se ha disminuído la captación de sedimentos únicamente con operar las compuertas desarenadoras de la margen contraria.

El ejemplo anterior se hizo bajo la base de una presa hipotética en donde los canales desarenadores no actúan como tales por estar las tomas mencionadas alojadas en el fondo de dichos canales. Es obvio que el captar las aguas a mayor distancia del fondo se aleja el peligro de captar los arrastres de fondo, pero de cualquier manera y según observamos en el funcionamiento analizado con anterioridad, si no se opera adecuadamente una presa derivadora, se corre el peligro de captar una mayor cantidad de sólidos que los que captaría una toma en condiciones normales. Como un ejemplo de la bondad del análisis de operación antes descrito, podemos anotar el canal principal de riego del Valle de Pergana, en la República Socialista de Usbekistán, cuya toma se encuentra alojada en la margen derecha de la presa de derivación sobre el río Narbin y los canales desarenadores (y que también sirven como excedentes de caudales del propio río), se encuentran alojados en la margen izquierda (+). Tomemos entonces este análisis de la operación de presas derivadoras como otro de tantos factores que nos servirán para que al final se tenga una estructura que capte un menor número de sedimentos en proceso de traslación.

## 2. DISPOSITIVOS DETENEDORES DE SOLIDOS

En este repaso no se mencionarán las estructuras decantadoras de sedimentos llamados comúnmente desarenadores y que se instalan aguas abajo de las bocatomas, pues como se ha explicado a lo largo de estos apuntes, el objeto de estos es el obtener unos dispositivos que dejen los sedimentos en el propio cauce del río.

---

(+) Datos proporcionados por el Ing. Carlos Gutiérrez Tobón. INCORA

Por lo anterior únicamente se recordarán los mecanismos o trampas que se han experimentado con éxito y que se encuentran aguas arriba de las bocatomas. Estas experiencias han sido llevadas a cabo generalmente en modelos reducidos antes de su instalación en las estructuras que han sufrido estos problemas (como en represas Superior Courtland en el río Missouri en Nebraska, E.U.A.) y su estudio intensivo se puede encontrar en las publicaciones que al respecto ha hecho el Bureau of Reclamation de los Estados Unidos.

Uno de estos mecanismos consiste en instalar paredes de guía curvas (ver fig. 11) lo que origina que los arrastres de fondo más gruesos se depositen junto a la pared guía, dejando más limpia el agua en la periferia que es donde se instala la bocatoma. Este procedimiento ha dado buenos resultados cuando se tiene agua sobrante y una carga de desalojamiento adecuada. Cuando se tiene que desviar la totalidad del agua del río, la limpieza se puede hacer en forma intermitente, pero el funcionamiento es más adecuado trabajando en forma continua.

Otro mecanismo experimentado con cierto éxito ha sido el colocar una pantalla que sirve de esclusamiento inferior (ver fig. 12) y cuyo objeto es el aislar los arrastres del fondo que acarrea el río. Este dispositivo, también se menciona posteriormente con algunas modificaciones que suponen harán más efectivo su funcionamiento.

Las guías de fondo (ver fig. 13) también han dado algunos resultados positivos. Estas guías se sugerirán como adición a la estructura de "Toma directa al río" y en cambio las guías superficiales se prepondrán a las "Tomas Auxiliares de Presas de Derivación" (Ver capítulo siguiente).

Existen algunos otros mecanismos experimentados en modelos hidráulicos pero aún no se tienen datos precisos sobre su resultado y que además requieren siempre la ayuda de cargas adicionales provocadas por presas de rivadoras y necesitan un exceso de agua para desalojar los sólidos decantados. En estos apuntes tampoco los mencionaremos así como también a otros mecanismos que requieren la instalación de fuerzas adicionales mecánicas para operarlos.

#### IV COSTOS QUE REPRESENTAN LOS SEDIMENTOS

Los costos que los sedimentos representan para algunos distritos llegan a ser sumamente altos. Por ejemplo en los distritos de riego de Coello y Saldaña, en Colombia, se gastan \$ 50.000.00 U.S., en su conservación anual y se tienen que remover cerca de 100.000 m<sup>3</sup>. de sedimentos aguas abajo de las bocatomas. Esto nos da una idea aproximada de que el costo por m<sup>3</sup>. es de 0.50 \$ U.S. costo que coincide con el promedio obtenido en los Estados Unidos en aquellos distritos que padecen este problema (de U.S. 0.20 a U.S. 0.60 yd<sup>3</sup>). Lo anterior debe producir mayores inquietudes en la búsqueda de mejores soluciones al problema pues como se podrá colegir llega a ser, en ocasiones, el factor más costoso y difícil en la operación de un distrito de riego.

CAPITULO IV

RECOPIACION DE TODOS LOS FACTORES EXPUESTOS ANTERIORMENTE QUE TIENDEN A EVITAR CAPTACION DE SOLIDOS. DISPOSITIVOS QUE SE SUGIERE SE INSTALEN EN LAS NUEVAS BOCATOMAS. TOMA AUXILIADA CON PRESA DE DERIVACION Y TOMA DIRECTA AL RIO (TOMA INCORA). OPERACION

1. Haciendo un resumen de los factores que intervienen en detener o desviar los sólidos en los ríos no controlados, se puede anotar:

- a. Mientras más alejadas se encuentren las tomas del fondo de los ríos, se captarán sedimentos con un menor número de sólidos por volumen de agua.
- b. Las aguas subálveas que se deriven estarán siempre exentas de sedimentos.
- c. Si se estandariza la velocidad de entrada del agua por las tomas, se evitará el tomar mayores porcentajes de sólidos por los aumentos de velocidad al reducir las áreas hidráulicas para obtener un mismo gasto.
- d. La operación adecuada de las presas de derivación, evitará tomar porcentajes mayores de sólidos en proceso de acarreo.
- e. Si se añaden algunos dispositivos como los expuestos en el último capítulo, también se estará reduciendo esta captación de sólidos.

Considerando ahora una toma común alojada en una presa de derivación tal como la expuesta en el subcapítulo IV del primer Capítulo (ver fig. 14) el vertedor fijo que esté alojado al principio de la transición de entrada (marcado con "A"), se puede hacer de cresta móvil mediante dos procedimientos:

- a. Abriendo unas ranuras para colocación de agujas de madera las cuales formarán la cresta móvil. En estas condiciones siempre se podrá tener una carga " $h_1$ " fija aguas arriba del vertedor (ver fig. 14).
- b. Cuando las variaciones del río sean demasiado bruscas y frecuentes, entonces se pueden instalar además unas compuertas deslizantes (C" en la fig. 14), que actuando en la forma indicada producen el mismo resultado que las agujas de madera.

Las guías de fondo (ver fig. 13) también han dado algunos resultados positivos. Estas guías se sugerirán como adición a la estructura de "Toma Directa al Río" y en cambio las guías superficiales se propondrán en las "Tomas Auxiliares de Presas de Derivación" (ver capítulo siguiente).

Existen algunos otros mecanismos experimentados en modelos hidráulicos pero aún no se tienen datos precisos sobre su resultado y que además requieren siempre la ayuda de cargas adicionales provocadas por presas derivadoras y necesitan un exceso de agua para desalojar los sólidos decantados. En estos apuntes no los mencionaremos como tampoco otros mecanismos que requieren la instalación de fuerzas adicionales mecánicas para operarlos.

## 2. COSTOS QUE REPRESENTAN LOS SEDIMENTOS

Los costos que los sedimentos representan para algunos distritos - llegan a ser sumamente altos. Por ejemplo en los distritos de riego de Coello y Saldaña, en Colombia, se gastan US\$ 50.000 en su conservación anual y se tienen que remover cerca de 100 M<sup>3</sup>. de sedimentos aguas abajo de las bocatomas. Esto nos da una idea aproximada de que el costo por M<sup>3</sup> es de 0.50 US., costo que coincide con el promedio obtenido en los Estados Unidos en aquellos distritos que padecen este problema (de US 0.20 a US 0.60 Yd<sup>3</sup>.). Lo anterior debe producir mayores inquietudes en la búsqueda de mejores soluciones al problema pues como se podrá colegir llega a ser, en ocasiones, el factor más costoso y difícil en la operación de un distrito de riego.

Ahora bien, si instalamos un cuerpo filtrante utilizando el piso de la bocatoma y la pared vertical de canal desarenador (D"D" en la misma figura), al existir una diferencia de carga  $h'$  (la cual se puede también regular puesto que para producir el gasto "q" necesario únicamente requerimos  $h_2$ ) se tiene un gradiente el cual, aplicado en la Ley de Darcy  $q' =$

$$A i = b.l.k. \frac{h'}{e} \dots\dots\dots (A)$$

siendo:  $b =$  longitud real de la cara del filtro expuesta al río.

$l =$  altura real de la misma cara.

$K =$  coeficiente de permeabilidad del filtro.

$e =$  distancia promedio de la cara expuesta al río al centro del orificio.

La regulación definitiva se puede controlar por la compuerta deslizante "E" como la operación de una toma común y corriente. Esta operación la analizaremos con más detalle en el Subcapítulo III.

Como adición a un mejor funcionamiento la loza de esclusamiento en los canales de limpia, se sugiere que esta sea construida en forma dentada y discontinua para que se puedan sedimentar los sólidos en proceso de decantación y servir además como pantalla en el desarenador. Esta loza debe ser empotrada (tal como lo indica el detalle H en la misma fig. 14) para dejar deslizar a las compuertas que sirven de vertedor variable "C".

También se puede prever que en grandes avenidas cuando se está tomando parte del gasto por encima del vertedor de cresta móvil, se introduzcan sólidos flotantes dentro de la recámara "F". Esto se puede evitar con una pared guía superior tal como se indica en la misma fig. 14 (marcada con la letra "C"). En captaciones en estiaje, este problema se reduce y en avenidas, esta guía superior ayudará además a desviar y decantar los sólidos que se encuentren en la superficie de las aguas en proceso de suspensión y saltación.

### 3. LA TOMA DIRECTA AL RIO. TOMA INCORA (Ver Fig. 15)

- a. La cresta móvil formarla con compuertas de tipo "clapet" que producen el mismo efecto que las agujas de madera (Usines Hydrauliques, H. Varlet, Pág. 191-1962).
- b. El mecanismo filtrante alojarlo en la parte inferior de la bocatoma, dentro de la zona permeable y saturada de aguas subálveas.
- c. Aprovechando como base el final de este filtro, instalar una pared guía para confinar esta zona y ayudar al mismo río a limpiar los sedimentos que pudieran depositarse en esa área.
- d. Instalar en forma fija, unas paredes guías inferiores tales como las anotadas en la figura 15 con la letra "B", aguas arriba de la bocatoma.
- e. La compuerta reguladora de caudales funcionará en la misma forma que la toma anterior.

### III. OPERACION DE LAS COMPUERTAS ANTERIORES

La operación de ambas compuertas es similar, pues la idea es aprovechar a su máximo el filtro adicional inferior, el cual nos proveerá de agua totalmente limpia de azolves. Como el gasto que se necesita derivar será casi siempre superior a lo que el filtro pueda proporcionar, se bajarán las compuertas que forman el vertedor móvil hasta que se produzca el gasto adicional requerido.

Se supone que el funcionamiento anterior es compatible con los movimientos del río, pues, generalmente se requiere derivar el gasto máximo en un distrito de riego cuando el río se encuentra en estiaje. En este momento ni el filtro ni las compuertas vertedoras cumplen su función, pero ya se observó que en aguas mínimas, los ríos acarrearán un mínimo de sólidos.

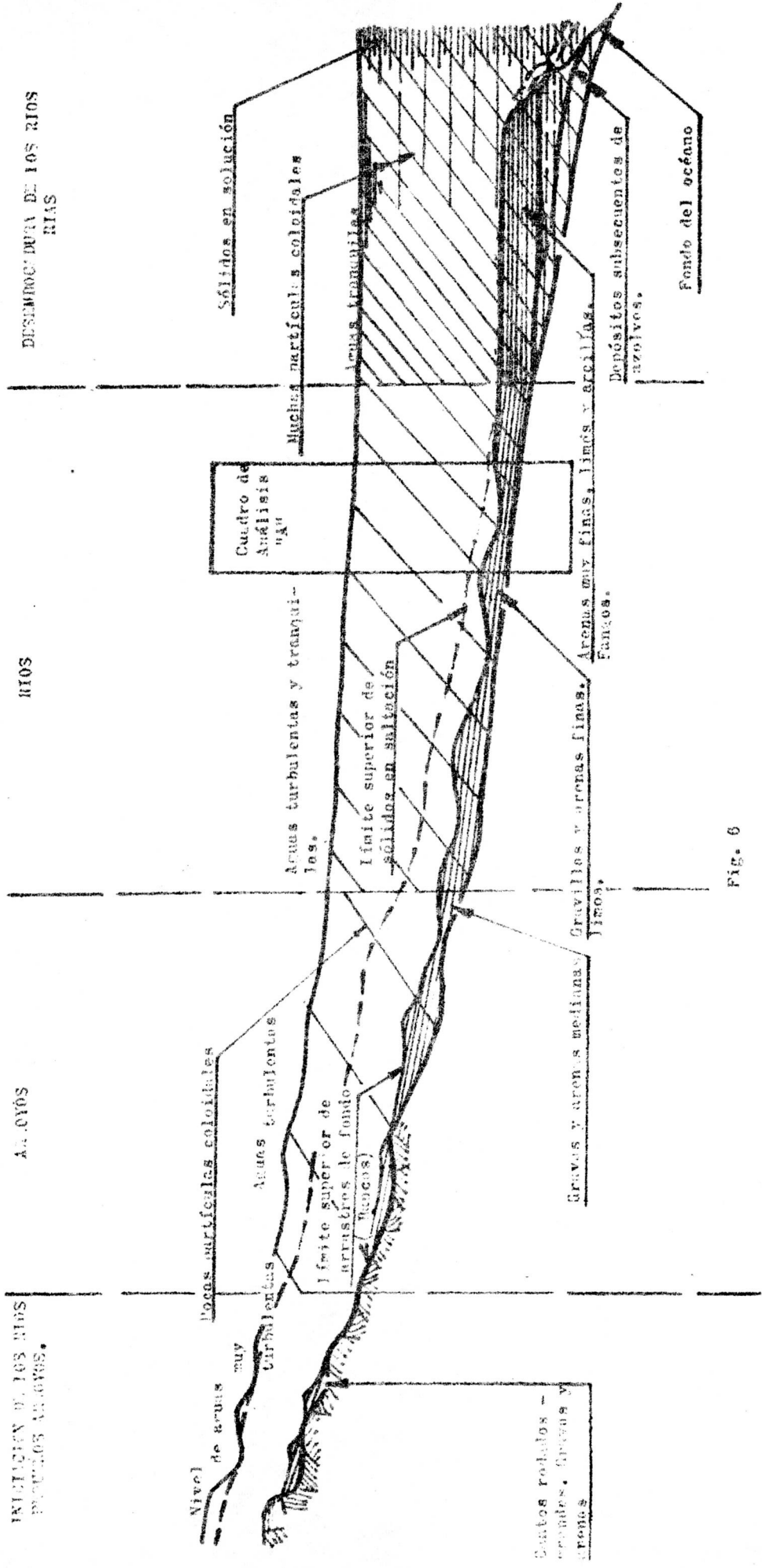


Fig. 6

Cuando por las diferentes estaciones del año el río crece, la demanda de las tomas disminuye, pues las crecientes de los ríos se originan en las lluvias que, a su vez, suplen en parte la demanda de agua. Por estas mismas razones se puede colegir que a grandes avenidas (muchos arrastres) poca demanda por la toma y mayor altura de carga para hacer trabajar el filtro y por lo tanto mayor porcentaje de aguas limpias del subálveo y a su vez menores láminas por el vertedor de cresta móvil.

Por todo lo anterior es de suponerse que una buena operación de estos nuevos tipos de compuertas proporcionarán aguas con menores porcentajes de sólidos que las bocatomas de diseños convencionales.

A P E N D I C E

Se hace la aclaración de que el dispositivo denominado "Filtro Graduado" sugerido en las bocatomas anteriores, tiene como principal finalidad, captar aguas limpias procedentes del subálveo y no precisamente ejecutará labores de filtración de las aguas que escurren en la superficie de los ríos.

Las sugerencias anotadas en estos apuntes, son el producto de la recopilación de algunos datos obtenidos en la búsqueda de la solución de este problema en libros y estudios de técnicos y especialistas en esta materia, sumados a las observaciones personales del que esto escribe, en los proyectos en estudio y ejecución que adelanta el Instituto Colombiano de la Reforma Agraria. Por esto último no se pretende darle a estos apuntes el carácter de un estudio, sino únicamente promover inquietudes de investigación sobre este problema. Por lo mismo se hace necesaria la experimentación e investigación en Laboratorios hidráulicos antes de llegar a soluciones reales y satisfactorias.

Ricardo Ríos Avendaño  
Asesor de Cieps de México

Bogotá, Agosto de 1968

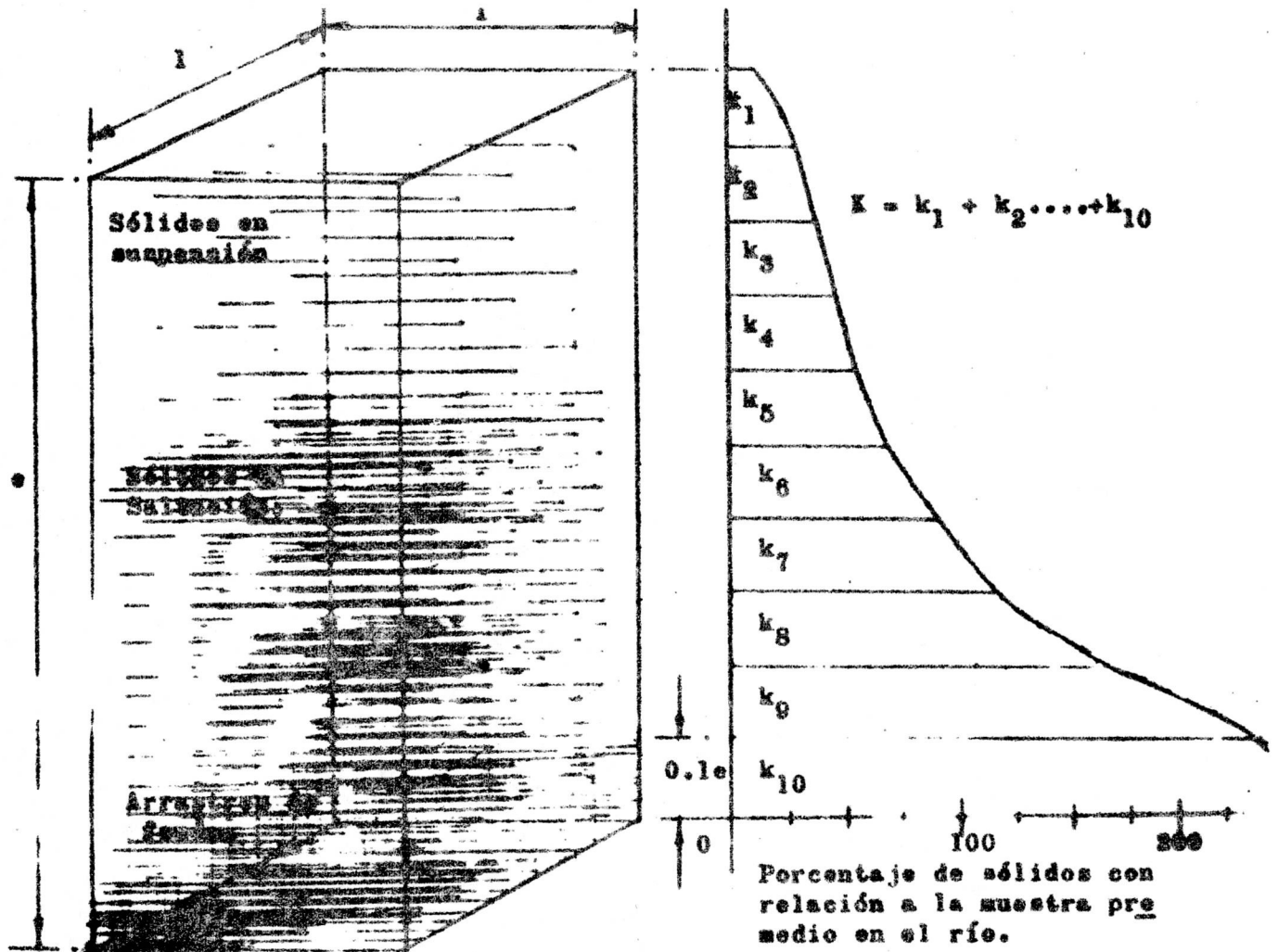
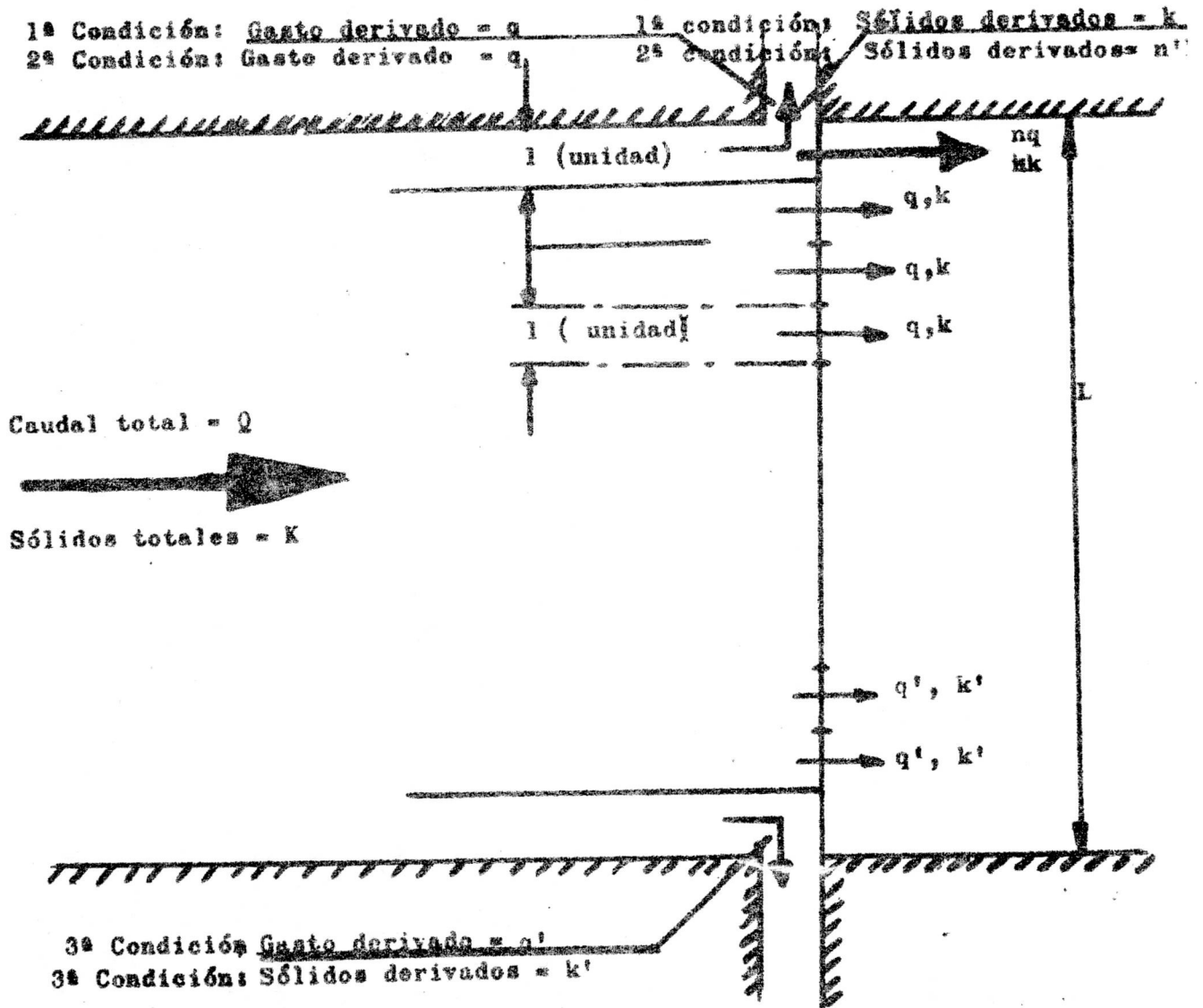
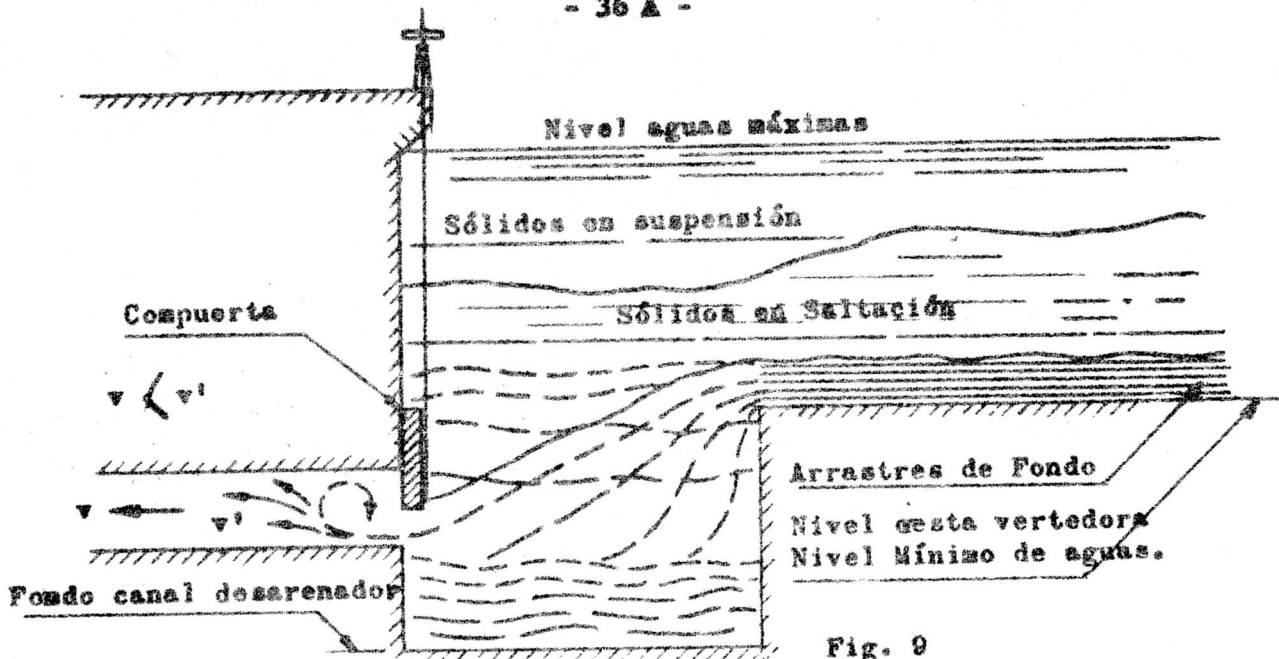


Fig. 6A

BIBLIOGRAFIA

- MERRIMAN AND WIGGIN American Civil Engineer's Hand Book **Fifth** Edition.
- FLOYD E. DOMINY Desing Considerations in the Economica Hendling of Sediment in Irrigation Systems Sixth Congress Irrigation and Drainage New Delhi, 1966.
- VEN TE CHOW Open-channel Hydraulics. International Student Edition.
- O.U. MAGGIOLO Mecánica de Transporte de Fondo. Boletín de la Facultad de Ingeniería y Agrimensu ra de Montevideo.
- D.W. HUBELL Apparatus and Techniques for Messuring Bed Load. Geological Survey.
- SERGE LELIAVSKY Introducción a la Hidráulica Fluvial. Bar celona 1964.
- BUREAU OF RECLAMATION E.U.A. Design of Small Dama.
- HANDERBERG Sewerage and Sawage Treatment. 3ra. Edi ción.
- JUAREZ BADILLO Y RICO RODRIGUEZ Mecánica de Suelos - Editorial Ingeniería URAM 1963.
- BUREAU OF RECLAMATION JANUARY 1948 Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference. Bureau of Recla mation January 1968.
- H. VARLET Usines Hydrauliques.
- GRUPO DE TRABAJO DE SEDIMENTACION Estudios sobre el Transporte de Sedimentos en el Río Chama, con referencia especial al sitio de Presa Mocacay. División de Hi drología, Venezuela.
- A. SCHOKLITSCH Arquitectura Hidráulica.
- DAVID PEREA H. MARCO POLO R. Aplicabilidad del Método de Miller al es- tudio del Transporte de Sólidos en Suspen sión en el Río Tuy. Ministerio de Obra s Públicas, Venezuela.



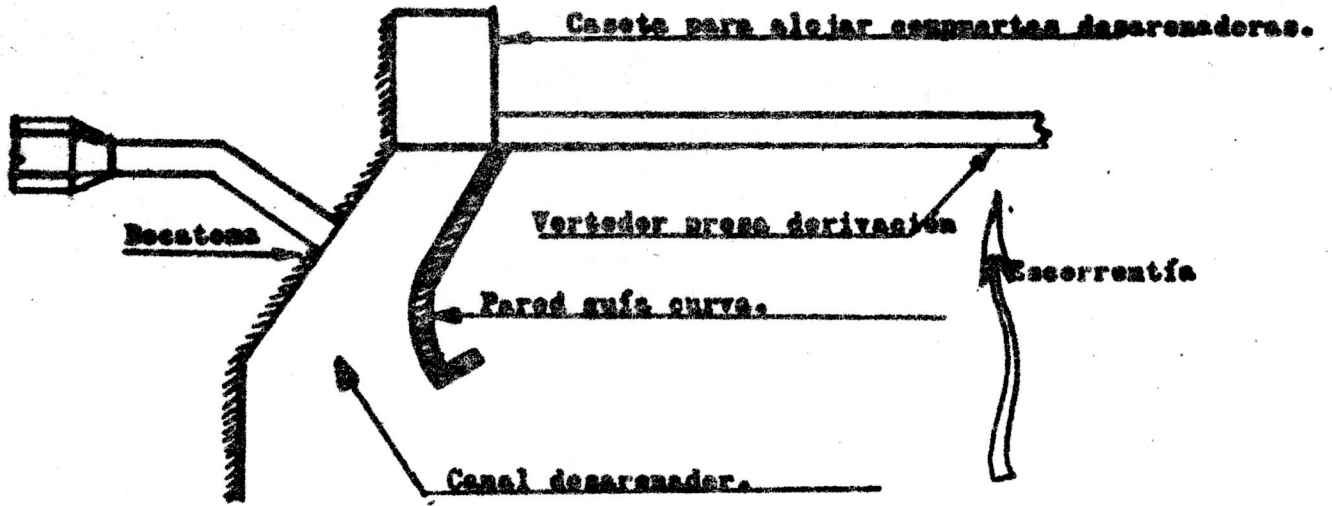


Fig. 11

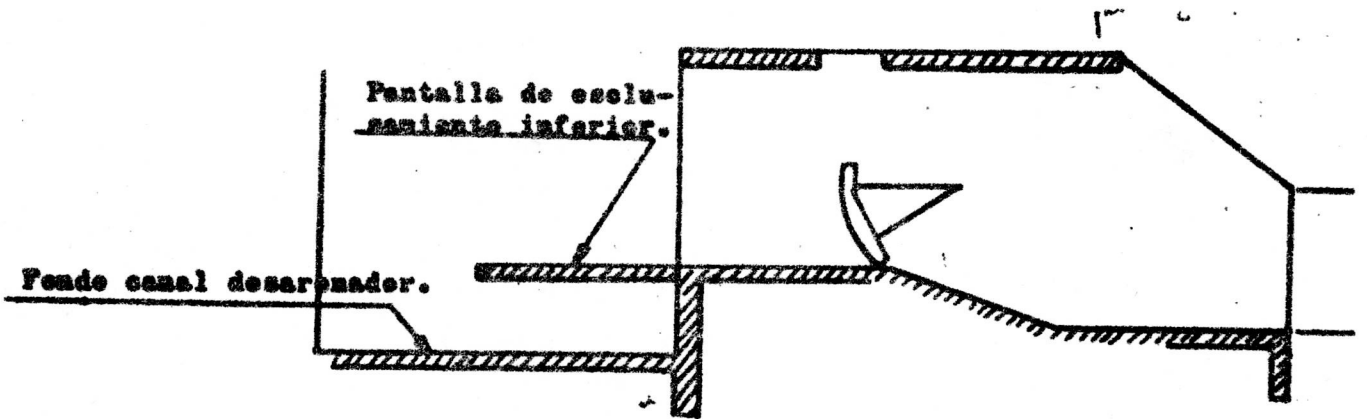
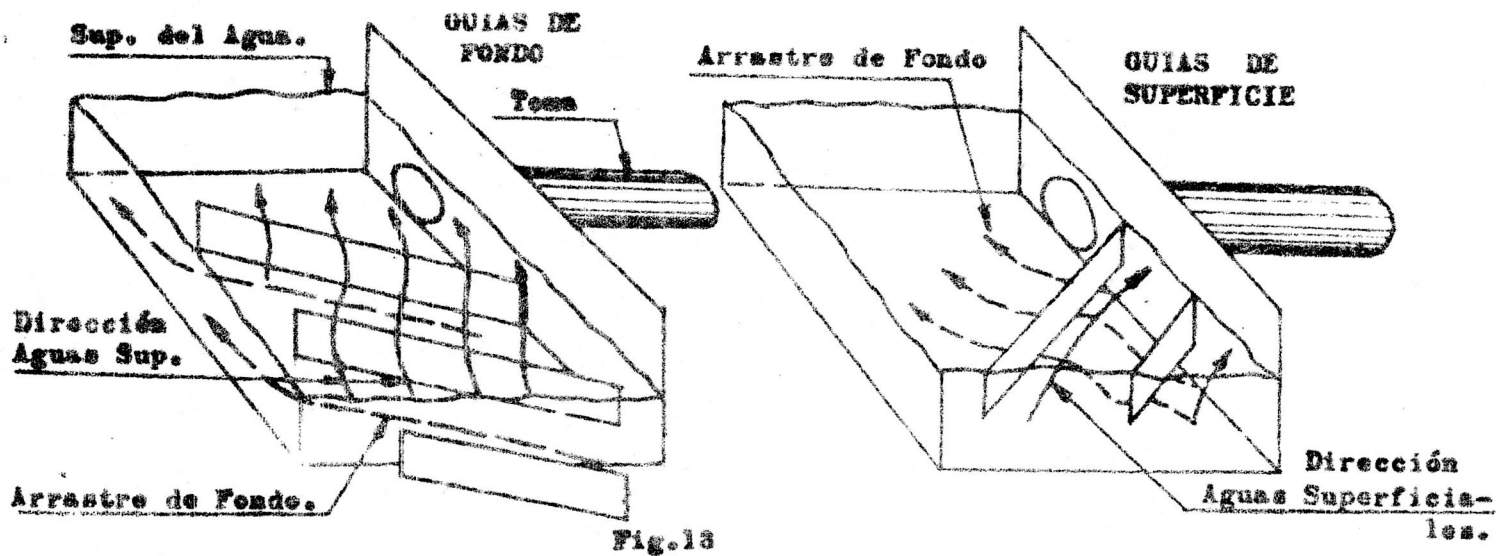


Fig. 12



Ranuras para agujas de madera

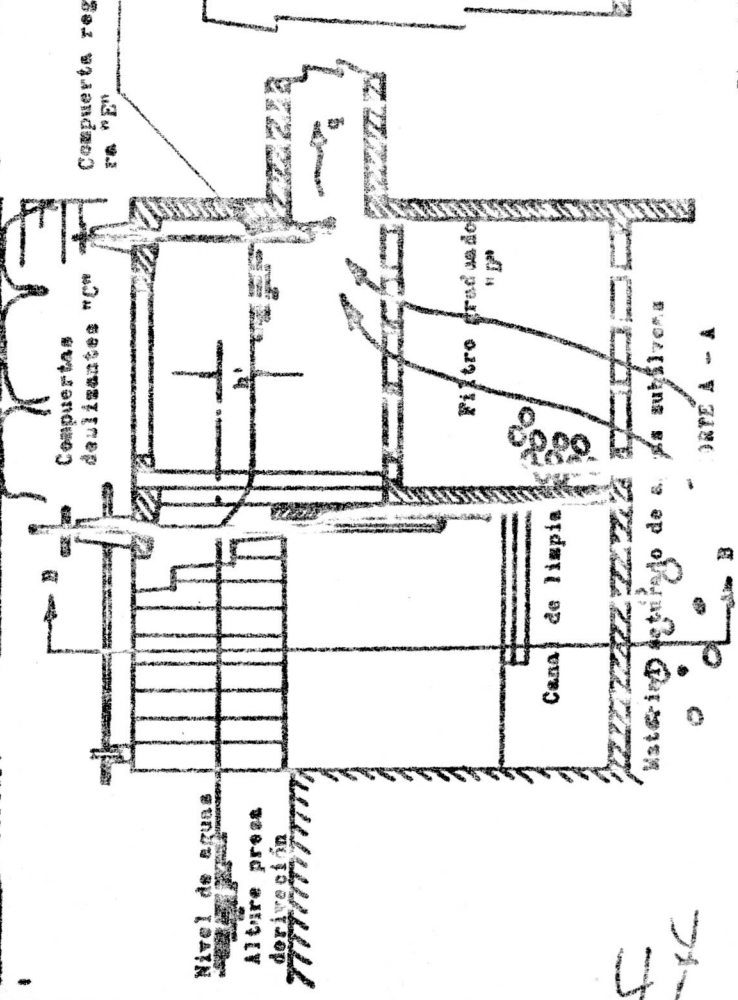
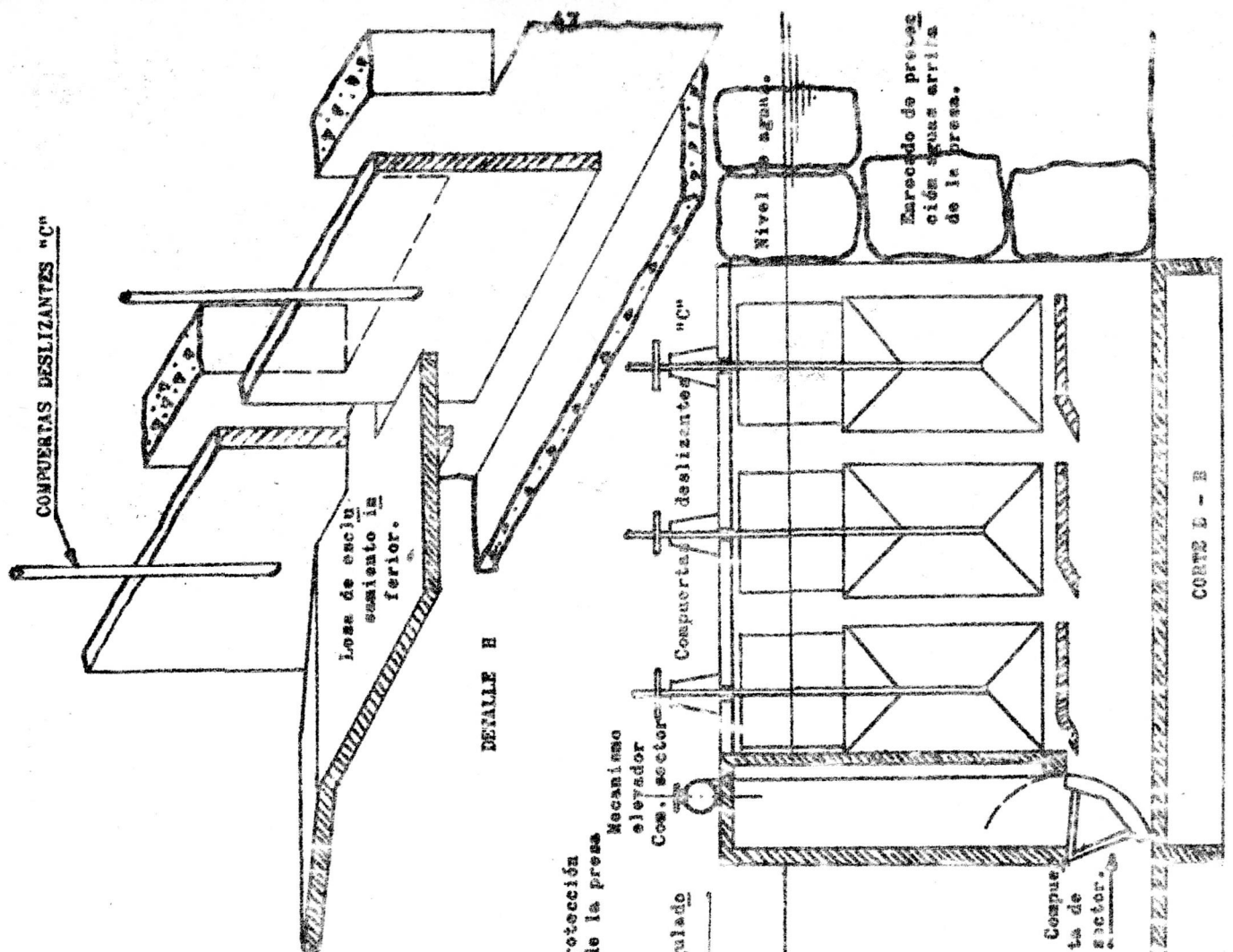
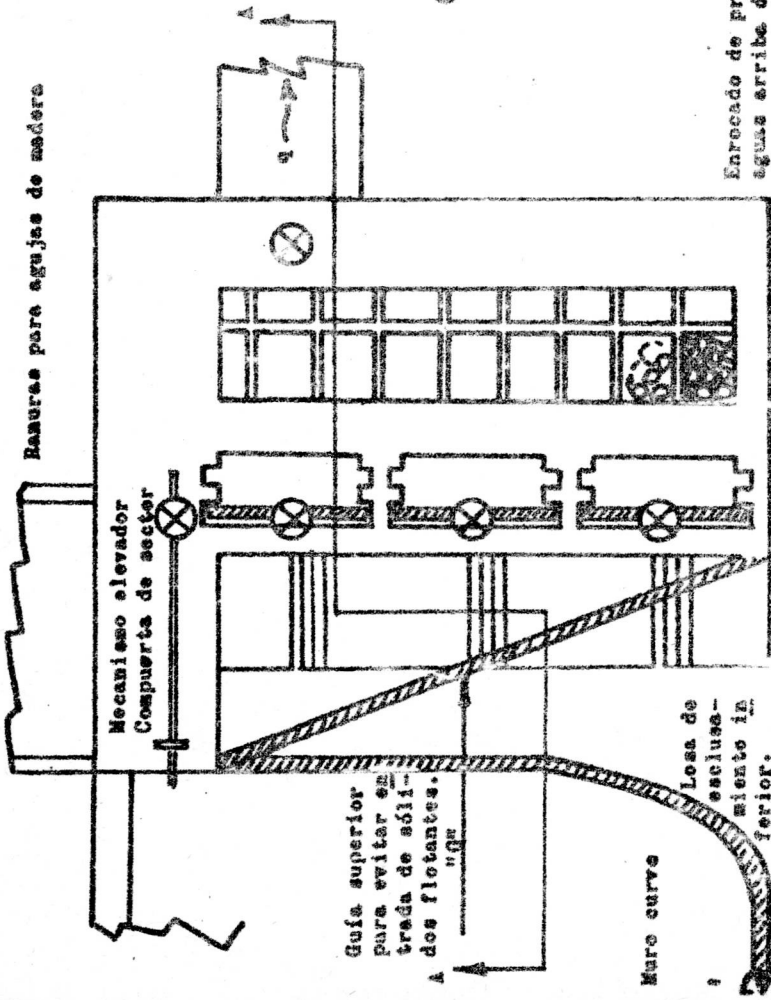


FIG. 14

416

