

51. H 8.
864 m
1969
Gm. 114.
Ej. 2

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD
DE INGENIERIA
Y ARQUITECTURA

METODOS PARA LA DETERMINACION
DEL SEDIMENTO SUSPENDIDO Y
ARRASTRADO POR EL FONDO
EN LOS RIOS

TESIS
PRESENTA
POR

RAFAEL LOPEZ VIDES

PREVIA A LA
OBTENCION DEL
TITULO PROFESIONAL DE

INGENIERO CIVIL

SAN SALVADOR
NOVIEMBRE 69



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

Dr. José María Méndez

VICE-RECTOR:

Arq. Gonzalo Yanes Díaz

SECRETARIO:

Dr. José Ricardo Martínez

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO:

Ing. Guillermo Imery

SECRETARIO:

Ing. Rodolfo Jenkins

Carretera / Highway
Vicos, S.P. / 6-I / 70 #33175



EXAMEN DE GRADO

PRESIDENTE:

Ing. José Velasco Morán

VOCALES:

Ing. Mario Rivera Calvo

Ing. José Saúl Alvarez

JURADO CALIFICADOR DE TESIS

ASESOR ACADEMICO:

Ing. José Velasco Morán

CONSULTORES:

Ing. Mario Rivera Calvo

Ing. José Saúl Alvarez

ESTE TRABAJO VA DEDICADO A AQUELLOS QUE
CON SU ESFUERZO Y CARIÑO
AYUDARON A SU REALIZACION

A la memoria de mi padre FELIPE DE JESUS LOPEZ,
a mi abnegada madre JUANA MARIA VIDES v. de LOPEZ,
a mi querida esposa MARIA ELENA y a mi adorado hijo
RAFAEL FELIPE.-

AGRADECIMIENTOS

El presente Proyecto de Ingeniería ha sido elaborado satisfactoriamente gracias a la ayuda técnica del Proyecto Hidrometeorológico - Centroamericano, quien con sus publicaciones de gran sentido científico facilitó la suficiente información para su debido desarrollo.

Se agradece también la colaboración brindada por la Dirección General de Obras de Riego y Drenaje al proporcionar los datos de aforo y pruebas de sedimentación efectuadas en el Río Taisihuat.

En especial agradezco por su asesoría técnica a los Ingenieros: Carlos Ventura Montenegro, José Velasco Morán y Héctor Martínez Alvarado y en carácter de Consultores a los Ingenieros: Mario Rivera Calvo y Saúl Alvarez Escobar.

CONTENIDO	Pág.
CAPITULO I	1
INTRODUCCION	1
GENERALIDADES	3
Movimiento del azolve o sedimento por las corrientes	3
Fuentes de sedimento	3
Erosión del terreno por el agua	4
Erosión por onda en Océanos y lagos	4
Erosión por el viento(Eólica)	5
Erosión ocasionada por la Construcción de caminos, ferrocarriles, etc.	5
CAPITULO II	6
Métodos de Medición del sedimento en suspensión	6
Medida con muestreadores	7
Muestreadores Integradores	7
Operatoria en terreno	7
Muestreadores puntuales	11
Métodos Colorimétricos	13
Determinación del sedimento por fórmulas	14
Concentración de Sedimentos	15
Producción de sedimentos por área de terreno	16

	Pág
CAPITULO III	18
Técnica de Laboratorio	18
Decantación	18
Filtrado con Calcinación	20
Filtrado sin Calcinación	24
Determinación de la Granulometría del Sedimento en sus- pensión	28
Tamizado Húmedo	28
Tamizado Seco	29
CAPITULO IV	30
Operatoria de Oficina	30
Proceso estadístico del gasto sólido suspendido	31
Relación de la curva de descarga de Sedimento, y de la curva de duración de descarga <u>6</u> /.	31
CAPITULO V	33
Análisis Preliminar del transporte del Sedimento suspen- dido en el río Taisihuat, Estación Hidrométrica Hato Nue- vo.....	33
Descripción y ubicación de la zona de estudio	34
Método de aforo, de muestreo y análisis de sedimentos	34
Curva de descarga	36

CAPITULO V	Pág
Proceso de construcción de la curva	36
Extrapolación de la curva de descarga en su segunda face	37
Aplicación de la fórmula de Manning	38
Curva de duración de descarga	40
Extrapolación de la curva de duración de descarga	40
CUADRO No. 1.- % de tiempos y descargas en M^3/s , para la curva de duración de descarga.	43
Trazo de la curva sedimentos vrs. descarga	44
CUADRO No. 2.- Análisis de sedimentos suspendidos. Estación Hato Nuevo, Río Taisihuat	45
CUADRO No. 3.- Estimación de sedimentos en suspensión - acarreados por el Río Taisihuat	50
CAPITULO VI	51
Método para la determinación del arrastre sobre el fondo	51
GENERALIDADES	51
Medición directa del arrastre sobre el fondo	52
CAPITULO VII	56
Uso de fórmulas para la determinación del sedimento arrastrado	56
Fórmula de Meyer-Peter	58

CAPITULO VII	
CUADRO No. 4.- Cálculo del arrastre por el fondo	64
CUADRO No. 5.- Fórmula de Meyer-Peter	65
Fórmula de Einstein-Brown	66
CUADRO No. 6.- Cálculo del arrastre por el fondo	69
CUADRO No. 7.- Fórmula de Einstein-Brown	70
Estimación de la carga de fondo como un porcentaje de la carga suspendida.	71
CAPITULO VIII	
Criterio de varios Investigadores sobre el arrastre por el fondo.	72
CAPITULO IX	
Conclusiones y Recomendaciones	74
Anexo No. 1	
Valores del Coeficiente de rugosidad n para usarlo en las fórmulas de Manning según la referencia.	75
Anexo No. 2	
Viscosidad del agua a distintas temperaturas	79
BIBLIOGRAFIA	
	81

INDICE DE FIGURAS

- 2-A Muestreador US-P-49
- 2-B Muestreador US-DH-48
- 2-C Gráfica para la determinación del tiempo de llenado para botella de 395 cc.
- 2-D Gráfico, que correlaciona la concentración de una muestra -- puntual con la concentración media de la sección de un río.
- 2-E Frasco utilizado para muestrear
- 2-F Muestreador puntual (canastilla)

- 3-A Equipo de Filtrado
- 3-B Determinación del volumen de las muestras
- 3-C Forma de doblar los filtros ya usados
- 3-D Gráfica para la distribución de tamaños (Granulometría)

- 4-A Curvas integrales del caudal

- 5-A Cuenca del río Taisihuat comprendida dentro de la cuenca del río Grande de San Miguel.
- 5-B Mapa de ubicación de la Estación Hidrométrica Hato Nuevo, - en río Taisihuat.
- 5-C Curva de descarga
- 5-D Curva relación Área vrs. lectura de mira
- 5-E Curva relación Velocidad media vrs. lectura de mira.
- 5-F Fluviograma tipo, registrado por un Limnógrafo.

INDICE DE FIGURAS

- 5-G Relación de curvas: Duración de descarga y Gasto sólido vrs. Caudal.
- 6-A Muestreador de caja para arrastre por el fondo
- 6-B Muestreador de caja cubriendo todo el ancho
- 6-C Trampa para la medida del sedimento arrastrado
- 6-D Mediciones en zonas turbulentas.
- 7-A Curva de descarga del arrastre por el fondo para la fórmula Meyer-Peter.
- 7-B Curva de duración de descarga
- 7-C Gráfico de la función $= f\left(\frac{1}{\psi}\right)$, para la fórmula Einstein-Brown (Abaco de Einstein)
- 7-D Curva de descarga para la fórmula Einstein-Brown.

CAPITULO I

INTRODUCCION

El Ministerio de Agricultura y Ganadería en su afán de poner en alto el potencial de nuestro país, programa y planifica estudios de factibilidad socio-económicos con miras al aprovechamiento de nuestros recursos hídricos.

Se puede decir, que jamás en El Salvador se había palpado un avance acelerado, en cuanto a la investigación cualicuantitativa de todos los fenómenos hidrogeológicos, como hidrometeorológicos que a diario se suceden. Sí, hoy en día nuestro país ha sido escogido como lugar cede del equipo de computadores de los modelos análogos; sistema este, que sirve para el análisis de los acuíferos del subsuelo.

Para todo lo anterior, nuestro país al igual que el resto de los demás países del istmo Centroamericano, se han unificado para formar el Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano (P.H.C.A.) con cede actualmente en Costa Rica. Este proyecto tiene como meta principal, el hacer conciencia de lo que la cuantificación de los recursos hídricos representa para cada uno de los países Centroamericanos, así como también en forma relativa para los demás países del mundo.

Por lo tanto, como una colaboración de lo mucho que hemos aprendido del citado proyecto, sumamos a la investigación profesional el presente tema de tesis, que no es más que un sencillo compendio de métodos para la determinación del sedimento suspendido y arrastrado por el fondo en los ríos.

A manera de preámbulo a lo que esta tesis propiamente trata, comenzaré por recalcar que el agua en todos los continentes no está distribuída uniformemente; causa que trae consigo la construcción de grandes obras de regulación capaces de compensar su escasez o su exceso. Siendo por lo tanto para el desarrollo de estas obras, el hacer un estudio concienzudo de las numéricas causas y efectos que acontecen. Así se asegurará la utilización racional de los recursos disponibles para evitar las desastrosas consecuencias de una acumulación incontrolada.

Sirva pues esta tesis, como una orientación y una iniciativa al desarrollo de los proyectos que familiarizados con esta materia se ejecuten.

GENERALIDADES

Sedimentos en suspensión. Se designan así, a todos los materiales sólidos que se mantienen en suspensión en el agua de una corriente. La carga del material sólido en suspensión se expresa en partes por millón (p.p.m.), o en mgr/lits.; y cuya determinación se verá en el Capítulo III. La determinación de su magnitud es importante en la casi totalidad de estudios y proyectos hidrológicos. Así tenemos: - Construcción de canales de riego y drenaje, presas de embalse, presas hidroeléctricas, etc.

Movimiento del azolve o sedimento por las Corrientes

En toda corriente, cada filete líquido que la constituye transporta o acarrea cierta cantidad de materiales en suspensión, arrastrando a la vez a lo largo del lecho de la corriente, sólidos más grandes que constituyen la carga del fondo. Como la gravedad específica de los materiales del suelo es aproximadamente de 2.65, 1/* las partículas del sedimento en suspensión tienden a depositarse en el fondo del cauce, pero debido a las corrientes superiores en el escurrimiento turbulento, este depósito gravitacional es anulado.

Fuentes de Sedimento

La principal fuente de sedimentos la constituyen los materiales erosionados, siendo éstos ocasionados por diferentes causas, a saber: 1/* Los números así indicados corresponden a las referencias Bibliográficas.

Erosión del terreno por el agua

- a) Gotas de lluvia: cuando éstas interceptan la superficie del suelo, la fuerza gravitacional con que caen disgregan las partículas del suelo,
- b) Erosión por capas: se debe a la separación del material producido por canales muy pequeños. Esta fuente es predominante en aquellas regiones donde el agua caída sobrepasa a los 50 cm/año y donde existe una agricultura bien desarrollada (erosión por labores agrícolas).
- c) Erosión en quebradas: ésta se produce en forma similar a la anteriormente citada, sólo que en gran escala.
- d) Erosión por ríos y corrientes naturales: ésta, una de las más importantes en los problemas de ingeniería, especialmente en los proyectos de embalse, es producida por las corrientes -- que escurren durante todo el tiempo.

Además de los anteriores tipos de erosión ocasionados por la lluvia, existen otros que sí bien no entran en este estudio, es de importancia mencionarlos, por Ejemplo:

Erosión por Onda en océanos y lagos: La constituyen la erosión y depósitos de material en las riveras, y/o en las radas provocadas -- por la acción directa del oleaje.

Procesos Industriales: Los procesos de purificación del agua, - industria química, explotación de minas, etc.

Transporte de material granular, el dragado (excavación y bom- - beo), transporte de minerales, de carbón, etc.

Erosión por el viento (Eólica): La erosión del suelo por el vieno es en gran cantidad y de mucha importancia en la agricultura, y - en caminos que cruzan desiertos o playas.

Erosión ocasionada por la construcción de caminos, ferrocarril- - les, líneas de alta tensión etc.

Después de haber citado simplídicamente las fuentes productoras de la sedimentación, se sugiere que lo anterior, se tome como -- una generalidad previa a lo que verdaderamente tratará esta tesis.

CAPITULO II

Métodos de Medición del Sedimento en suspensión

Se podría decir que el estudio y por ende la determinación del sedimento en suspensión, es una rama de la hidrología, poco estudiada y que hasta la fecha no se ha llegado a conclusiones verdaderamente exactas. Sin embargo, lo anterior no es excusa para alejarnos de su estudio, más bien debemos proseguirlo.

La medida del sedimento en suspensión no es muy compleja, pues en general se usan las mismas instalaciones que las usadas para medir el flujo. Su medición requiere un conocimiento completo de las condiciones del escurrimiento del río, siendo por lo tanto necesario llevar en forma paralela las medidas del caudal líquido y las del caudal sólido.

Para la medición del sedimento en suspensión pueden usarse varios métodos 2/; siendo los principales:

- 1- Uso de Muestreadores
- 2- Uso de métodos colorimétricos
- 3- Empleo de Fórmulas

Medida con Muestreadores

El método más indicado en condiciones normales para la determinación del sedimento en suspensión; es el que se efectúa mediante el empleo de muestreadores.

Los tipos de muestreadores más conocidos son los siguientes:

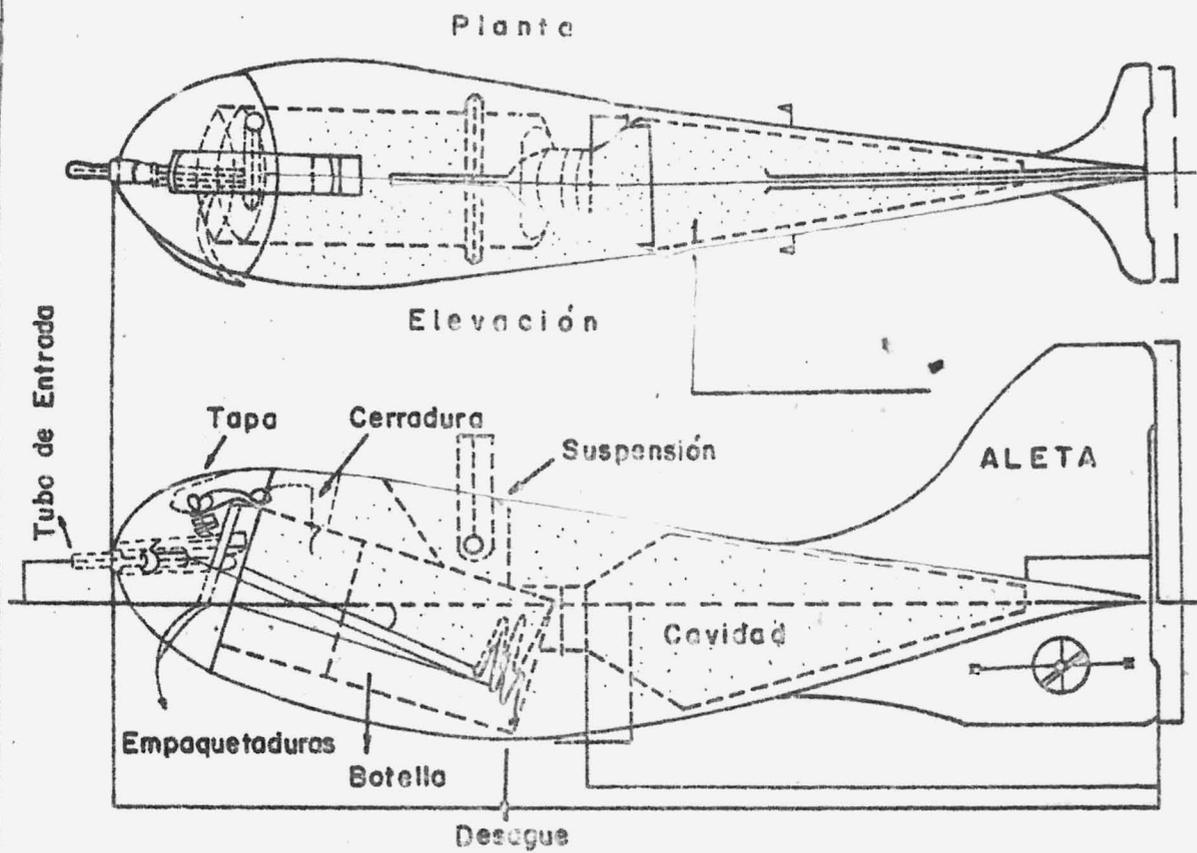
- a) Muestreadores Integradores
- b) Muestreadores Puntuales.

Muestreadores Integradores

El tipo de muestreador integrador más conocido y recomendado, es el US-D-49, ver Fig. 2-A, el cual es usado en ríos de considerable profundidad o cuando se presentan crecidas, el que se opera mediante suspensión, ya sea de cable o de puente. Para ríos poco profundos, se usa el muestreador US-DH-48, Fig. 2-B, el que se opera por vadeo, haciendo que se deslice verticalmente por medio de una barra. En general, la operación de ambos es similar en cuanto se refiere a la obtención de la muestra.

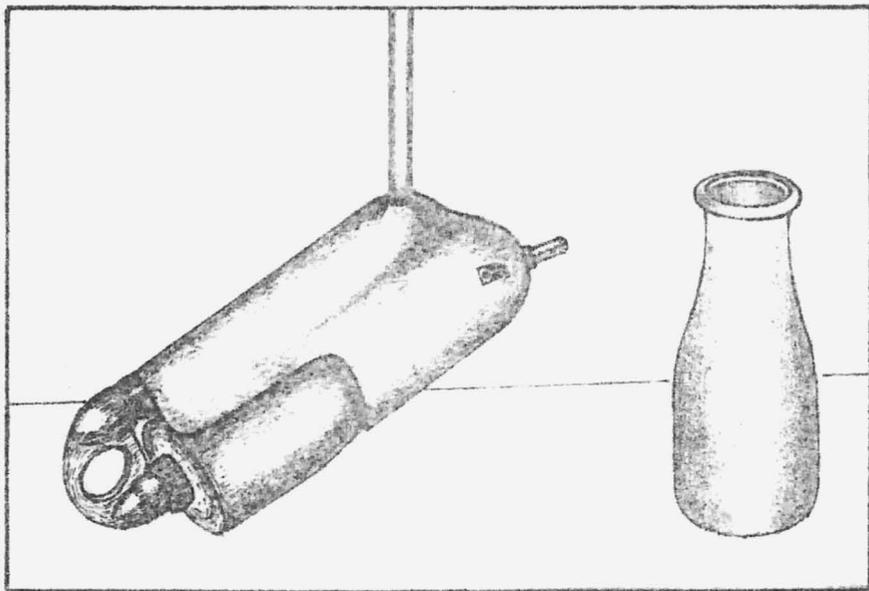
Operatoria en Terreno

Como se dijo al principio, para las mediciones del sedimento se usan las mismas instalaciones que para el aforo. Por lo tanto se procederá en la forma siguiente:



Muostreador US P-49

FIG. 2-A

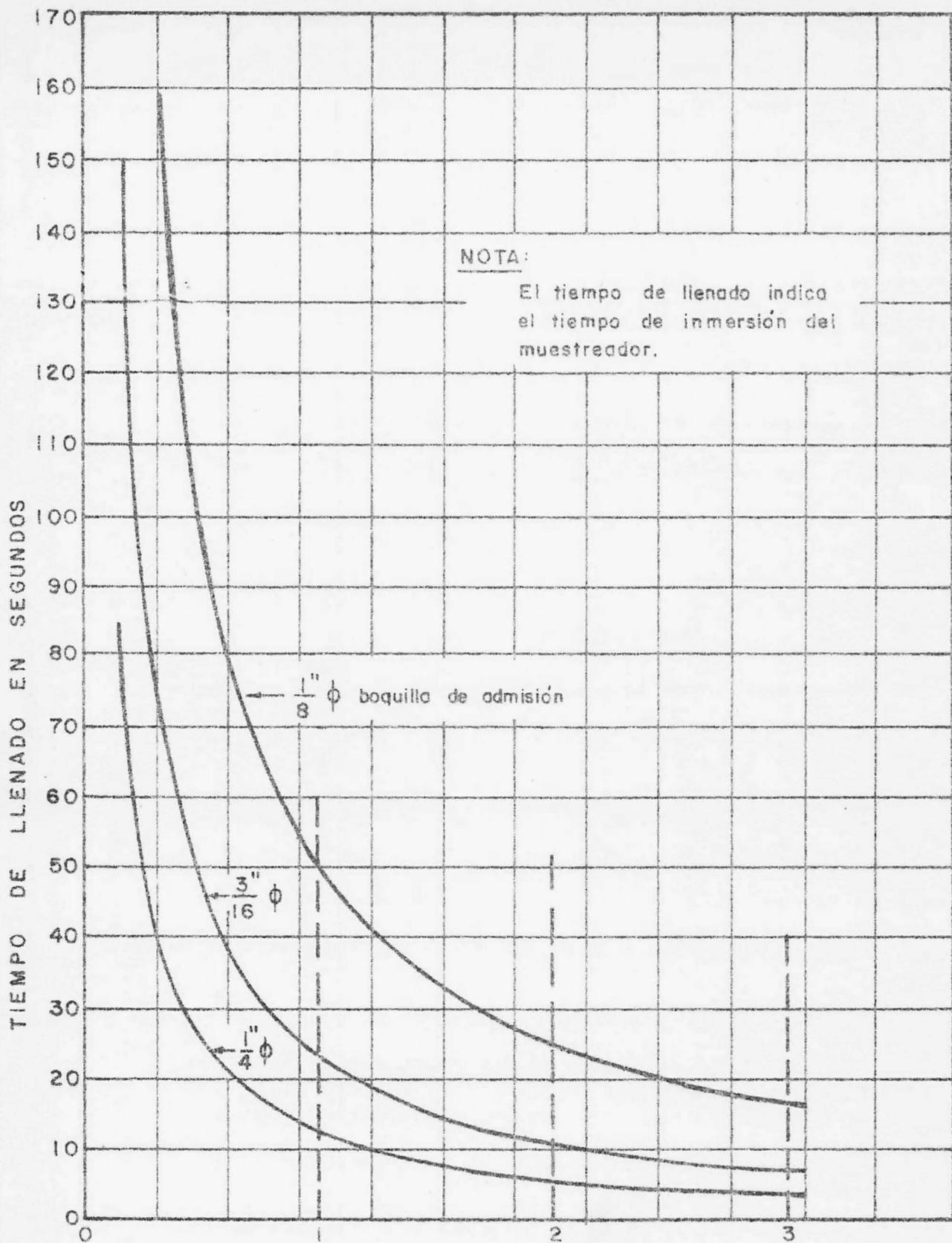


MUESTREADOR U.S.D.H.-48

FIG.—2-B

- a) Se efectúa el aforo en la forma habitual. Para casos especiales que exigen precisión, se utilizará el método de aforo -- por puntos. Ver Manual de Instrucciones*, primera parte.
- b) Cuando se haya terminado de efectuar el aforo, se deben anotar la lectura limnimétrica y la temperatura del agua, esta última influye considerablemente en la capacidad de arrastre del sedimento.
- c) El número de verticales usadas para el aforo, debe ser el -- mismo que para el muestreo de sedimentos, pues no todos los puntos de la corriente transportan la misma cantidad de sedi-
mentos.
- d) Se tomará normalmente una muestra de aproximadamente medio - litro, por cada vertical. Sin embargo, hay que estimar que - ésto es muy tedioso, si se toma en cuenta que algunos ríos - aumentan el ancho de su sección en determinadas épocas del - año.
- e) Siempre que dicha medición se efectúe en crecidas, tal que - produzcan cambios apreciables en la lectura limnimétrica, se tomarán dos perfiles transversales: uno al comienzo y otro al final de la medición, para corregir el muestreo.

* "Manual de Instrucciones", 1a. parte, editado por el Pro--
yecto Hidrometeorológico Centroamericano."



Tiempo de llenado para botella de 395 c.c.
Muestreador de sedimentos en suspensión Fig. 2-C

**DIRECCION GENERAL DE OBRAS DE RIEGO Y DRENAJE
ESTUDIOS PRELIMINARES - HIDROLOGIA
CONCENTRACION DEL SEDIMENTO EN SUSPENSION**

RIO: _____ **Tipo de muestreador:** _____ **ESTACION:** _____
Tipo de muestra: _____

1	Botella No.							
2	Fecha y Hora							
3	Escola							
4	Vertical							
5	Temperatura							
6	Peso de Muestra	Total						
7		Botella						
8		Nota						
9	Recipiente No.							
10	Peso del Sedimento	Total						
11		Recipiente						
12		Nota						
13		Corr. S. D.						
14		Nota						
		(p. p. m.)						

Trabajo de Campo por:
 Trabajo de Laboratorio por:
 Revisado por:

Fecha:
 Fecha:
 Fecha:

- f) La velocidad del muestreador en el movimiento de descenso y ascenso en cada vertical, debe ser constante.
- g) Con la ayuda del gráfico (2-C), se procede a determinar el tamaño de la boquilla, de modo que la velocidad de entrada del agua al frasco muestreador, sea lo más semejante a la velocidad media de la corriente. Esto se consigue llevando una tabla de velocidades que correspondan justamente al molinete que se está usando.
- h) El tiempo de descenso y ascenso del muestreador debe ser tal que la botella no salga completamente llena, ni tampoco que recoja una muestra menor de la mitad de la capacidad del frasco.
- i) Una vez subido el muestreador se saca la botella, se cierra, y se registra su número en el formulario No. 1.
- j) En los casos en que la botella se llene completamente o su contenido sea menor que un cuarto de litro, la muestra será despreciada y la botella no será usada sin antes haberse lavado con agua limpia.
- k) El número de la botella debe estar pintado en forma indeleble en el cuerpo y tapa de la misma.

- l) Para el transporte de las botellas deben usarse cajas cerradas.
- m) Terminado el muestreo se envían las botellas al laboratorio de filtrado.
- n) Al iniciarse y terminarse la medición, se tomará una muestra puntual en un punto fijo, se acostumbra tomar una muestra superficial en el centro del río.
- o) Cuando se ha terminado la medición se toma nuevamente la temperatura del agua. Esto debe hacerse incluso en los casos en que el Limnígrafo posea termógrafo, ya que esta medida sirve para calibrarlo.

Las operaciones con el muestreador US-DH-48, son en todo similar a las anteriores descritas que corresponden al US-D-49, excepto en que se opera vadeando.

Muestreos: Es preciso muestrear cada vez que se afore, como mínimo hacer un muestreo al mes, de ello depende la exactitud de la curva de descarga del sedimento. Además hay que tomar en cuenta que los muestreos de crecida son de mucha importancia.

Muestreadores Puntuales

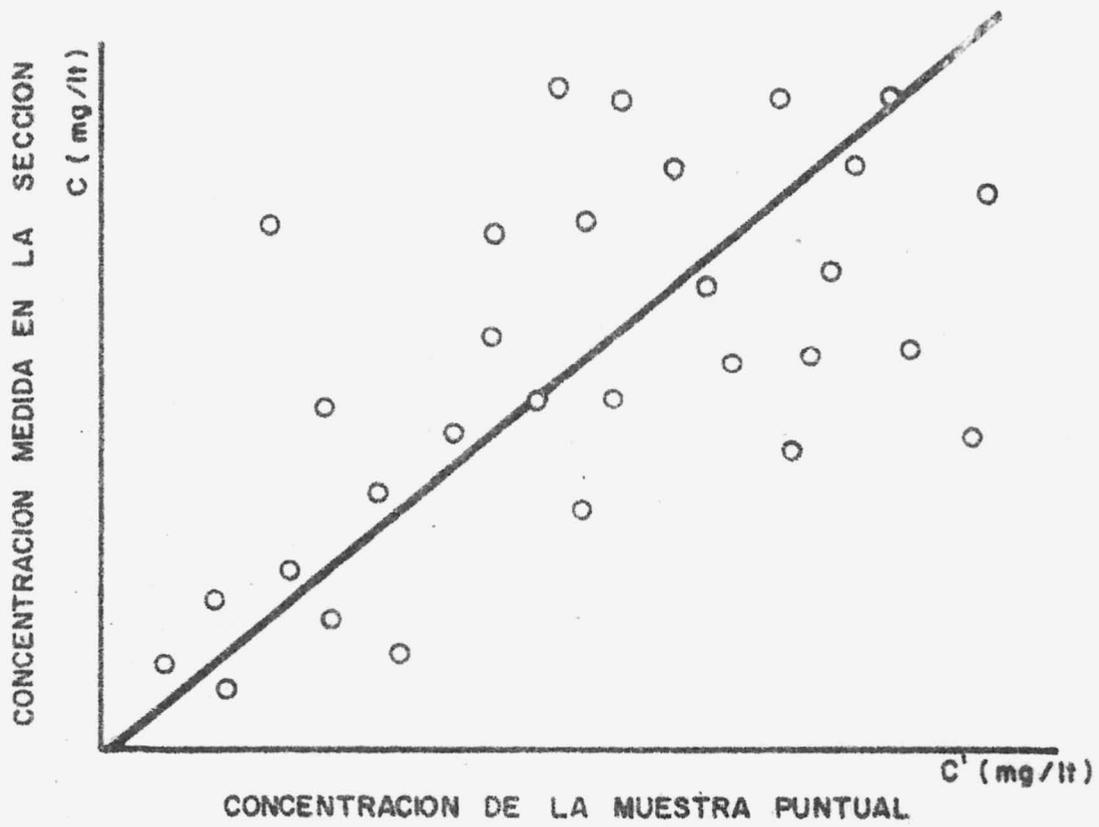
Este es un método que permite obtener datos aproximados del sedimento en suspensión y se usará solo en los casos en que se requiera urgentemente información relativa a la estimación de la carga total de sedimentos en algunos ríos, y cuando se disponga de personal técnico para realizar un muestreo detallado.

El método es exclusivamente aplicable a la estimación del sedimento en suspensión y no al arrastre por el fondo. Está basado en la existencia de una correlación entre la concentración de materiales sólidos existentes en una muestra puntual y la concentración media en la sección transversal del río, Fig. 2-D.

Operatoria del muestreo: El recipiente muestreador usado, es una botella de boca ancha con capacidad de medio litro, Fig. 2-E.

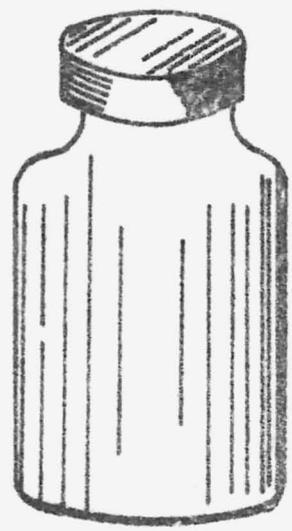
La operatoria es muy sencilla y consiste en lanzar hacia el centro del río, un dispositivo llamado canastilla, Fig. 2-F, llevando en su interior la botella muestreadora, a la que mediante un mando mecánico se le abre y se le cierra su tapadera.

También puede ser usado un muestreador integrador, el que daría buen resultado, para lo cual mediante un mecanismo eléctrico se abre la boquilla en un punto determinado y una vez llenada la botella se cierra antes de retirar el muestreador.



Correlación C - C'

Fig. 2-D



Frasco utilizado para muestrear

FIG. 2-E

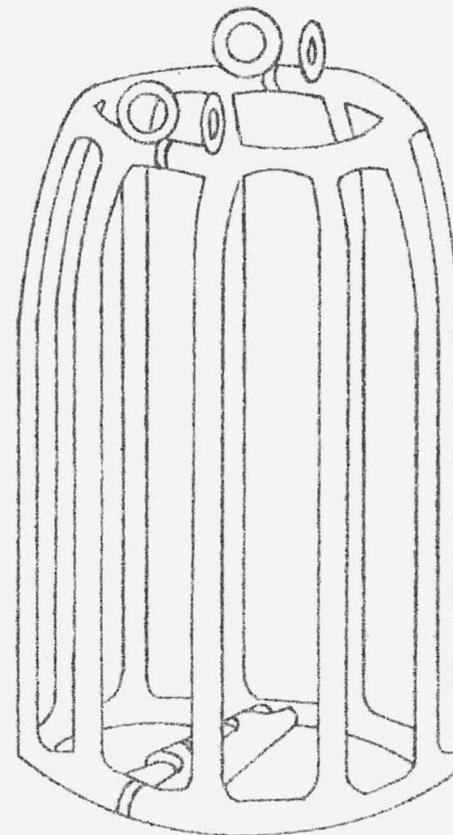
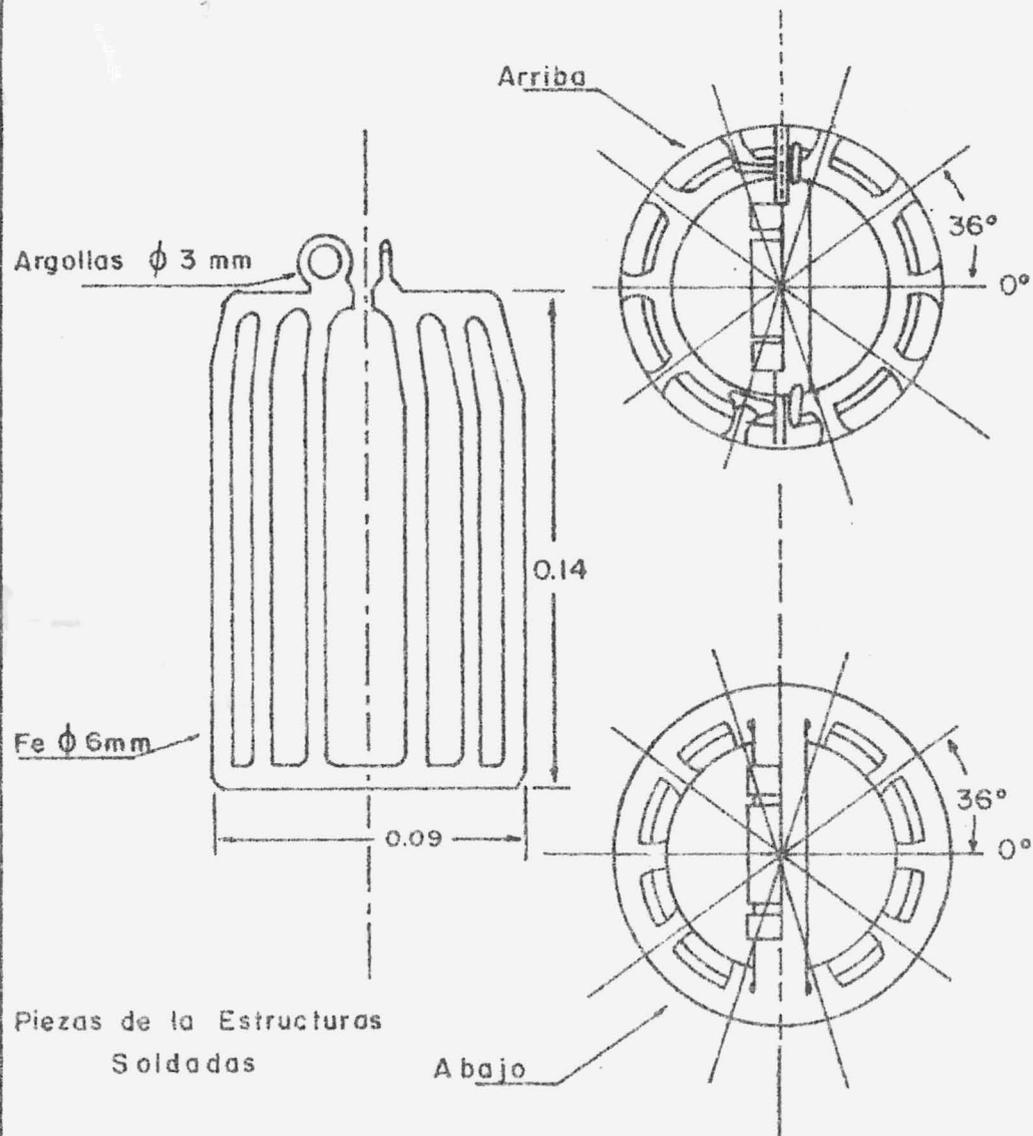
Para simplificar la operación puede usarse una muestra superficial tomada en la orilla o en un punto de poca profundidad, ya que no se necesita ningún dispositivo además de la botella.

El número mínimo de muestras que debe tomarse en condiciones normales es una diaria, teniendo siempre el cuidado de tomarlas en el mismo lugar. Durante avenidas máximas, debido a que el gasto sólido aumenta en una proporción mayor que el gasto líquido, se hace necesario tomar tres muestras: una cuando el nivel del agua va ascendiendo, otra en su nivel máximo y por último, una cuando el nivel va descendiendo.

Una vez tomada la muestra se cierra la botella y se registra su número, día, hora, lectura de escala, etc. en un formulario que aparece a continuación.

<u>Día</u>	<u>Hora</u>	<u>No. del frasco</u>	<u>Lectura de escala</u>	<u>Observaciones</u>
1				
2				
3				
4				

La columna "Observaciones" sirve para anotar el estado del tiempo, aspecto del río, muestras adicionales, etc.



Muestreador CH2

Las muestras ya cerradas y registradas se van alojando en cajas, para luego ser llevadas al laboratorio y analizarlas.

Métodos Colorimétricos

Estos métodos son bastantes simples y son usados especialmente para agua potable. En ellos, en vez de medirse la concentración -- del sedimento, se recurre a la medida de la turbiedad, para lo cual se emplean los instrumentos llamados turbidímetros.

Otro método usado para la determinación del sedimento en suspensión es mediante el fotómetro, el cual consiste en un medidor - de color mediante una célula foto-eléctrica. Su uso en la sedimentación es similar al de los turbidímetros. Estos métodos están basados en la comparación del agua con sedimentos, con el color de - una muestra base.

El uso de métodos colorimétricos exige calibraciones periódicas, por lo que no son recomendables y se han traído al caso, como alusión, por lo que no se han tratado más a fondo, dándole toda la importancia a los métodos de muestreo y filtrado de las muestras.

Determinación del Sedimento por Fórmulas

Para la determinación del sedimento en suspensión existe una diversidad de fórmulas. Algunas bastante complejas, y otras muy sencillas y prácticas. Las primeras por exigir condiciones ideales son imposibles de usar, las segundas como repito, por su sencillez son más fáciles de emplear 3/.

Los conceptos de los elementos en los cuales se basan las fórmulas, son las siguientes:

V_s = volumen total de sedimentos

V_{ss} = volumen de sedimentos en suspensión

V_{sf} = volumen de sedimentos de fondo

de donde se puede inferir lo siguiente:

$$V_s = V_{ss} + V_{sf} \quad (1)$$

De la misma manera se puede decir que:

$$P_s = P_{ss} + P_{sf} \quad (2)$$

en donde:

P_s = peso total de sedimentos

P_{ss} = peso de sedimentos en suspensión

P_{sf} = peso de sedimentos de fondo

Por los resultados obtenidos en prácticas de laboratorio, se puede considerar que el sedimento de fondo equivale al 20% 3/ del sedimento en suspensión en una relación volumétrica, así:

$$\frac{V_{sf}}{V_{ss}} = 0.20; V_{sf} = 0.20 V_{ss} \quad (3)$$

Sustituyendo (3) en (1) se tiene:

$$V_s = V_{ss} + .20 V_{ss} = 1.2 V_{ss}$$

$$V_s = 1.2 V_{ss} \quad (4)$$

Concentración de Sedimentos

La concentración de sedimentos en suspensión C_{vss} , se define como la relación volumétrica que resulta de dividir el volumen de sedimentos V_{ss} y el volumen del líquido que los contiene (V_A). Para nuestro caso el agua.

Por lo tanto se tiene que:

$$C_{vss} = \frac{V_{ss}}{V_A} \quad (5)$$

Que se puede expresar en partes por mil:

$$C_{vss} (\%) = \frac{V_{ss}}{V_A} \times 1000 \quad (6)$$

La concentración puede ser también expresada en función de -- los pesos Así:

$$C_{pss} (\%) = \frac{P_{ss}}{P_A} \times 1000 \quad (7)$$

En pruebas de laboratorio efectuadas por más de diez años, se ha encontrado que la densidad del sedimento suspendido oscila entre los valores de 0.75 kg/dm^3 y 1.50 kg/dm^3 4/

Considerando para usos prácticos el promedio de estos valores como 1.12 kg/dm^3 , podemos inferir que:

$$P_{ss} = V_{ss} \times 1.12$$

de donde:

$$V_{ss} = \frac{P_{ss}}{1.12} \quad (8)$$

Sustituyendo (8) en (5), se tiene:

$$C_{vss} = \frac{V_{ss}}{VA} = \frac{P_{ss}}{1.12VA} \quad (9)$$

Despejando P_{ss} , de esta ecuación y relacionándolo con su equivalente en la ecuación (7), se tiene:

$$C_{vss} = \frac{C_{pss}}{1.12} \times \frac{PA}{VA}$$

Luego para un litro de muestra de sedimentos, los valores de PA y VA están relacionados entre sí, correspondiendo a 1 kg y a 1 dm^3 , respectivamente. De donde:

$$C_{vss} = \frac{C_{pss}}{1.12} \quad (10)$$

Producción de Sedimentos en suspensión por Area de Terreno

Se define como la relación entre el volumen de sedimentos en suspensión producidos por una cuenca determinada y el área de la misma.

Así:

$$R_{vss} = \frac{V_{ss}}{A} ; \text{M}^3/\text{km}^2$$

La relación también puede ser establecida entre los pesos de los sedimentos.

Así:

$$R_{pss} = \frac{P_{ss}}{A} \text{ Ton/km}^2$$

CAPITULO III

TECNICA DE LABORATORIO

Determinación del sólido suspendido:

Entre los distintos procedimientos que se conocen para la de terminación del sedimento en suspensión, tenemos:

Decantación

Este es un procedimiento muy sencillo y fácil de realizar y -
consiste en:

- a) Determinar el peso de la muestra. Esto se consigue restan-
do al peso del frasco más la muestra, el peso del frasco -
vacío.
- b) Se deja reposar la muestra durante 24 horas para lograr el
asentamiento de los sólidos suspendidos.
- c) Por simple decantación se desaloja el agua de la parte su-
perior de la muestra, teniéndose el cuidado de no remover
absolutamente nada del sólido asentado.
- d) La parte remanente de la muestra se pone a secar en una --
estufa eléctrica a una temperatura de 110°C.

e) Se procede a pesar el recipiente más la muestra depositada en él y al peso resultante, se le resta el peso del recipiente sólo, con lo que se determina el peso neto del sedimento.

f) Se determina la concentración en p.p.m. así:

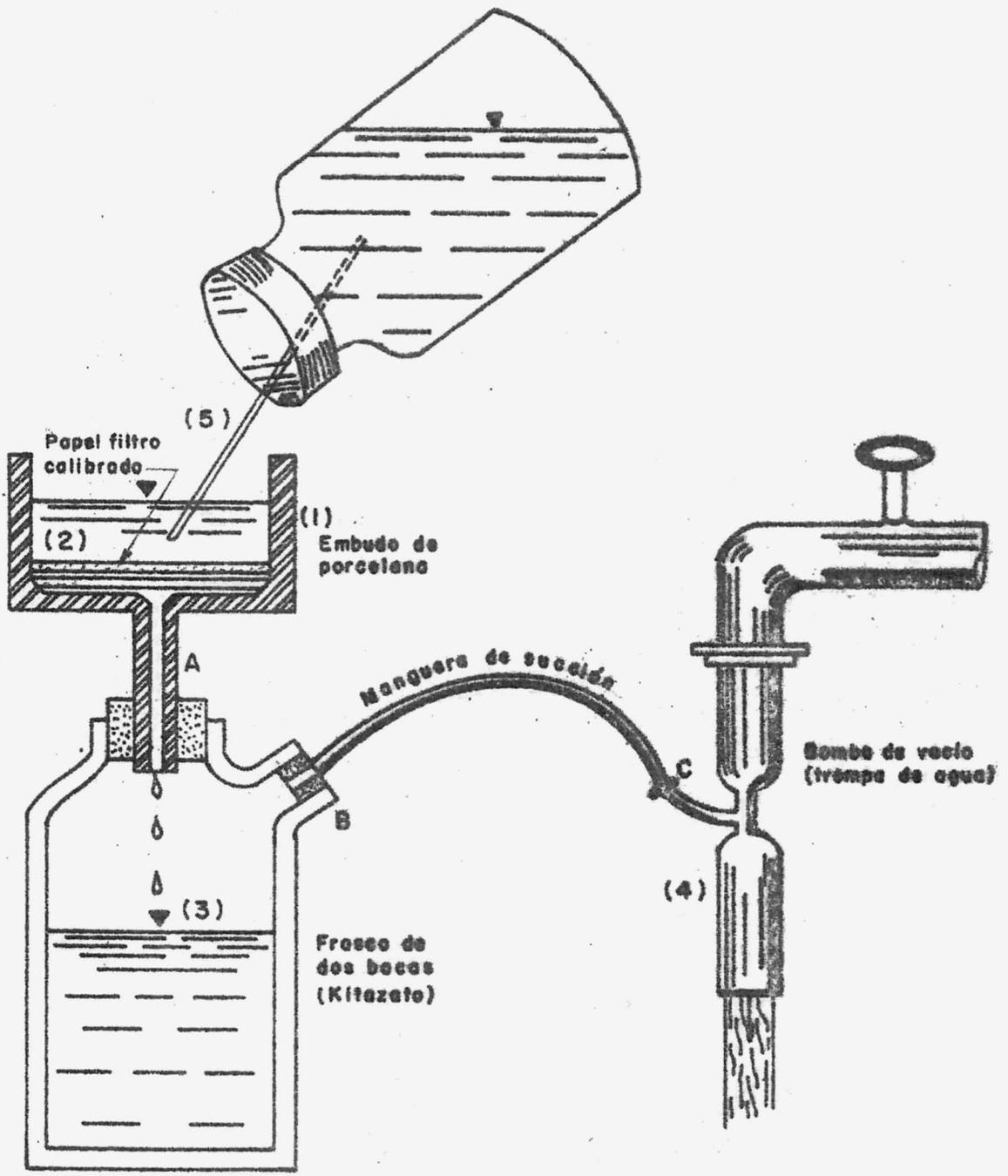
$$C = \frac{\text{Peso de la muestra seca} \times 10^6}{\text{Peso total de la muestra}}$$

Filtrado con calcinación

Este método es recomendado siempre que el sedimento transportado por el río sea de origen inorgánico o que no tenga más de un 20% - de materias calcinante, tales como: calcio, carbonatos, sedimentos de origen orgánico, etc. Por lo cual, antes de aplicar dicho método, conviene hacer un análisis químico del sedimento de cada río en estudio.

El método de filtrado con calcinación es posible, siempre que se disponga de un laboratorio que contenga: 5/

- 1.- Embudo de porcelana tipo "Buchner", con fondo perforado
- 2.- Papel filtro calibrado, es el, papel cuyas cenizas tengan un peso garantizado.
- 3.- Manguera de succión
- 4.- Frasco de dos bocas: (Kitazato). En (A), se introduce el extremo del embudo y en (B), se conecta la manguera de succión.
- 5.- Bomba de vacío. Esta va conectada al frasco de dos bocas mediante la manguera de succión, y se utiliza para producir en dicho frasco, un vacío que facilita el filtrado de la muestra.



Equipo de filtrado

FIG. 3-A

Entre las bombas de vacío, la más sencilla es la llamada trompa de agua, la que produce el vacío mediante un estrechamiento en el paso de la corriente de agua en una tubería.

6.- Horno Mufla.

Los cinco primeros objetos, acoplados según la Fig. 3-A, componen lo que es en sí, el equipo de filtrado y el último, el Horno Mufla, sirve para el calcinado de los filtros.

El proceso que se recomienda para lograr resultados satisfactorios al aplicar este método, es el siguiente:

- a) Se mide el volumen del líquido de la muestra. Para evitar un doble trasvasijamiento y por consiguiente la pérdida de una parte del sedimento, conviene calibrar los frascos con que se toma la muestra y determinar en ellos dicho volumen. En la Fig. 3-B, se indica la forma de hacerlo.
- b) Se coloca en el embudo el filtro numerado y se humedece con agua destilada.
- c) Al proceder a vaciar la muestra de agua en el filtro, debe tenerse el cuidado de agitarla fuertemente un instante antes y para no perforar el filtro con el golpe del agua, conviene deslizarla sobre una varilla de vidrio. Después de -

tomar dichas precauciones, se llena el embudo hasta la mitad, luego se pone en funcionamiento la bomba de vacío, para después continuar vaciando la muestra de manera que el filtro no opere en seco.

- d) Se limpia cuidadosamente el frasco con agua destilada que también se vacía en el filtro.
- e) Terminado el filtrado, se saca el filtro con pinzas y se dobla en la forma indicada en la Fig. 3-C, teniendo siempre el cuidado de hacerlo hacia adentro del lado que recibe el sedimento.
- f) Cada filtro se pone a secar en un plato colocado sobre una estufa eléctrica, luego se guardan en sobre herméticos por separado, cuidando de que no se pierda sedimento en la operación; además debe registrarse en cada sobre: el número de la muestra, el volumen de la misma, así como el número de filtros usados; esto es, en caso de que se use en determinada muestra, más de uno.
- g) Se procede a calcinar los filtros. Esto se consigue mediante el horno mufla, operándolo a unos 1000°C de temperatura. Los filtros se colocan al horno en crisoles cuyo peso ha sido determinado y se tiene que el residuo de calcinación, es el peso resultante de restar al peso del crisol más el filtro --

calcinado, el peso del crisol.

h) Se determina el residuo de calcinación, el peso del sedimento. Para ello se tiene que, restando el residuo de calcinación el peso de las cenizas del filtro se encuentra el peso del sedimento en suspensión de cada muestra. Siendo el peso de las cenizas de los filtros, del orden de las décimas de miligramo, se considera despreciable, por lo que tenemos -- que el residuo de calcinación se considera igual al contenido de material en suspensión en la muestra de agua.

i) Determinación de la concentración. Los resultados anteriores son anotados en un formulario como el que aparece a continuación:

<u>Muestra No.</u>	<u>Peso Mqs.</u>	<u>Volumen Lts.</u>	<u>Concentración Mqs/Lts.</u>

Otra forma de dar la concentración es en partes por millón, para lo cual es preciso determinar el peso de la muestra; esto se consigue restando al peso de la botella más la muestra, el peso de la botella y se tiene que:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Peso del sedimento seco}}{\text{Peso de la muestra}} \times 10^6 \text{ p.p.m.}$$

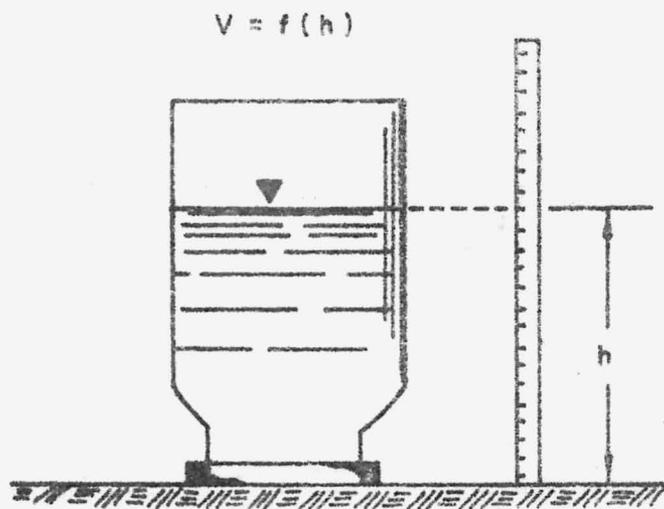
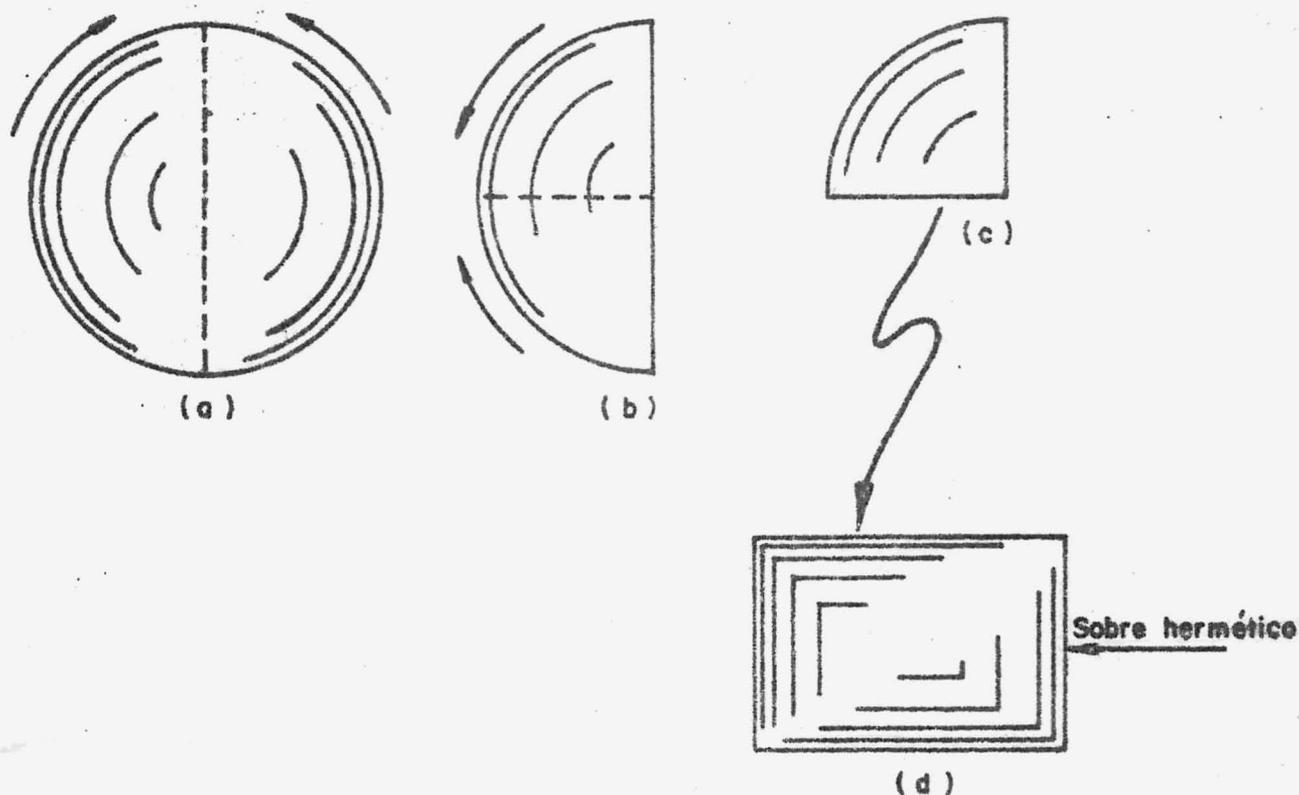


Fig. 3-B

Determinación del volumen de las muestras



Doblado de los filtros

Fig. 3-C

Filtrado sin calcinación

Se recomienda usar este método si los materiales en suspensión contienen cantidades apreciables de componentes orgánicos y carbonatos, así como cálcicos. El equipo de laboratorio para este tipo de filtrado es más complicado: 5/

- a) Horno secador (30° - 200°C)
- b) Bomba de vacío
- c) Balanza de lectura directa de 0 al 1000 gr., con una precisión de 0.05 gr.
- d) Balanza analítica con capacidad de 0 a 160 gr., con una precisión de 0.0001 gr. (Balanza Mettler)
- e) Cápsulas de porcelana, tamaño 3 con fondo perforado
- f) Filtros de fibra de vidrio
- g) Soportes para cápsula de porcelana
- h) Frasco de filtrado de 1000 cc.
- i) Disecador de vidrio
- j) Agente deshidratante para poner dentro del disecador, tales como: Cloruro de calcio, Gel de sílice, etc.
- k) Acido clorhídrico
- l) Peróxido de hidrógeno (Agua Oxigenada)
- m) Frasco lavador
- n) Manguera de hule y tubo de vidrio
- o) Agua destilada

El procedimiento de laboratorio recomendado es el siguiente:

- 1- Debe tenerse cuidado de que en las fórmulas (Formato No. 1) que acompañan a las muestras, vengan anotados todos los datos necesarios (Reglón 1 al 5).

 - 2- Limpiar, secar y eliminar toda sustancia o cuerpo extraño del exterior de la botella, incluyendo el tapón, etiquetas, papel engomado, etc.

 - 3) Pesar la botella más la muestra al 0.5 gs. de precisión inmediatamente después de recibir las muestras en el laboratorio. Una vez completado este paso, se anota el resultado en el renglón 6 de la fórmula.

 - 4- Cuando en la muestra se encuentra presente alguna sustancia orgánica, debe eliminarse usando Agua Oxigenada. Las sustancias flotantes deben removerse usando un pequeño colador.

 - 5- Si se precisa acelerar el asentamiento de las partículas, se le agregan una o dos gotas de ácido Clorhídrico, lo que es usualmente eficiente para precipitar el sedimento en 24 horas.
- Si después de este tiempo persiste la turbiedad en el líquido, es necesario agregar una o más gotas y dejar asentar la muestra por un tiempo más.

- 6- Cuando el sedimento se ha asentado lo suficiente, el líquido de la parte superior puede ser eliminado mediante vaciado o mediante sifonaje. Debe tenerse especial cuidado de no remover absolutamente nada de sedimento.

- 7- Pesar al 0.0001 gr. la cápsula de porcelana, a la cual se le ha colocado previamente, el filtro de fibra de vidrio. Este peso se anota en el renglón 11.

- 8- Agitar el remanente con una varilla de vidrio y depositarlo en una cápsula de porcelana a la cual se le ha colocado el filtro de fibra de vidrio. Este conjunto se coloca en forma similar al indicado en la Fig. 3-A, a fin de que el vacío - facilite el paso del líquido.

Si queda sedimento en la botella, lávese usando un frasco lavador y deposítese el agua de lavado en el filtro. Para el lavado del sedimento puede usarse el agua que ha sido eliminada de la muestra. (Paso 6).

- 9- Poner a secar en el horno a 110°C, la cápsula de porcelana - con la muestra. El tiempo de secado puede durar de 40 minutos para muestras muy pequeñas, a 6 horas para muestras muy grandes, dependiendo del agua remanente en el filtro.

- 10- Se coloca la cápsula en el desecador y se deja que se enfríe por lo menos durante una hora.

- 11- Pesar la cápsula más la muestra seca al 0.0001 gr. de precisión, anotando el dato en el renglón 10.
- 12- Si la botella muestreadora no está tarada, debe determinarse su peso, y para ello, lávese bien y póngase a secar al aire. Una vez seca, determínese su peso al 0.5 gr. de precisión y anótese en el renglón 7.
- 13- Calcular la concentración en la siguiente forma:
- a) Determinar el peso de la muestra original (renglón 6-7) y anotarlo en el renglón 8.
 - b) Determinar el peso del sedimento seco (renglón 10-11) y anotarlo en renglón 12.
 - c) Calcular la concentración en p.p.m. así:

$$\frac{(\text{renglón 12}) \times 10^6}{(\text{renglón 8})}$$

Determinación de la Granulometría del Sedimento en suspensión

Varios son los métodos conocidos para la determinación de la granulometría del sedimento en suspensión 5/; pero los más prácticos y fáciles de aplicar son:

- a) Tamizado Húmedo
- b) Tamizado Seco

Tamizado Húmedo

La operatoria es sencilla, usándose en general agua de un punto representativo del total del río, y para ello se procede a hacer pasar por una serie de tamices una muestra de 200 litros de agua. Las mallas que se utilizan según la ASTM son:

400
200
100
50

Una vez pasados los 200 litros de agua por los tamices se cierran y se envían al laboratorio, donde son secados y analizados en la siguiente forma:

- a) Se determina el tamaño del sedimento (abertura del tamiz)
- b) Se hace un cuadro de los porcentajes que pasan en cada tamiz.

c) Los resultados anteriores se plotean en un gráfico logarítmico de probabilidades, Fig. 3-D, con lo que se determina el tamaño medio del sedimento, extrapolando la recta que resulta de unir los puntos ploteados.

El método no permite dar muchos detalles de la distribución del sedimento fino, pero no se requiere mucha información al respecto.

Los residuos de este proceso deben ser sometidos a un análisis petrográfico, para determinar el origen geológico del sedimento.

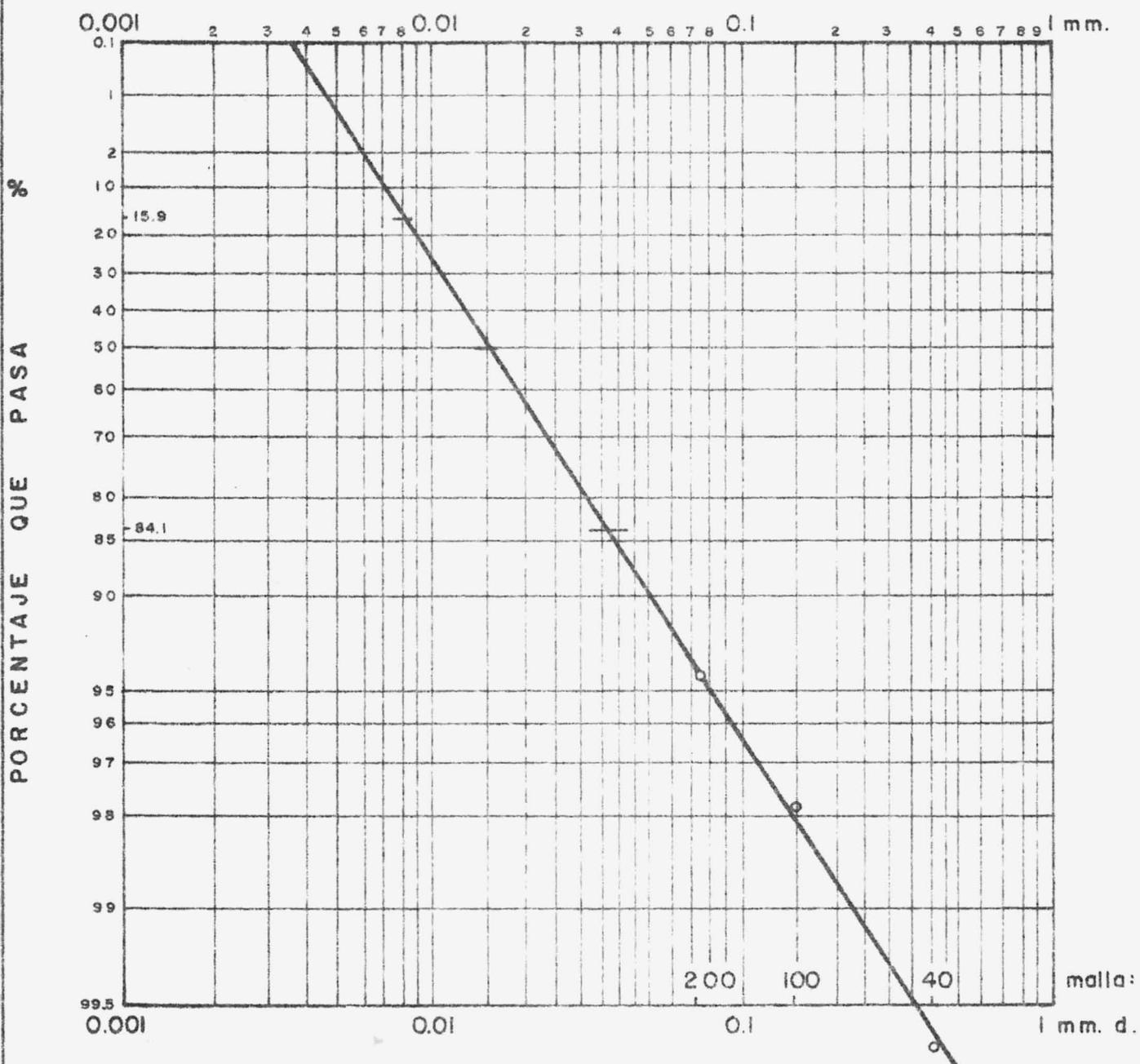
Tamizado Seco

Este método es aplicado para determinar la granulometría de los residuos del filtrado con calcinación y consiste en un análisis mecánico de dichos residuos.

Para ello se acumulan en un sólo recipiente los residuos del filtrado, y cuando la muestra es suficientemente grande, se somete al tamizado, para determinar su tamaño y el porcentaje que pasa o que da retenido en cada tamiz.

Se recomienda llevar un control de la granulometría del sedimento, para lo que se emplea el formulario No. 2.

DISTRIBUCION DE TAMAÑOS



$$\sigma_g = \sqrt{\frac{0.038}{0.0082}} = 2.14$$

Fig. 3 - D

CAPITULO IV

OPERATORIA DE OFICINA

Cálculo del muestreo:

El proceso a seguir es:

- a) Se anota toda la información general en el formulario No. 3, que aparece a continuación,
- b) Con los resultados del laboratorio se llenan las columnas correspondientes a "Datos de Laboratorio",
- c) Se calculan los valores X , siendo éstos, las distancias comprendidas entre la orilla y la vertical trazada para delimitar el área de influencia correspondiente a cada caudal parcial, en cada vertical de aforo, Fig. 4-A,
- d) Del aforo se obtienen los caudales parciales " q ", los que se anotan en forma acumulada, luego se transforman estos valores a tanto por ciento y se anotan en la columna correspondiente.
- e) Con los valores de $q\%$ acumulados, y $x\%$, se elaboran las "curvas integrales de caudal", las que se trazan para distintos valores de la lectura limnimétrica y por consiguiente con los caudales correspondientes a tales valores. Fig. 4-B.

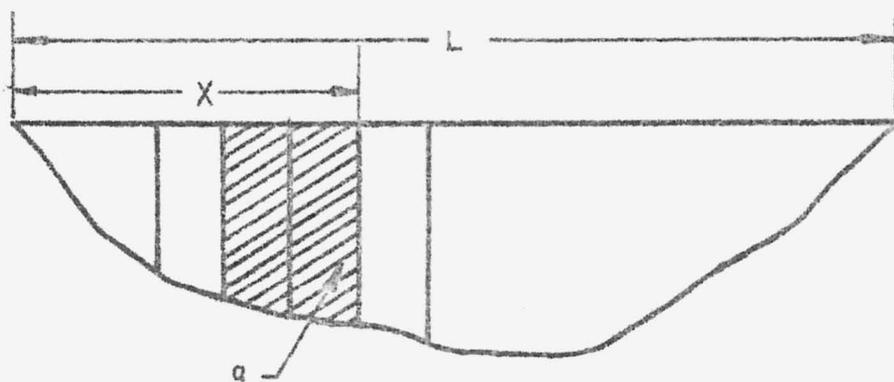
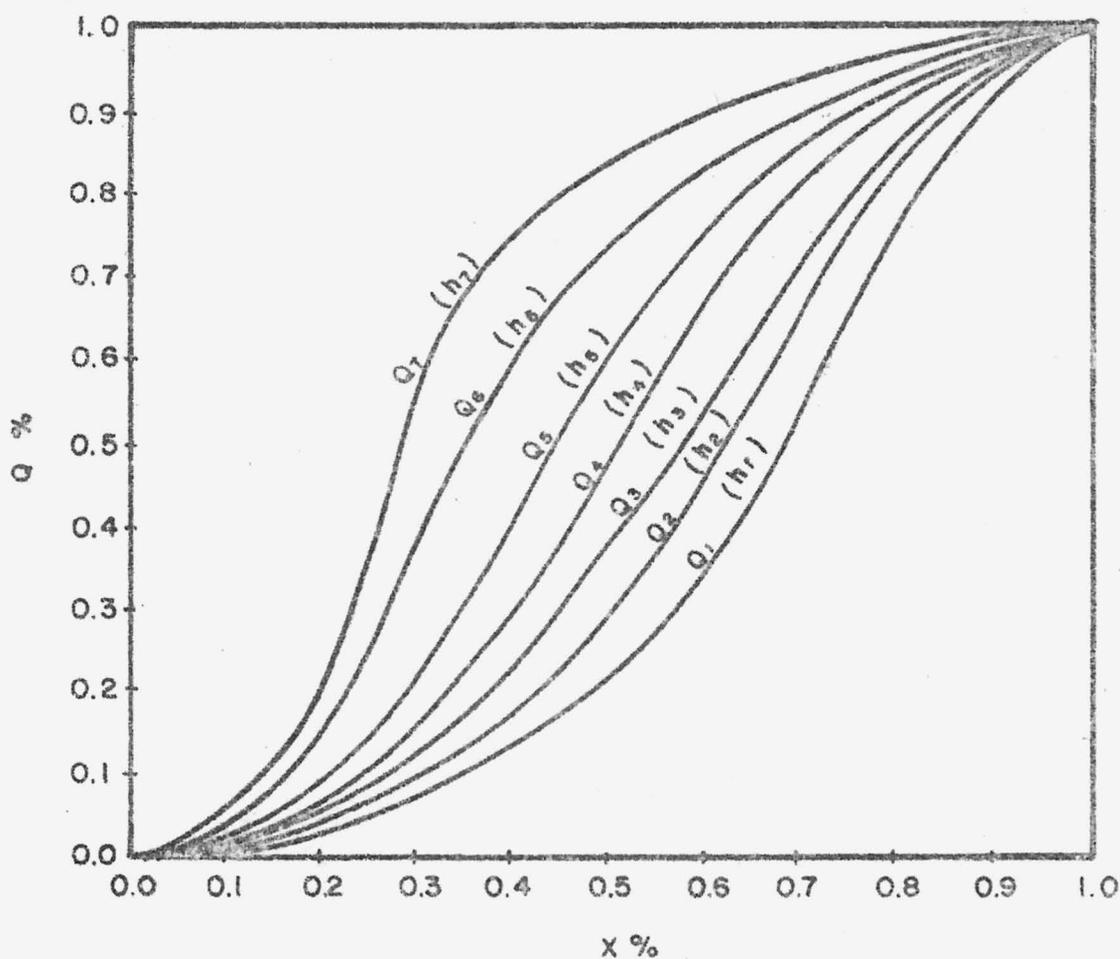


Fig. 4-A



Curvas integrales del caudal

Fig. 4-B

Nota:

Cada curva se traza en base a un caudal medido. La lectura de mira "h" sirve como referencia; el mismo.

- f) Se calcula el coeficiente de la vertical "a", por diferencia entre los valores sucesivos de q% acumulados, divididos por cien:

$$a = \frac{q\%}{100}$$

- g) Se multiplican los valores; $C_v \times a$, para cada vertical,
- h) Se suman los productos anteriores, para obtener la concentración media de la sección: $\bar{C} = \sum C_v \times a$
- i) Se calcula el gasto sólido así: $G_s = \bar{C} \times Q$, donde
 $Q =$ caudal total encontrado en el aforo.

Proceso Estadístico del gasto sólido suspendido

El presente trabajo se pretende que el interesado en la materia, obtenga los datos requeridos en una forma sencilla sin ahondar en procedimientos complejos, por lo que, si bien existen varios métodos para la determinación del gasto sólido, se tratará solamente un método el que además de ser satisfactorio, es muy sencillo y práctico.

Relación de la Curva de descarga de sedimentos,
 y de la curva de duración de descarga 6/

En este método se consideran dichas curvas, ya que se complementan para la obtención de los datos.

La curva de descarga de sedimentos, relaciona el caudal sólido - con el caudal líquido. Esta curva se deduce de los datos del muestreo y del aforo del río y para lo cual se toman como ciertas las siguientes suposiciones:

- 1- El sedimento en suspensión consiste fundamentalmente de material fino,
- 2- Este material fino proviene de la erosión superficial de la - cuenca.
- 3- La carga de sedimento es lo suficientemente reducida para permitir la suposición de que todo el sedimento aportado por la cuenca, puede ser acarreado en suspensión por el río.

La curva de duración de descarga relaciona la descarga líquida - con el tiempo de escurrimiento representado en porciento.

La relación de ambas curvas nos da el caudal sólido en suspensión transportado por un río durante un año.

En un ejemplo que se presenta a continuación se verá la forma de cómo estas dos curvas son operadas para obtener el gasto sólido escurrido en cierto período de tiempo. (un año).

El gasto sólido se presenta en: Ton/día, Ton/mes y Ton/año

CAPITULO V

ANALISIS PRELIMINAR DEL TRANSPORTE DEL SEDI-
MENTO SUSPENDIDO EN EL RIO TAISIHUAT, ESTA-
CION HIDROMETRICA HATO NUEVO.

El material de sedimentación en su mayor volumen transportado - por los ríos, procede directamente de la erosión causada por la lluvia al precipitarse y escurrir sobre la superficie del suelo. Más -- tarde este material en su curso se va acumulando poco a poco, espe-- cialmente en el área donde se construyen vasos de almacenamiento; -- proporcionando en sí un serio problema para el diseño de las mismas obras. De allí que es de suma importancia conocer el comportamiento y la magnitud de los sedimentos que son transportados por los ríos.

En El Salvador, estudios al respecto han sido rudimentarios. Sin embargo, en el transcurso del tiempo y con la ayuda del Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano, se espera avanzar en el análisis - cuantitativo de tan importante rama de la hidrología.

Como una aplicación de la teoría estudiada, se pretende reportar en forma preliminar el análisis del registro de sedimentos suspendidos y transportados por el Río Taisihuat afluente del Río Grande de San Miguel.

El objetivo de este trabajo es aportar datos suficientes para -- que sirvan a posteriori en el diseño de una represa que se tiene --

proyectada construir en dicho río. Proyecto que además está contemplado dentro de las obras de desarrollo en el plan de Riego del Proyecto de Olomega por nuestro Gobierno.

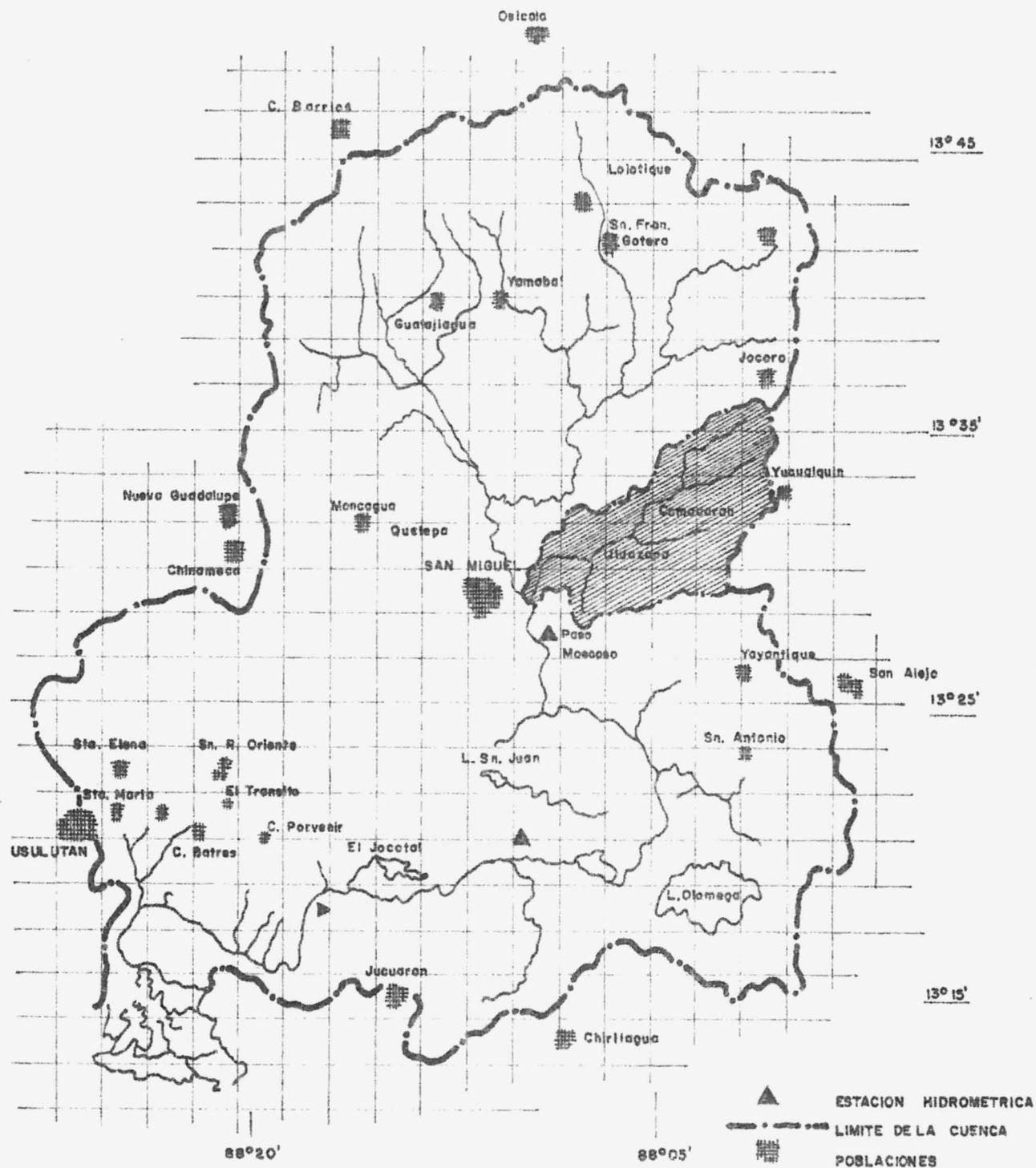
Descripción y Ubicación de la Zona de Estudio

El río Taisinuat, uno de los principales afluentes del río Grande de San Miguel, drena una hoya de 93.96 kilómetros cuadrados. Las características de la hoya hidrográfica son: Perímetro (50 kilómetros), Pendiente Media (18%), y elevación media sobre el nivel medio del mar (228.8 metros).

La Fig. 5-A muestra la cuenca del río Taisinuat enmarcada dentro de la cuenca total del Río Grande de San Miguel. La estación hidrométrica en donde se registran los sedimentos y el caudal corresponde al tipo cable canastilla y está equipado con un limnógrafo y un pluviómetro. Se encuentra instalada en el lugar de coordenadas, Latitud $13^{\circ}30.6$ N y longitud $88^{\circ}37'$ E, quedando justamente a 3 kilómetros de su desembocadura en el río Grande de San Miguel. La Fig. 5-B nos muestra la ubicación citada.

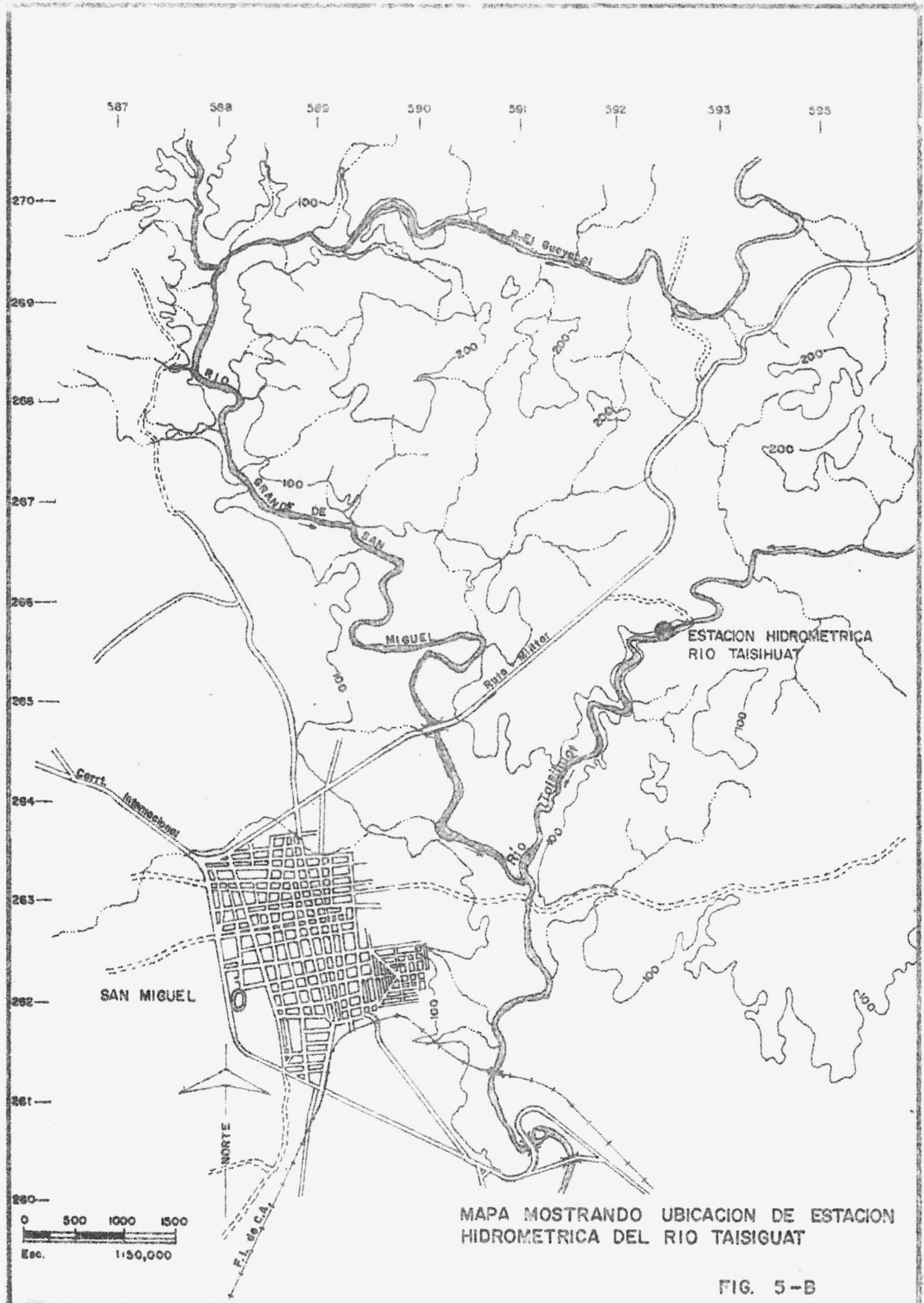
Método de Aforo, de Muestreo y Análisis de Sedimentos

El método de aforo ejecutado, ha dependido de las condiciones propias del río. Con barra fija y por vadeo cuando la profundidad y la fuerza de la corriente así lo requieran y con molinete suspendido



CUENCA DEL RIO GRANDE DE SN. MIGUEL
 MOSTRANDO CUENCA RIO TAISIHUAT

FIG. 5 - A



MAPA MOSTRANDO UBICACION DE ESTACION HIDROMETRICA DEL RIO TAIHGUAT

FIG. 5-B

en condiciones de crecida. Para cada aforo, los puntos tomados como base en cada vertical, han sido efectuados a 0.2 y a 0.8 de la profundidad total.

Para las pruebas de sedimento se han usado dos tipos de muestreadores integradores, el US-D-49, para usarlo suspendido durante las crecidas y el US-DH-48 manual para usarlo en las mediciones por va-deo. Ambos instrumentos han sido utilizados sumergiéndolos y extra-yéndolos a una velocidad más o menos constante, a fin de obtener una muestra confiable e integrada por sedimentos que son transportados en los diferentes puntos de la profundidad del río, estas muestras han sido tomadas a 1/4 de los extremos y a $\frac{1}{2}$ de la sección transversal del río.

El método de laboratorio utilizado para la determinación del contenido de sedimentos de las muestras, ha sido por decantación y cuyos diferentes pasos han sido explicados en el capítulo III de esta Tesis.

Curva de descarga

Siendo la curva de descarga una de las fases más importantes de los estudios hidrológicos, conviene por decirlo así, el poner especial cuidado en la elaboración de su construcción. Los métodos para graficarla difieren unos de otros, dependiendo cada uno de ellos según el criterio del autor que se considere. Sin embargo, los resultados últimos deberán ser más o menos iguales.

Proceso de Construcción de la curva

En base a los datos de los Cuadros: A, B, C, D y E, que no son más que los aforos del río efectuados durante los años de 1967 y parte de 1968. Se construye en papel milimetrado y sobre un eje de coordenadas X y Y, la curva de descarga. Conviene poner sobre el eje de las ordenadas, los niveles del agua en metros, y sobre el eje de las abscisas, las descargas en metros cúbicos por segundo, de cada aforo efectuado. Es decir, se ocuparán todos los datos de las hileras 3 y 4 de cada Cuadro en mención.

Cuando los datos pertenecen a diferentes años, se tratará de plotear los puntos en diferentes colores según el año que correspondan. Así, posteriormente se podrá observar fácilmente los cambios que ha sufrido la curva en cada año.

Estación de Aforo: Hato Nuevo

Coordenadas: 13°30.6'N, 88°08'1"E

Area de la Cuenca. M^2 93.96 km²

Elevación Cero de la Mira: _____

Nº de Aforo	SM-6	SM-6	SM-6	SM-6	SM-6	SM-6	SM-9	SM-9	SM-8	SM-9
Fecha:	7/1/67	18/11/67	30/3/67	1/IV/67	7/IV/67	30/IV/67	18/V/67	8/VI/67	16/VI/67	22/VI/67
Lectura de Mira, M.	0.38	0.30	0.73	0.74	0.73	0.64	0.96	0.82	0.47	0.55
Caudal, M ³ /s	0.133	0.043	0.046	0.054	0.045	0.027	1.090	0.562	0.139	0.130
Velocidad Media, M/s	0.195	0.160	0.200	0.210	0.210	0.120	0.210	0.170	0.460	0.270
Area Sección, (A), M ²	0.680	0.267	0.230	0.253	0.216	0.227	5.190	3.269	0.304	0.480
Ancho Sección, M	5.60	2.02	2.00	2.00	2.00	2.00	14.65	8.90	2.65	2.45
Profundidad Medio (T_m), M	0.12	0.13	0.12	0.13	0.11	0.11	0.35	0.37	0.11	0.20
Perímetro Mojado, M.	5.64	2.11	2.20	2.21	2.16	2.21	14.93	9.30	2.71	2.78
Radio Hidráulico, (R), M	0.120	0.126	0.105	0.114	0.100	0.103	0.348	0.352	0.112	0.173
$R^{2/3}$	0.243	0.250	0.223	0.236	0.215	0.220	0.495	0.500	0.232	0.310
$A \times R^{2/3}$	0.165	0.067	0.051	0.060	0.046	0.050	2.569	1.635	0.070	0.149
$\frac{1}{n} \times S^{1/2}$	0.118	0.239	3.921	3.500	4.565	2.400	0.082	0.104	6.571	1.812
$T_m^{1/2}$	0.346	0.360	0.346	0.360	0.331	0.331	0.590	0.607	0.331	0.446
$A \times T_m^{1/2}$	0.236	0.096	0.079	0.091	0.071	0.075	3.062	1.984	0.101	0.214

Observaciones:

CUADRO A

Rio Taisihuat Año 1967

Estación de Aforo: Hato Nuevo

Coordenadas: 13°30.6' N, 88°08' E

Area de la Cuenca. M^2 93.96 km²

Elevación Caro de la Mira: _____

Nº de Aforo	SM-8	SM-8	SM-9A	SM-9A	SM-10A	SM-10	SM-10	SM-10	SM-10	SM-10
Fecha:	28/VI/67	29/VI/67	30/VI/67	14/7/67	11/8/67	24/8/67	24/8/67	25/8/67	24/8/67	25/8/67
1 Lectura de Mira, M.	0.88	0.93	0.97	0.55	0.82	0.97	0.78	1.63	1.47	0.92
2 Caudal, M ³ /s	1.465	1.671	3.426	0.110	0.622	5.434	1.766	13.52	9.162	2.322
3 Velocidad Media, M/s	0.260	0.270	0.470	0.230	0.340	0.500	0.310	0.770	0.640	0.350
4 Area Sección, (A), M ²	5.730	6.250	7.240	0.485	1.812	10.920	5.700	17.510	14.390	6.620
5 Ancho Sección, M	17.80	17.90	18.00	2.40	6.50	16.85	13.90	17.90	17.55	16.30
6 Profundidad Media(T _m),M	0.32	0.35	0.40	0.20	0.28	0.65	0.41	0.98	0.82	0.41
7 Perímetro Mojado, M.	18.02	18.00	18.28	2.63	6.64	17.45	4.15	18.95	18.27	16.50
8 Radio Hidráulico,(R),M	0.318	0.347	0.396	0.184	0.273	0.626	0.403	0.924	0.787	0.401
9 R ^{2/3}	0.465	0.493	0.540	0.324	0.420	0.740	0.548	0.950	0.860	0.547
10 A × R ^{2/3}	2.664	3.081	3.010	0.157	0.761	8.081	3.124	16.634	12.375	3.621
11 $\frac{1}{n} \times S^{1/2}$	0.097	0.088	0.120	1.46	0.447	0.062	0.099	0.047	0.052	0.097
12 $\frac{1}{T_m}$	0.565	0.591	0.631	0.446	0.529	0.805	0.640	0.990	0.905	0.640
13 A × T _m ^{1/2}	3.237	3.694	4.568	0.216	0.958	8.791	3.648	17.335	13.023	4.237

Observaciones:

CUADRO B

Estación de Aforo: Hato Nuevo

Coordenadas: 13°30.6'N, 88°87'E

Area de la Cuenca. M^2 93.96 km²

Elevación Cero de la Mira: _____

Nº de Aforo	SM-9A	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Fecha:	30/8/67	4/9/67	11/9/67	12/9/67	14/9/67	14/9/67	14/9/67	15/9/67	20/9/67	28/9/67
1 Lectura de Mira, M.	0.620	0.520	0.640	0.840	1.400	1.050	0.930	0.610	0.780	0.840
2 Caudal, M ³ /s	0.281	0.088	0.581	1.940	14.988	6.302	5.199	0.466	1.370	0.641
3 Velocidad Media, M/s	0.280	0.360	0.220	0.333	0.647	0.500	0.456	0.201	0.300	0.370
4 Area Sección, (A), M ²	1.006	0.244	2.600	5.820	23.130	12.540	11.380	2.320	4.520	1.740
5 Ancho Sección, M	4.150	3.430	13.000	14.700	19.130	17.320	16.900	12.920	12.600	6.470
6 Profundidad Media (T _m), M	0.240	0.070	0.200	0.400	1.210	0.720	0.670	0.180	0.360	0.270
7 Perímetro Mojado, M.	4.190	3.460	13.100	14.950	20.270	17.800	17.410	13.150	12.850	6.550
8 Radio Hidráulico, (R), M	0.240	0.071	0.198	0.389	1.141	0.704	0.654	0.176	0.352	0.266
9 R ^{2/3}	0.387	0.172	0.340	0.538	1.100	0.790	0.760	0.315	0.500	0.411
10 A x R ^{2/3}	0.389	0.042	0.884	3.131	25.443	9.907	8.649	0.731	2.260	0.715
11 $\frac{1}{n} \times S^{1/2}$	0.720	1.860	0.250	0.106	0.025	0.050	0.053	0.275	0.132	0.520
12 $\frac{1}{2} T_m$	0.490	0.264	0.446	0.631	1.100	0.876	0.819	0.424	0.600	0.520
13 A x $\frac{1}{2} T_m$	0.493	0.113	1.160	3.672	25.443	10.985	9.320	0.984	2.712	0.905

Observaciones:

CUADRO C

Rio Taisihuat año 1967

Estación de Aforo: Hato Nuevo

Coordenadas: 13°30.6' N, 88°87' E

Area de la Cuenca. M^2 93.96 km²

Elevación Cero de la Mira: _____

Nº de Aforo	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Fecha:	30/9/67	30/9/67	3/X/67	5/X/67	10/X/67	12/X/67	12/X/67	14/X/67	17/X/67	20/X/67
Lectura de Mira, M.	1.100	1.190	0.750	0.910	1.050	1.060	0.830	1.050	0.74	0.710
Caudal, M ³ /s	6.271	8,864	0.294	2.175	4.448	3.823	2.107	5.993	0.671	0.958
Velocidad Media, M/s	0.570	0.670	0.080	0.440	0.360	0.310	0.270	0.560	0.310	0.400
Area Sección, (A), M ²	10.930	13.210	3.600	4.930	12.200	12.300	7.900	10.760	2.136	2.387
Ancho Sección, M	18.320	18.620	13.700	14.400	18.030	18.050	13.200	18.130	10.020	10.400
Profundidad Media (T _m), M	0.600	0.710	0.260	0.340	0.680	0.680	0.600	0.590	0.210	0.230
Perímetro Mojado, M.	18.700	19.160	13.800	14.550	18.500	18.500	13.500	18.500	10.150	10.620
Radio Hidráulico, (R), M	0.584	0.689	0.261	0.339	0.659	0.665	0.585	0.582	0.210	0.225
R ^{2/3}	0.698	0.780	0.410	0.483	0.755	0.760	0.700	0.698	0.353	0.730
A x R ^{2/3}	7.629	10.304	1.476	2.381	9.211	9.348	5.530	7.510	0.754	0.883
$\frac{1}{n} \times S^{1/2}$	0.075	0.065	0.054	0.185	0.039	0.033	0.049	0.075	0.412	0.450
$\frac{1}{T_0}$	0.774	0.842	0.510	0.583	0.825	0.825	0.775	0.769	0.458	0.479
A x T ₀ ^{1/2}	8.460	11.123	1.836	2.374	10.065	10.147	6.122	8.274	0.978	1.143

Observaciones:

CUADRO D

Estación de Aforo: Hato Nuevo

Coordenadas: 13°30.6'N, 88°87'E

Area de la Cuenca. M² 93.96 km²

Elevación Cero de la Mira: _____

Nº de Aforo	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Fecha:	28/X/67	1/XI/67	8/XI/67	11/XI/67	17/XI/67	24/XI/67	28/XI/67	6/12/67	15/12/67	19/12/67
1 Lectura de Mira, M.	0.630	0.630	0.570	0.570	0.560	0.550	0.550	0.520	+ 0.490	+ 0.480
2 Caudal, M ³ /s	0.395	0.388	0.237	0.222	0.184	0.139	0.110	0.067	0.055	0.114
3 Velocidad Media, M/s	0.220	0.224	0.211	0.198	0.308	0.246	0.146	0.094	0.497	0.432
4 Area Sección, (A), M ²	1.795	1.730	1.124	1.122	0.597	0.566	0.752	0.706	0.111	0.263
5 Ancho Sección, M	6.370	6.300	4.000	4.000	3.400	3.300	3.450	3.150	1.620	2.350
6 Profundidad Medio (Z _m), M	0.280	0.270	0.280	0.280	0.170	0.170	0.220	0.220	0.070	0.110
7 Perímetro Mojado, M.	6.630	6.500	4.490	4.470	3.820	3.520	3.870	3.490	1.770	2.470
8 Radio Hidráulico, (R), M	0.271	0.266	0.250	0.251	0.156	0.161	0.194	0.202	0.063	0.106
9 R ^{3/4}	0.418	0.412	0.397	0.397	0.288	0.295	0.333	0.342	0.158	0.224
10 A x R ^{3/4}	0.750	0.713	0.446	0.445	0.172	0.167	0.250	0.241	0.017	0.0589
11 $\frac{1}{4} \times S^{3/4}$	0.290	0.310	0.470	0.440	1.790	1.470	0.580	0.39	29.200	7.300
12 $\frac{S^3}{10}$	0.529	0.520	0.529	0.529	0.412	0.412	0.468	0.463	0.265	0.332
13 A x $\frac{S^3}{10}$	0.949	0.900	0.594	0.593	0.246	0.233	0.352	0.330	0.029	0.087

Observaciones:

CUADRO E

Como se podrá observar, la tendencia de la curva es parabólica, presentando en su trayectoria dos partes diferentes. La primera, -- completamente curva y que obedece a los aforos de la época de estiaje y la segunda parte, que por la complejidad de los aforos en la - época de invierno se supone que sigue la tendencia de una recta. Ver Fig. 5-C. De notoria importancia es saber construir la segunda parte de la curva, ya que para altos niveles del río, inferimos también altas crecidas.

Extrapolación de la Curva de descarga en su segunda face

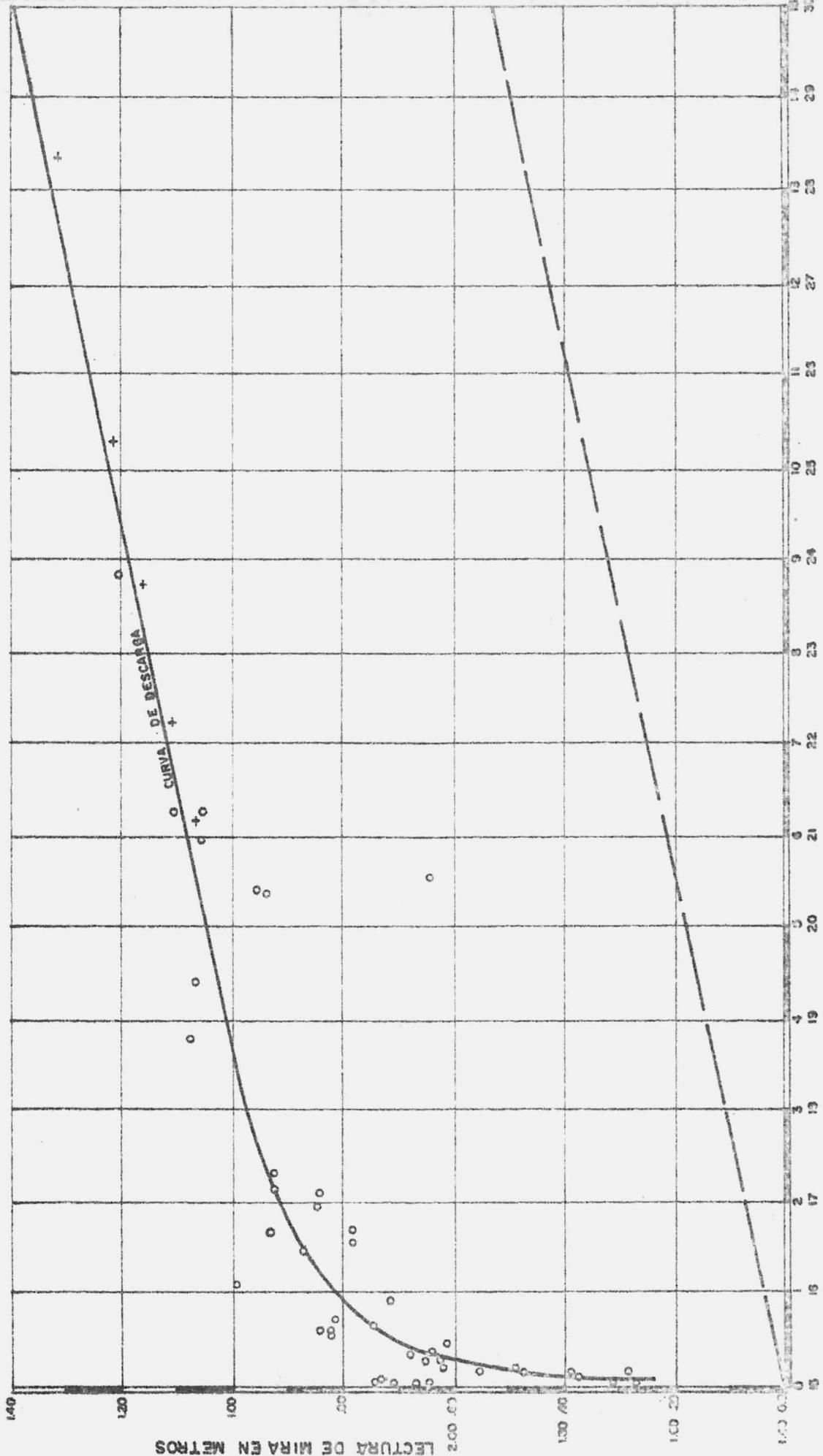
Método (Area, Velocidad Media),. En base a la ecuación de continuidad, cuya expresión general es: $Q = A \times V_m$

en donde: $Q =$ caudal en m^3/s

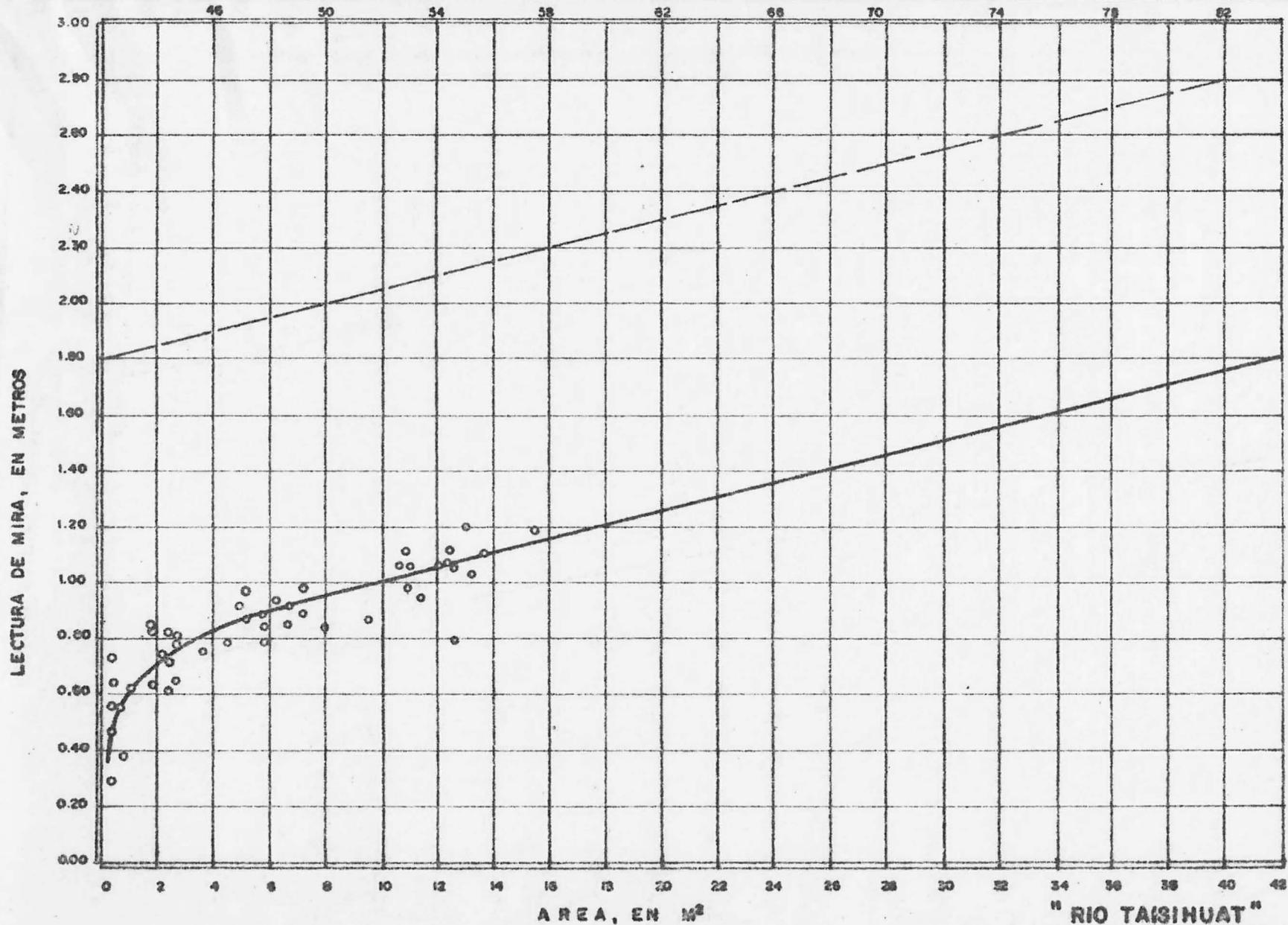
$A =$ Area de la sección en m^2 y

$V_m =$ Velocidad media en m/s

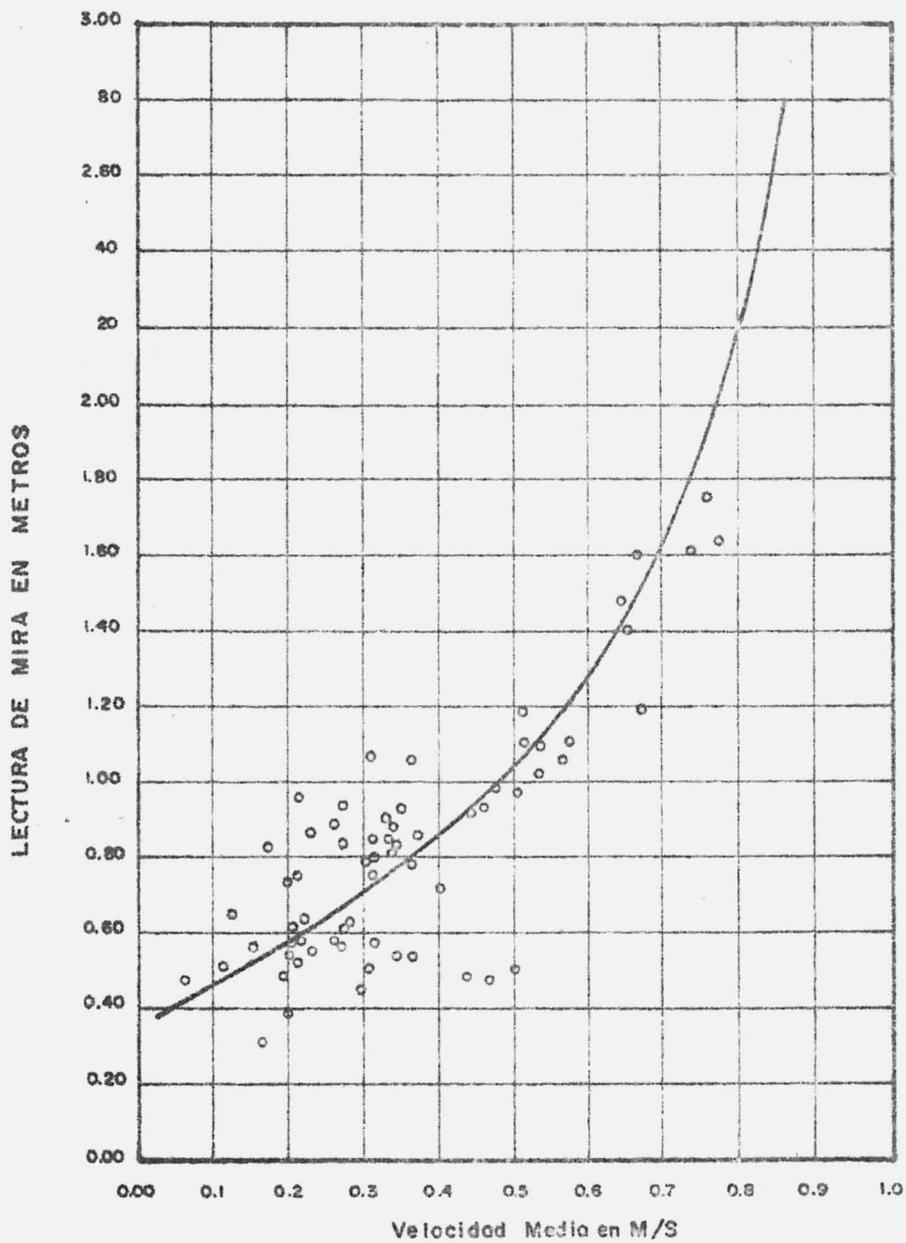
Se construyen dos sistemas de curvas, una que relacione los niveles del agua con el área de la sección (fila 4) y otra que relacione los mismos niveles con la velocidad media calculada (fila 3). Ver - Ver Fig. 5-D y 5-E. Seleccionando iguales niveles en cualquiera de - las dos curvas, especialmente para valores altos, podemos obtener diferentes valores de A y V_m , que al multiplicarlos entre sí nos producen una serie de descargas Q . Como estos caudales corresponden a altos niveles, nos servirán entonces para seguir extrapolando la curva



"RIO TAISHUAT"
CURVA DE DESCARGA
Fig. 5-C



" RIO TAISHUAT "
 Aforos 1967-1963
 CURVA MOSTRANDO LA RELACION
 LECTURA DE MIRA VR3. AREA



" RIO TAISHUAT "
 RELACION LECTURA DE MIRA
 VRS. VELOCIDAD MEDIA

Fig. 5 - E

de descarga. Los puntos indicados mediante una cruz en la curva de la Fig. 5-C, han sido extrapolados mediante este método.

"Aplicación de la fórmula de Manning"

Aunque esta fórmula hidráulicamente está deducida para canales, puede también usarse para el análisis de las cualidades geométricas e hidráulicas de los aforos realizados, especialmente cuando se tienen crecidas. Esto se debe a que cuando se tiene una lámina de agua bastante gruesa, la pendiente del eje hidráulico toma un valor promedio, pasando por alto las pequeñas variaciones en la pendiente -- del lecho. De aquí que las fórmulas para canales abiertos, sean --- aplicables a cauces naturales, con mayor seguridad para los estados altos que a los bajos. 6/

De la ecuación de Manning:

$$Q = A \times \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

en donde:

Q = caudal en m³/s

A = Area de la sección en m²

n = coeficiente de rugosidad del lecho

R = radio hidráulico en m. y.

S = pendiente del eje hidráulico en (o/oo)

Podemos construir como en el caso anterior, dos sistemas de curvas, una que relacione los niveles del río con el factor geométrico

de la sección ($AR^{2/3}$), (fila 10) y otra que relacione los mismos niveles con el factor hidráulico ($\frac{1}{n} \times S^{\frac{1}{2}}$), (fila 11). Mediante valores inducidos de estas dos curvas para valores iguales de lecturas \dot{h} de mira, obtenemos como en el caso anterior, una serie de valores de Q , que después nos servirán para la extrapolación de la curva de descarga original.

Curva de duración de descarga

La curva de duración de descarga como la anteriormente descrita, constituye otra de las faces importantes de los estudios hidrológicos de una corriente. Su trazo debe ser de cuidado y con mucho criterio.

Para ello se hace uso de los fluviogramas, pues de éstos se obtienen los valores de los niveles que alcanzó el río durante el período de un año, en nuestro caso el año 1967. Estos valores son llevados a la curva de caudales ya graficada, de donde se obtienen los caudales correspondientes a cada altura registrada. Las cartas de registro usadas en nuestro caso son para un mes y están divididas en días, los que a su vez están fraccionadas en intervalos de cuatro horas. Ver Fig. 5-F.

Extrapolación de la Curva de duración de descarga

El método más común y más sencillo para el trazo de esta curva, comprende los siguientes pasos:

- a) De las cartas limnigráficas se obtienen las alturas correspondientes a cada punto donde el fluviograma intersecta a cada línea vertical. Estos valores representan los niveles alcanzados por la corriente cada cuatro horas. En formularios espe--

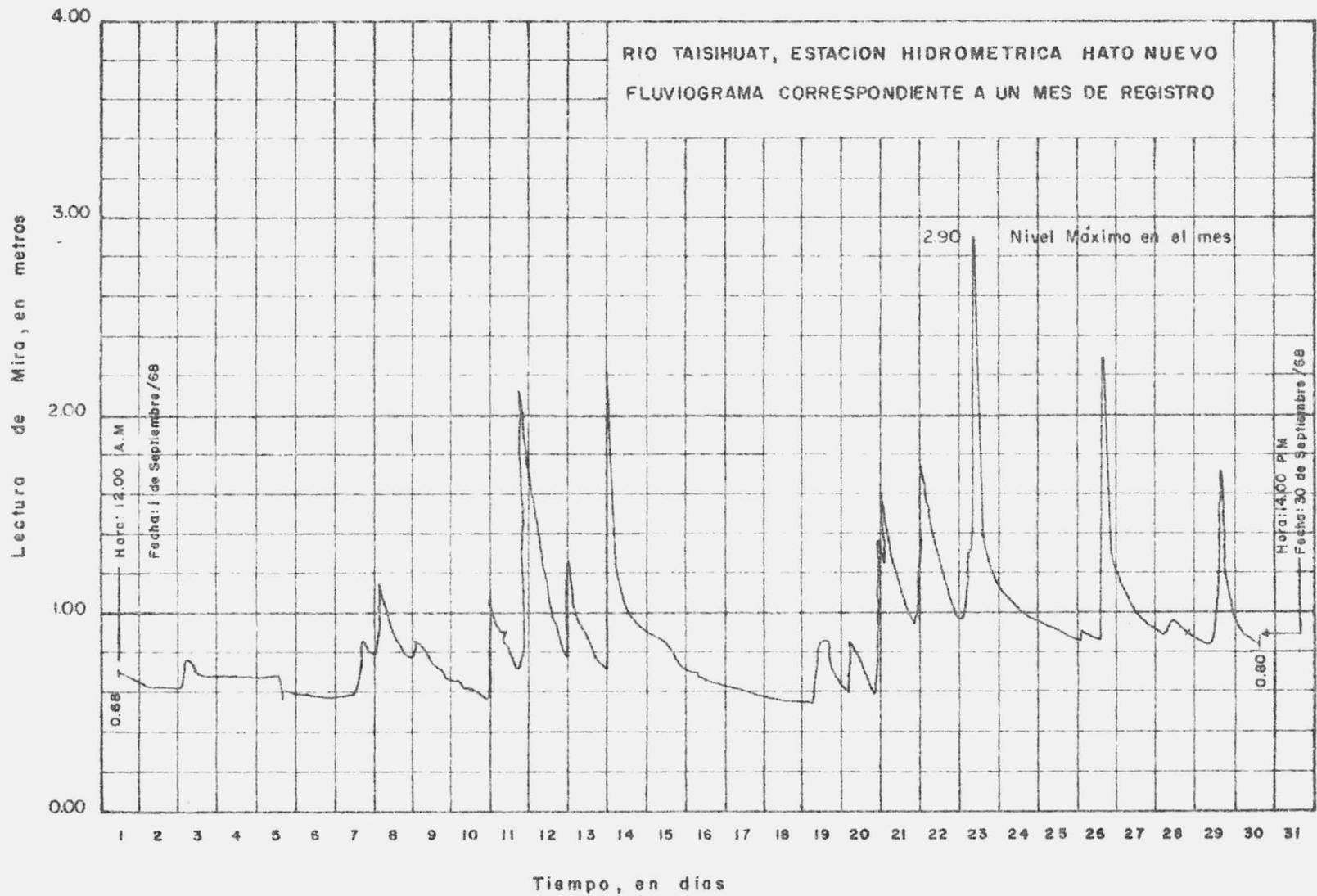


Fig. 5-F

ciales, se van anotando cada una de las lecturas, obteniéndose para cada día, siete valores como mínimo.

- b) Una vez completadas todas las lecturas para el año, se procede a determinar de la curva de caudales, el caudal correspondiente a cada uno de los valores leídos.
- c) Se calcula el promedio de los caudales escurridos durante el día, obteniéndose así una serie de caudales medios diarios.
- d) Se tabulan en forma descendente todos los caudales medios diarios, correspondiendo al primer día la máxima descarga promedio y así sucesivamente.
- e) En papel milimetrado y sobre un eje de coordenadas X y Y, se construye la relación, descarga en metros cúbicos por segundo, contra el tiempo durante el cual, el caudal ha sido igualado o excedido; dando como resultado la curva de duración de descarga.

Este es un método muy sencillo de llevar a la práctica y sus resultados son aceptables, aunque tiene el inconveniente de que siendo los valores resultantes promedios diarios de los caudales escurridos, no se pueden determinar máximas crecidas, así como el de que no se pueden obtener valores de descarga para un tiempo menor de un día

Otro método usado para la determinación de la curva de duración de descarga, es el de trabajar directamente en los fluviogramas. Método considerado en el presente ejemplo y cuyo proceso a seguir es:

- a) Se determina previamente los tiempos para los cuales se desea conocer las descargas.
- b) Se traza en las cartas limnigráficas, líneas horizontales de modo que corten al hidrograma en puntos tales que los tramos comprendidos entre punto y punto representen un tiempo previamente establecido.
- c) Se leen las alturas correspondientes a cada tiempo y en la -- curva de descarga se obtiene el caudal correspondiente a cada altura.
- d) Los tiempos considerados se transforman a valores en porciento.
- e) En papel logarítmico se plotean los tiempos en porciento, contra las descargas respectivas y la unión de los puntos así obtenidos, dan como resultado la curva de duración de descarga.

En el Cuadro No. 1 aparecen tabulados los valores que sirvieron para el trazo de dicha curva; valores que corresponden al registro - llevado en la Estación Hidrométrica "Hato Nuevo", del río Taisihuat, durante los años climáticos de 1966 y 1967.

CUADRO No. 1

Tiempo	% de Tiempo	Altura en metros	Descarga en m ³ /s
1 hora	0.0113	3.24	68.54
2 hora	0.0226	2.98	57.80
3 "	0.0339	2.44	45.00
4 "	0.0452	2.40	43.90
6 "	0.0678	2.20	38.20
8 "	0.0904	2.18	37.56
10 "	0.1130	2.15	36.76
14 "	0.1600	1.97	33.00
1 día	0.275	1.76	25.44
2 "	0.550	1.50	18.00
3 "	0.825	1.32	12.96
4 "	1.100	1.25	10.92
6 "	1.650	1.14	7.80
8 "	2.200	1.11	6.94
10 "	2.750	1.07	5.80
15 "	4.125	0.96	2.84
30 "	8.250	0.82	1.04
60 "	16.500	0.76	0.72
90 "	24.750	0.70	0.50
134 "	36.850	0.66	0.36

Trazo de la Curva Sedimentos Vrs. Descarga

Esta curva es trazada en la misma gráfica donde aparece la "curva de duración de descarga" y la razón de ello es que están estrechamente relacionadas, pues para la determinación de la cantidad del sedimento transportado por determinado río en un período cualquiera, - ambas entran en juego. Esto se podrá observar más adelante.

Para el trazo de la curva de "sedimentos vrs. descarga", se parte de los valores resultantes del análisis de las muestras y del caudal encontrado en el aforo durante el muestreo efectuado. Cuadro No. 2.

CUADRO No. 2

Análisis de Sedimentos suspendidos -
Estación Hato Nuevo, Río Taisihuat

Fecha	Concentración del sedimento en p.p.m.	Caudal del río en m^3/s
10-II-67	30.6	0.045
22-II-67	44.6	0.040
8-III-67	47.6	0.032
31-III-67	69.0	0.046
7-IV-67	83.4	0.045
25-IV-67	41.4	0.034
18-V-67	115.0	1.090
16-VI-67	266.0	0.139
22-VI-67	170.0	0.130
29-VI-67	366.0	1.671
28-VI-67	284.0	1.465
14-VII-67	42.4	0.110
24-VIII-67	1180.0	1.766
25-VIII-67	749.0	13.516
30-VIII-67	27.1	0.281
14-IX-67	1275.0	6.302
20-IX-67	49.3	0.958
26-IX-67	34.11	0.395
11-XI-67	27.60	0.222
26-XI-67	44.29	0.110
6-XII-67	16.50	0.080
15-XII-67	46.50	0.055
19-XII-67	253.00	0.114

Los datos considerados para el trazo de dicha curva, son dados - en toneladas métricas por días, para el sedimento, y en metros cúbicos por segundo para el caudal.

En el laboratorio, al hacer al análisis de las muestras, se determina el peso en gramos tanto de la muestra como del sedimento seco; por lo que es preciso reducir este valor a Toneladas métricas -- por día. Esto se consigue partiendo de las siguientes suposiciones:

- a) El caudal escurrido durante todo el día es constante, siendo el mismo encontrado al tomar la muestra.
- b) No conociendo la cantidad de sedimento que transporta el río cada segundo se supone que la cantidad encontrada en la muestra, también es constante durante todo el día, para el mismo volumen de la muestra.

De lo anterior se tiene: que si en determinado caudal (m^3/s), pasa cierta cantidad de sedimentos (gr); durante todo el día pasarán - tantas cantidades (gr), como segundos tiene el día.

Esto se ve en la siguiente relación:

$$\frac{Ps}{Vm} = \frac{Gs}{Q}$$

$$\therefore Gs = \frac{Ps}{Vm} Q \text{ gr/s.}$$

Donde:

P_s = peso del sedimento seco, en gramos

V_m = volumen de la muestra, en metros cúbicos

Q = caudal del aforo durante el muestreo en metros cúbicos por segundo.

G_s = gasto sólido (sedimentos) en gramos por segundo

Para reducir el gasto sólido a Toneladas métricas por día, se multiplica por 86.400 segundos que tiene el día y se divide entre 1,000.000 gramos que tiene la tonelada:

$$G_s = 0.0864 \frac{P_s}{V_m} Q \text{ Ton/día} \quad (1)$$

En caso de que no se conozca el volumen de la muestra (V_m) pero sí, su peso (P_m), la fórmula anterior se transforma en:

$$G_s = 0.0864 CQ \text{ Ton/día} \quad (2)$$

Donde: C = concentración en p.p.m.

Esta fórmula resultó de sustituir el volumen de la muestra (V_m) por su igual según la consideración siguiente: de que un litro de agua con sedimento pesa un kilogramo, y se tiene:

$$\frac{V_m}{P_m} = \frac{0.001 \text{ m}^3}{1000 \text{ gr}}$$

$$\therefore V_m = 10^{-6} P_m$$

Sustituyendo este valor en la fórmula (1), se tiene:

$$G_s = 0.0864 \frac{P_s}{P_m \times 10^{-6}} Q$$

$$G_s = 0.0864 \frac{P_s}{P_m} \times 10^6 Q$$

Siendo $\frac{P_s}{P_m} \times 10^6$ igual a la concentración en p.p.m., resulta:

$$G_s = 0.0864 CQ \text{ Ton/día} \quad (2)$$

De las fórmulas (1) y (2), se deduce que la concentración puede determinarse también conociendo el peso del sedimento seco (P_s) y el volumen de la muestra (V_m).

Para el trazo de la curva de sedimentos vrs. caudal, se determinó cada gasto sólido en función de la concentración, usándose la fórmula (2).

Las gráficas de la Fig. 5-G, resultado del resumen de los datos - obtenidos del río Taisihuat, nos permiten determinar en forma directa el transporte de sedimentos en toneladas métricas por día, que ha --- transportado cada una de las descargas.

El manejo de ellas es muy sencillo:

- a) En la escala horizontal superior se escoje un tiempo para el -- cual se desea saber el gasto sólido acarreado durante él.

- b) Siguiendo la línea que corresponde el tiempo considerado, se llega a cortar la curva de duración de descarga para el tiempo escogido.
- c) Se parte desde este punto siguiendo la línea horizontal hasta cortar la curva de sedimentos vrs. caudal.
- d) Del punto resultante al hacer lo indicado en el paso anterior, se parte nuevamente en forma normal hacia abajo hasta cortar la escala horizontal inferior.
- e) El valor encontrado en el paso (d), en la escala horizontal inferior, corresponde a la cantidad de sedimentos en toneladas métricas por día transportadas por el río en dicho tiempo.

Los resultados así obtenidos, aparecen tabulados en el Cuadro ---
No. 3.

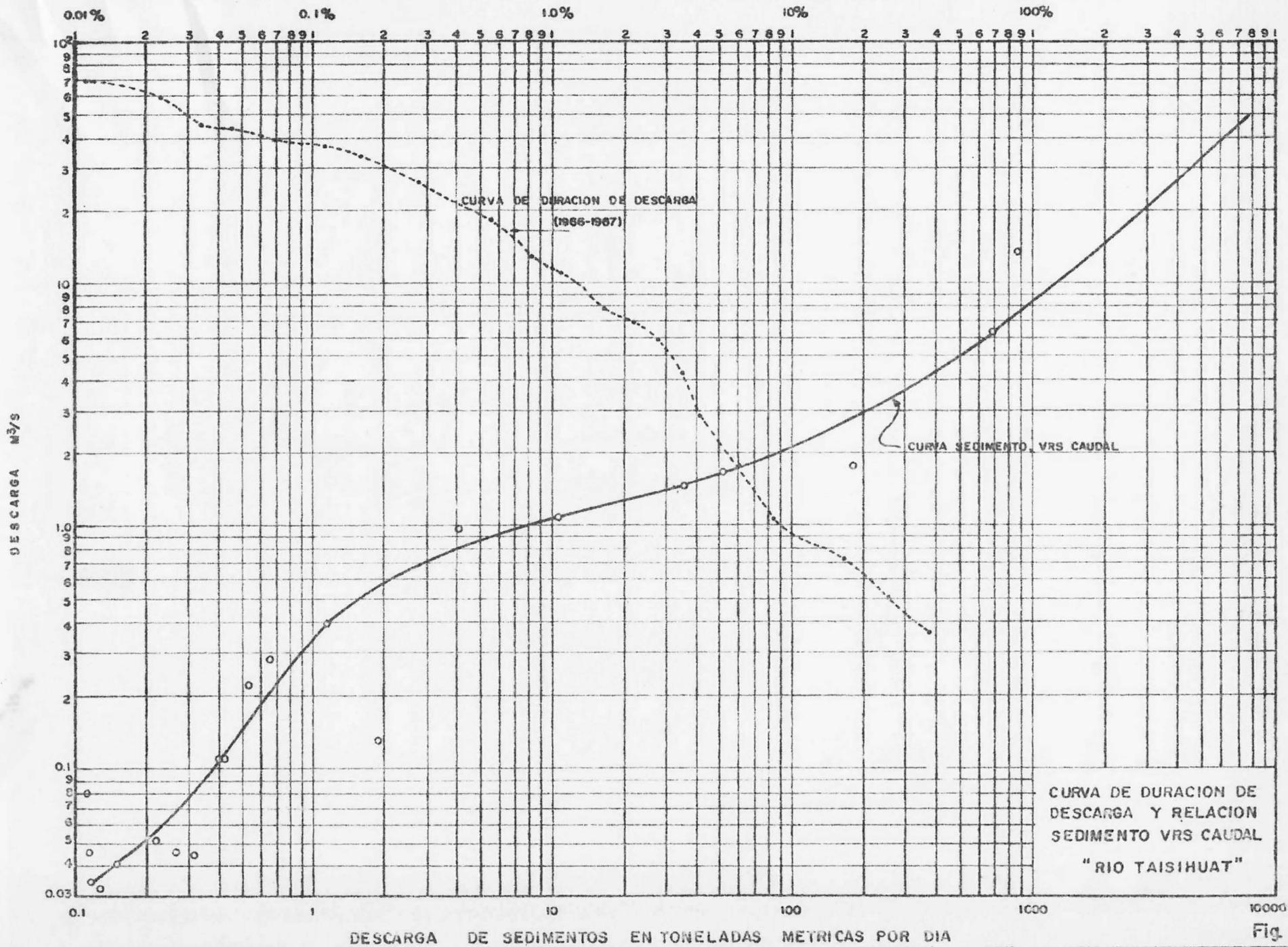


Fig.

CUADRO No. 3

Estimación de Sedimentos en suspensión acarreados por el Río Taisihuat.

Orden	Intervalo	L.M.(mts)	U(m ³ /seg)	Sedimento Ton.m/día	Transporte de sedimentos ton.m.
1	1 hora	3.24	68.54	10,000	467
2	2 horas	2.88	57.00	8,800	733
3	3 "	2.44	45.00	6,800	850
4	4 "	2.40	43.90	6,600	1,100
5	6 "	2.20	38.20	5,900	1,475
6	8 "	2.18	37.56	5,700	1,900
7	10 "	2.15	36.76	5,400	2,250
8	14 "	1.97	33.00	4,900	2,850
9	1 día	1.76	25.44	3,650	3,650
10	2 días	1.50	18.00	2,500	5,000
11	3 "	1.32	12.96	1,650	4,950
12	4 "	1.25	10.92	1,400	5,600
13	6 "	1.14	7.80	920	5,320
14	8 "	1.11	6.94	770	6,160
15	10 "	1.07	5.80	600	6,000
16	15 "	0.96	2.84	185	2,775
17	30 "	0.82	1.04	10	300
18	60 "	0.76	0.72	3	180
19	90 "	0.70	0.50	0.16	14.40
20	134 "	0.66	0.36	0.11	14.74
Total 365					51,947.14 Ton/año

CAPITULO VI

Método para la Determinación del Arrastre sobre el Fondo

Generalidades

Antes de 1920, la mayor parte del estudio de arrastre de sedimentos se encontró en el estudio del arrastre de fondo, problema primordial de los ríos europeos. Más tarde se inició el estudio del arrastre en suspensión para volver hoy día al tema inicial, siendo P. Duboys el primero en enunciar una teoría semirracional del arrastre de fondo. [/]

El fenómeno del arrastre sobre el fondo es muy complejo, no ha biéndose desarrollado hasta la fecha una teoría que permita su aplicación total. Una forma más lógica y objetiva para la determinación del gasto sólido sería mediante mediciones directas en el sitio de interés.

La medición del sedimento arrastrado por el fondo es prácticamente imposible o al menos muy costosa y difícil.

El fenómeno del movimiento de sedimentos en una corriente o cauce se verifica de dos maneras:

- a) Material que es transportado en suspensión por efecto de la Turbulencia, o sedimento suspendido.

b) Material arrastrado por el fondo o sedimento arrastrado.

Medición directa del arrastre sobre el fondo

Cuatro técnicas son las más usadas para la medición directa - del sedimento arrastrado. 8/ Ellas son:

- a) Uso de Muestreadores
 - b) Uso de Trampas
 - c) Mediciones en zonas turbulentas
- a) Muestreadores: Los más utilizados para mediciones del sedimento arrastrado producen generalmente serios problemas de operación - que desalientan su empleo.

En cuestión se trata de cajones de malla parecidos a los indicados en la Fig. 6-A, los cuales son colocados en el fondo de la corriente. A pesar de que el diseño, cual es de que la malla y el armazón de la trampa no alteren las características dinámicas de la corriente, la práctica indica que ésto es casi imposible - de conseguir.

Experiencias efectuadas en el Conal de la Central Abanino de Chile, han demostrado que este método no es recomendable, ya que no más del 1% de las partículas colocadas enfrente del muestreador lograron ingresar a éste.

Ante ese problema podrían diseñarse muestreadores que crucen totalmente el fondo del río o canal, como se muestra en la Fig. 6-B. Sin embargo, existe el inconveniente de no poder anclar debidamente el muestreador y más difícil aún retirarlo periódicamente del fondo a fin de extraer el sedimento recolectado. De lo anterior se deduce que sólo puede usarse en canales o secciones revestidas.

- b) Trampas: Este método directo es el único que da buenos resultados y consiste en hacer una especie de canaleta en la sección transversal del fondo del río, a manera de desarenador. Así al paso de la corriente se depositarán los sedimentos en la canaleta o trampa, ver Fig. 6-C.

En este método el problema estriba en la extracción del sedimento ya que para conseguirlo debe desviarse el curso de la corriente. Esto es sin considerar el alto costo de la estructura, que obviamente queda confinada específicamente al caso de pequeños cauces.

- c) Medición del Sedimento en zonas turbulentas: Este método y el que sigue más adelante en realidad son métodos indirectos. Se usa exclusivamente cuando el material del fondo es arena relativamente fina, y requiere que en la trayectoria de la corriente, exista un tramo de alta turbulencia.

Muestreador de Caja para
arrastre por el fondo

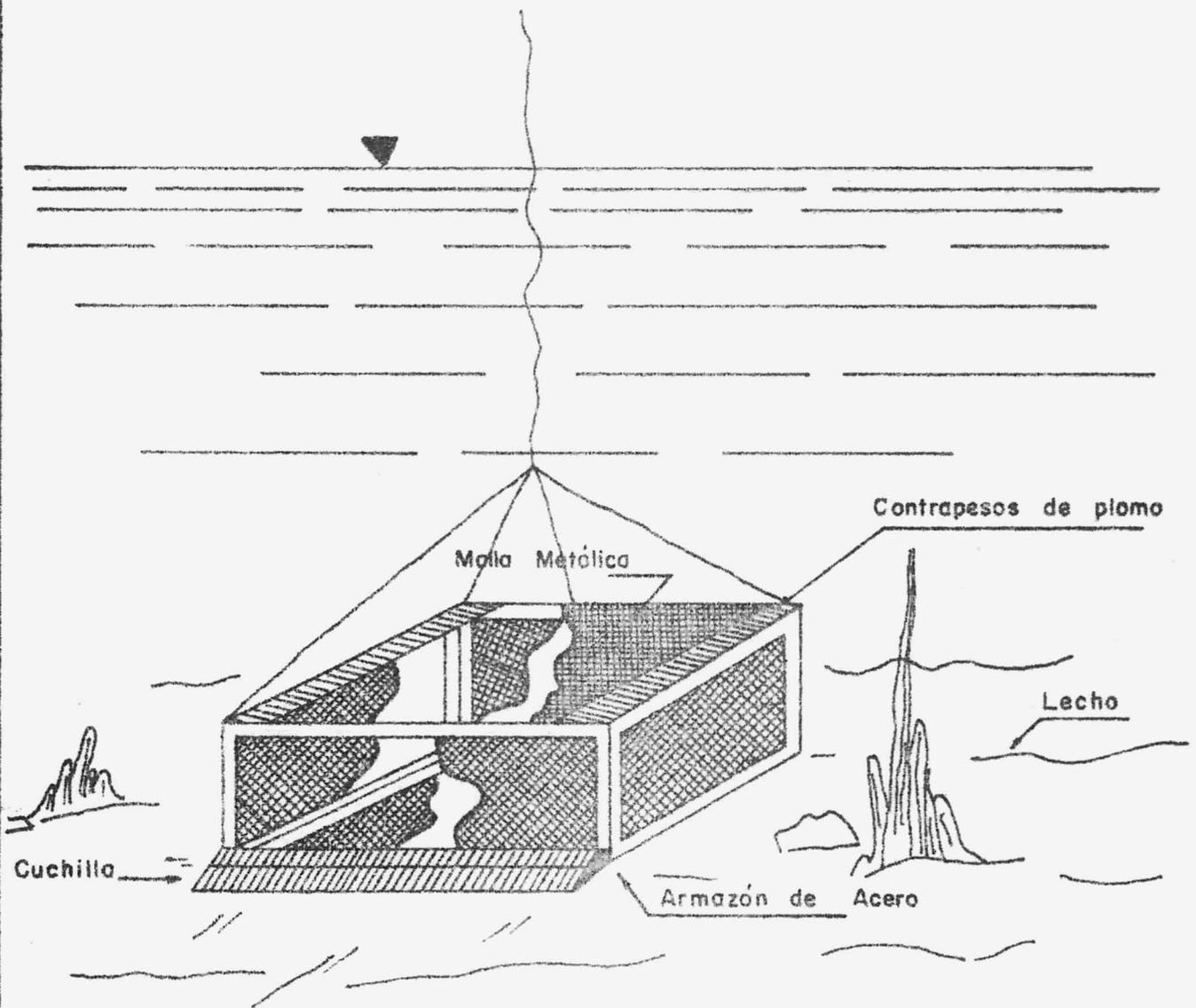
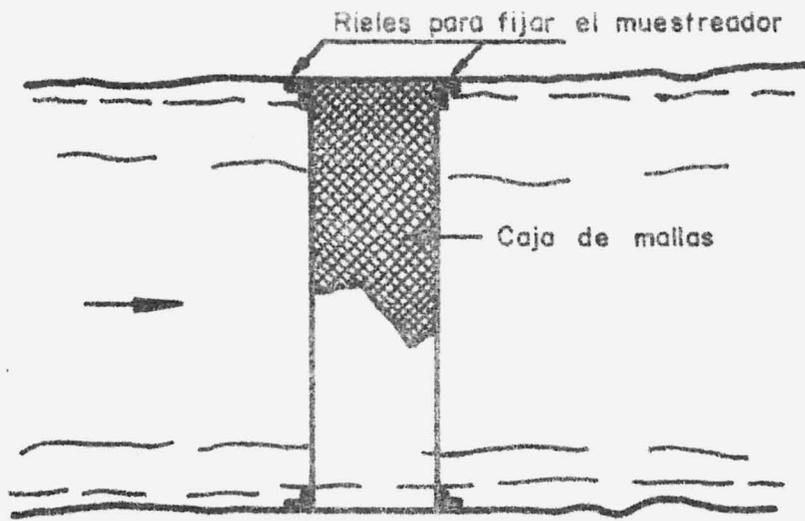
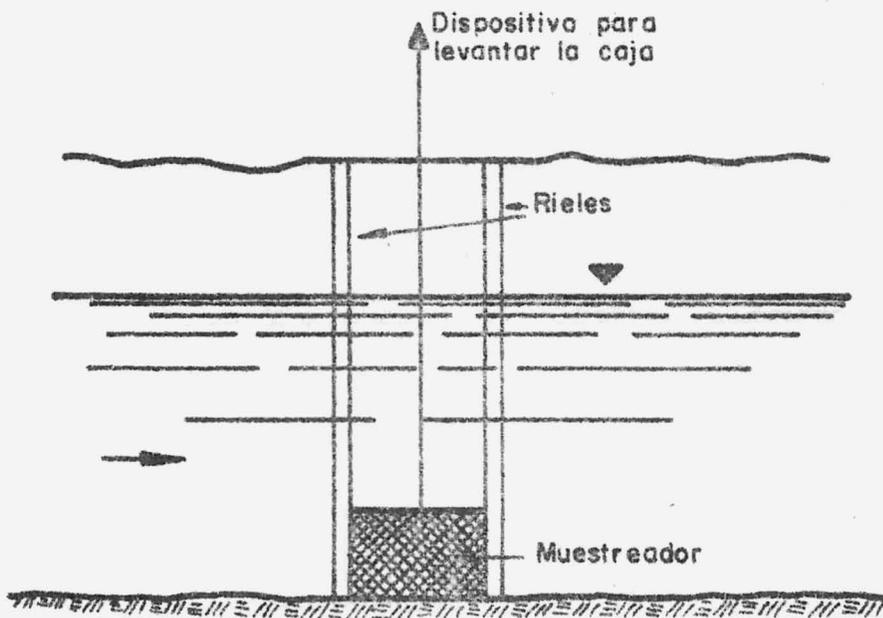


Fig. 6-A



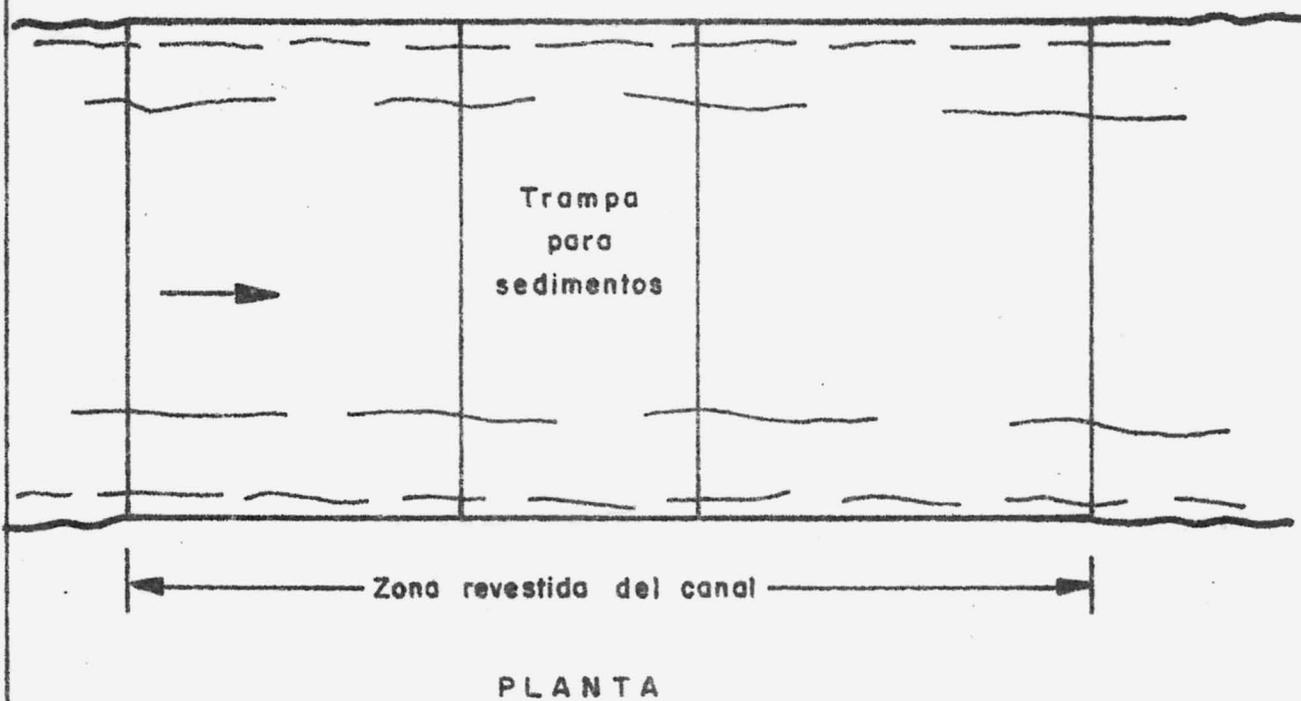
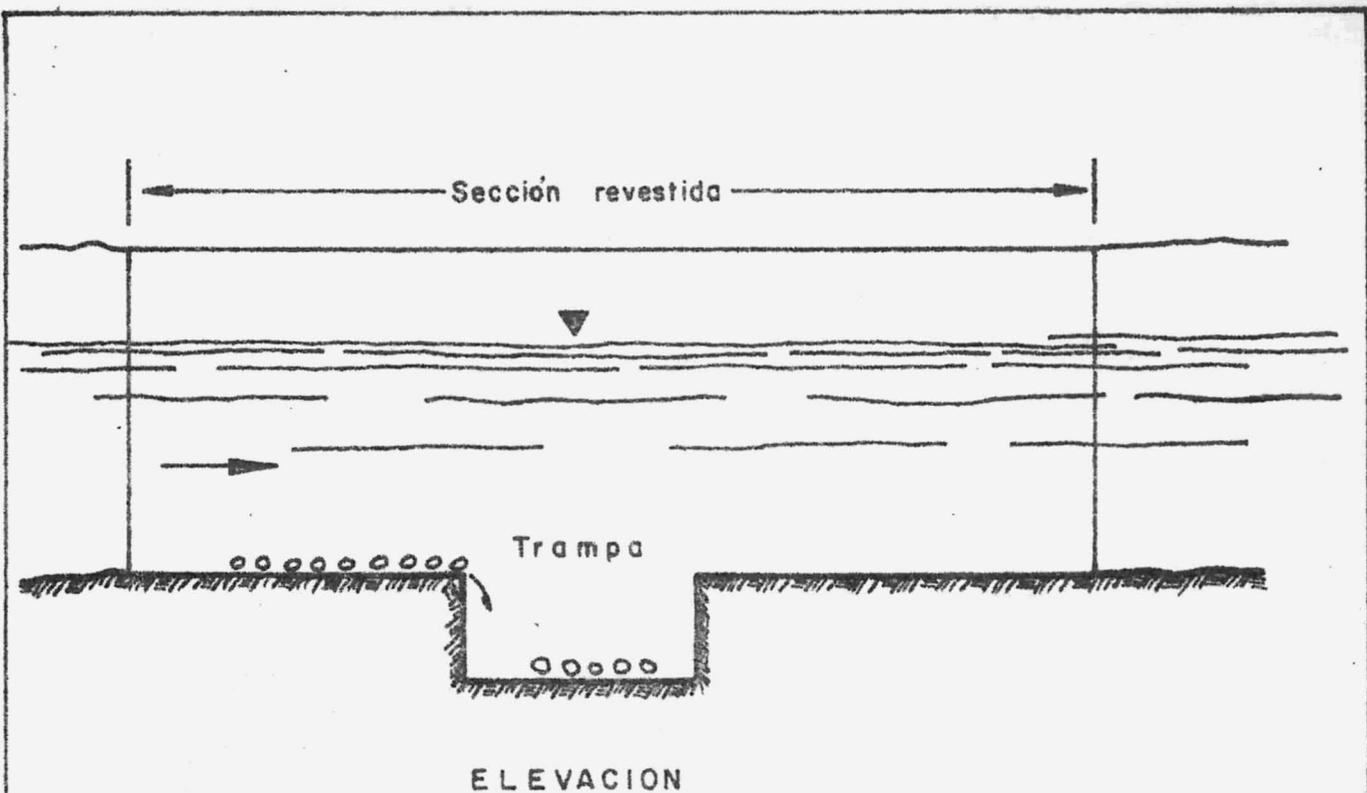
PLANTA



ELEVACION

Esquema de un muestreador cubriendo todo el ancho de un canal

Fig. 6-B



Trampa para la medida del sedimento

Fig. 6-C

Análisis del sedimento en la zona de flujo tranquilo. En este --
tramo el sedimento total (G), Fig. 6-D se compone de:

$$Gf_1 = \text{sedimento arrastrado kg/seg.}$$

$$Gs_1 = \text{sedimento suspendido kg/seg.}$$

o sea que: $G_1 = Gf_1 + Gs_1$ (1)

En la zona de Turbulencia, debido a los movimientos mecánicos del agua, la arena arrastrada por el fondo pasa a ser componente del se
dimento suspendido, así:

$$Gf_2 = 0$$

por lo tanto: $G_2 = Gs_2$ (2)

Si no existiere depósito, ni socavación entre las secciones (1)
y (2) se puede escribir que:

$$G_1 = G_2 \text{ o sea que:}$$

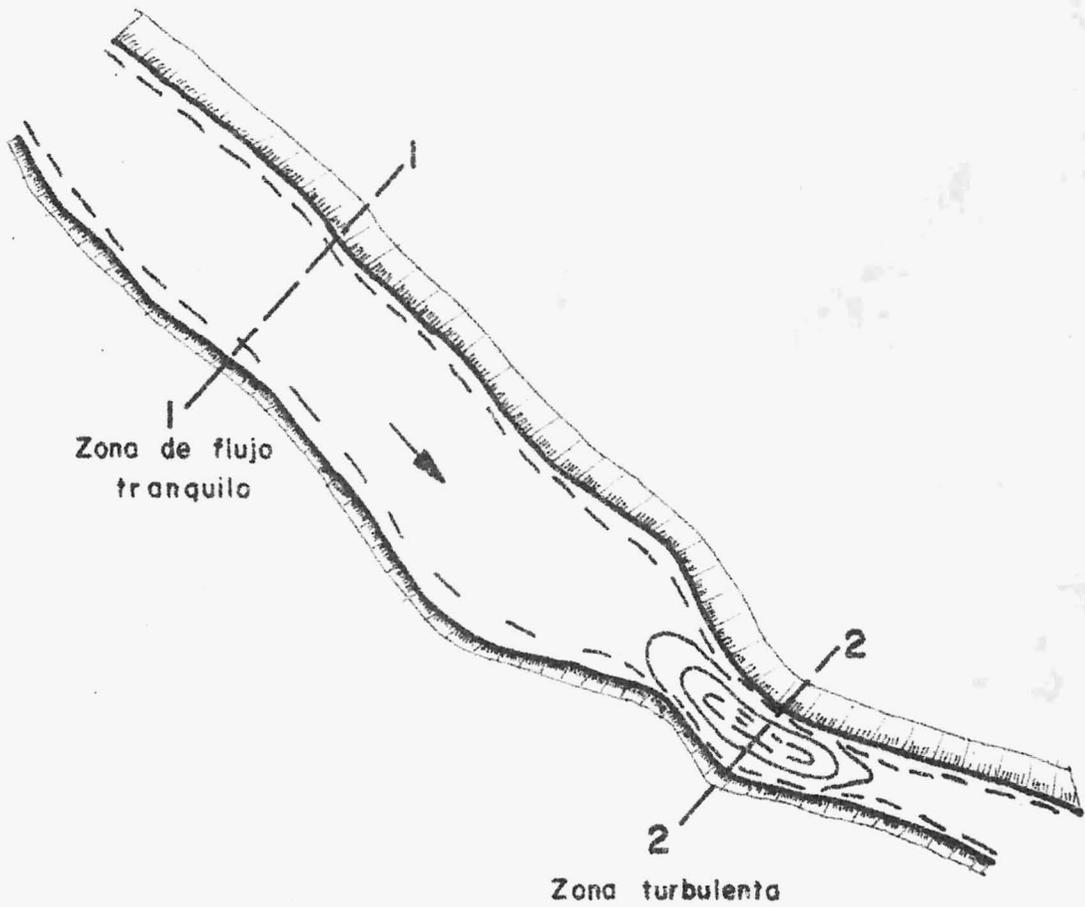
$$G_1 + Gs_1 = G_2$$
 (3)

Como el sedimento en suspensión es medible, se llega a:

$$Gf_1 = Gs_2 - Gs_1$$
 (4)

La aplicación de esta última fórmula da teóricamente buenos re--
sultados, pero en la práctica es casi imposible de usar debido a:

1o- Dificultad para encontrar un río que cumpla con las condicion
es pedidas.



Mediciones en zonas turbulentas

Fig. 6-D

2o- Dificultad del muestreo en la zona turbulenta (Para que no exista arrastre de arena, es necesario la existencia de una alta velocidad; lo que imposibilita una buena medida).

3o- Siguiendo la fórmula (4), una cantidad pequeña debe de obtenerse por diferencia, con lo cual se cometen errores apreciables.

CAPITULO VII

Uso de Fórmulas para la determinación del sedimento arrastrado

La imperiosa necesidad de calcular la magnitud del sedimento -- arrastrado previo a los proyectos de construcción de obras de embal se u otras obras hidráulicas, ha hecho que muchos investigadores hi drólogos se dediquen en especial al análisis matemático que sigue - el comportamiento del fenómeno de la sedimentación. Sin embargo, -- hasta la fecha, de todas las fórmulas que existen no hay una que matemáticamente satisfaga su determinación, ni tampoco existe la suficiente información como para elegir cual de todas las fórmulas es - la más recomendable.

La casi totalidad de estas fórmulas, han sido derivadas de experimentos en canales modelos, usando arenas de tamaño uniforme. Por lo tanto es de suponerse que estas fórmulas no son aplicables a flujos de grandes avenidas que no sean de origen aluvial; ni mucho menos a corrientes pequeñas que no estén encausadas en canales. Sin - embargo, en este capítulo se hará un breve comentario acerca de su existencia.

A continuación se detallarán los pasos seguidos por cada autor para el cálculo del arrastre total. La expresión matemática de las fórmulas; así como los ábacos a utilizar se darán por conocidos. Se

hará caso omiso de sus deducciones matemáticas, ya que ello representa en sí, el tema particular de una tesis. Acerca de éste último se recomienda a los interesados, que lean el curso de Sedimentación; que el Dr. Vito. A. Vanoni disertó en Santiago de Chile. (--- Abril-Julio 1962).

A continuación se detallarán parcialmente las operaciones a seguir mediante las fórmulas de Meyer-Peter y Einstein-Brown 2/ respectivamente. El ejemplo indicado se basó en experimentos realizados en una sección del río Cachapoal en Puente Arqueado. Chile.

Fórmula de Meyer-Peter

Proceso a seguir:

1- Se seleccionan unos 10 aforos que no se alejen mucho de la curva de descarga, y que sean representativos de un caudal bastante grande, de preferencia crecidas.

2- Para cada aforo se calcula:

Q = Caudal en M³/S

F = Sección en M²

Vm = Velocidad media en M/S

t = Profundidad media en M.

b = Ancho medio en M.

p = Perímetro mojado

R = Radio Hidráulico en M.

Estos valores, a excepción de P, aparecen en las columnas del (1) al (6) del Cuadro No. 4.

El elemento R, no sufre un gran error si su valor se iguala a t, en ríos anchos ($b > 20t$).

3- Se calcula C (coeficiente de Chezy para el sistema métrico) así:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n}$$

En donde:

n = es el coeficiente de rugosidad de Manning. Este valor se anota en el espacio(a) del Cuadro No. 4.

El resultado obtenido se anota en la columna (7) del Cuadro.

$$4- \text{ Como } V_m = C \sqrt{R J}$$

Siendo:

J = pendiente hidráulica

se tendrá que:

$$(V_m)^2 = C^2 R J$$

$$\therefore J = \frac{(V_m)^2}{C^2 R}$$

El valor de $C^2 R$ se anota en la columna (8) del Cuadro y el de $(V_m)^2$ en la (9). En la columna (10) se anota el resultado del cálculo (J), el que se multiplica por 1000 para evitar el trabajar con decimales.

5- Seguidamente se calcula el esfuerzo cortante sobre el fondo que viene dado así:

$$\tau = \gamma_w \cdot R j$$

en donde γ_w es el peso específico del agua ($\gamma_w = 1000 \text{ kg/m}^3$) el resultado se anota en la columna (11).

6- Se calcula τ_0 , que representa el esfuerzo de corte crítico, es decir, el mínimo esfuerzo de corte necesario para que se produzca la iniciación del movimiento.

De acuerdo con Meyer-Peter, τ_0 tiene la siguiente expresión:

$$\tau_0 = A(Y - Y_w)dm$$

Donde:

A = Una constante sin dimensión igual a 0.047

Y = Peso específico del arrastre = 2650 kg/m^3 (o el que se mida).

Y_w = Peso específico del agua = 1000 kg/m^3

dm = Tamaño medio de la partícula en mm.

Para calcular dm, es necesario efectuar previamente un análisis granulométrico del material del fondo.

En la práctica generalmente se toma como tamaño medio el valor d_{50} , es decir, un diámetro tal que el 50% de las partículas son mayores que ese tamaño. Se recomienda hacer el gráfico en papel logarítmico de probabilidades a fin de conseguir que la granulometría sea representada por una recta. (ver Fig. 3-D. Cap. III).

El valor d_{50} se anota en (b) en el Cuadro, y el valor de τ_0 calculado según fórmula anterior se anota en (c).

7- Se determinan las diferencias $(\tau - \tau_0)$ anotándolas en la columna (12). Nótese que para que exista arrastre $(\tau - \tau_0)$ deberá ser mayor que cero. Por consiguiente si $(\tau - \tau_0) < 0$, anótese el valor cero.

8- Se calcula g_s (gasto sólido en kg/seg/metro)

así:

$$g_s = \left[\frac{(\tau - \tau_0)}{\frac{(B \gamma_w)^{1/3}}{g}} \right]^{3/2}$$

En donde: B = constante igual a 0.25

Este resultado se anota en la columna (13)

9- Se calcula G_s que es arrastre total y que vale:

$$G_s = g_s \cdot b$$

Colocando el resultado en la columna (14)

10- Con los valores de Q y G_s (columnas (1) y (14) se construye una curva $G_s = f(Q)$ semejante a la figura indicada en la Curva Fig. 7-A.

11- Para determinar la carga total de arrastre por el fondo se hace uso del Cuadro No. 5, en el cual se anota en la columna (1), diez valores crecientes del caudal Q , partiendo de un va

lor con el cual no se tenga arrastre, hasta llegar a valores bastante altos (crecidas). Los valores de Q se obtienen de la curva de la Fig. 7-A.

12- En la columna (2) se anotan las probabilidades P% correspondientes a los caudales de la columna (1), obtenidas de la curva de duración de descarga, Fig. 7-B. En esta curva los valores de las probabilidades están representadas en porcentaje de tiempo, pero pueden darse directamente en días si la curva fuera planteada caudal contra tiempo en días, con lo que se omitiría la columna (4).

13- En la columna (3) se anotan los valores medios (Q) encontrados entre dos valores sucesivos de Q de la columna (1), quedando desplazados con respecto a éstos.

14- Se obtienen los valores $\Delta p\%$ correspondientes y se anotan en la columna (4).

15- Se calcula el número de días que corresponden a cada $\Delta p\%$ y se anotan en la columna (5).

$$n(\text{días}) = \Delta p\% \times 365$$

16- Se anota en la columna (6) el equivalente de n(días), en segundos: $n(\text{segundos}) = 86,400 n(\text{días})$.

- 17- En la columna (7) se anota el valor de G kg/seg, para cada valor de la columna (3), obtenido de la Fig. 7-A.
- 18- En la columna (8) se anota el producto resultante de multiplicar los valores de las columnas (6) y (7).
- 19- La suma de todos los valores de la columna (8) nos da la cantidad del arrastre en Ton/año.

CUADRO No. 4

CALCULO DEL ARRASTRE POR EL FONDO

Sección: Cachapoal en Puente Arqueado

Fórmula: Meyer-Peter

(a) $n = 0.04$

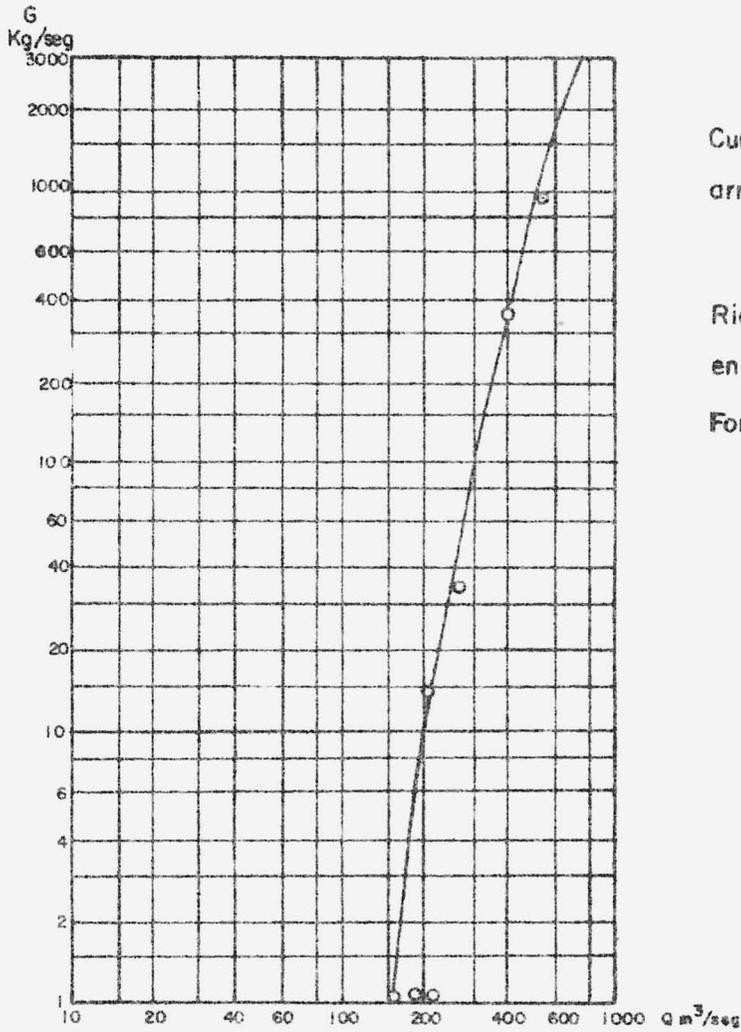
d_{50} : 40 mm (b)

(c) $\tau_0 = 3.102$

Aforo No.	Q m^3/seg	F m^2	V_m m/s	t m	b m	R m	C	C^2_R	$(V_m)^2$	1000 J	τ_0 kg/m^2	$(\tau_0 - \tau_{0c})$ kg/m^2	$\frac{gs}{kg/s/m}$	$\frac{Gs}{kg/s}$
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
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	3.40	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

CUADRO No. 5
Fórmula de Meyer-Peter

Q m ³ /seg (1)	P % (2)	Q m ³ /seg (3)	Δ P % (4)	n días (5)	n miles de seg. (6)	G kg/seg (7)	G ton (8)	G ton/año
150	16	175	8	29.2	2523	4	10,092	
200	8	250	5	10.2	1572	40	62,680	
300	3	350	1.5	5.5	475	200	95,000	
400	1.5	450	0.7	2.55	220	800	160,000	
500	0.8	550	0.4	1.46	126	1500	180,000	
600	0.4	650	0.15	0.55	47.5	2000	95,000	611,972
700	0.25							



Curva de descarga del arrastre por el fondo.

Rio Cachapoal (Chile)
en puente Arqueado

Formula de Meyer-Peter

Fig. 7-A

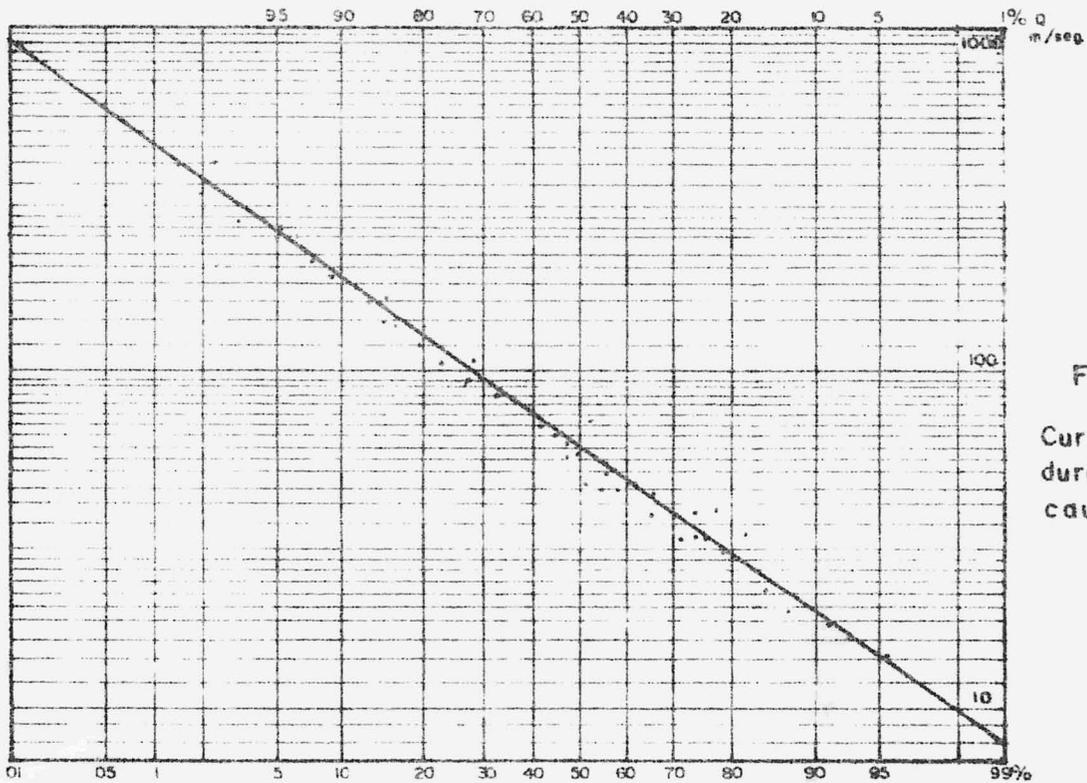


FIG. 7-B

Curva de duración del caudal.

Fórmula de Einstein-Brown

El procedimiento mecánico de esta fórmula se explica mediante el Cuadro No. 6.

- 1o- Se eligen 10 aforos en la misma forma ya indicada
- 2o- Se anotan en el Cuadro los valores de Q(col. 1) y de ----
R(col. 2)
- 3o- En la columna (3) se anotan los valores de 1000 S obteni--
dos en el cálculo de Meyer-Peter. Nótese que S = J.
- 4o- Luego se calcula el valor

$$\psi = (Ss-1) \frac{ds}{RS}$$

en donde:

Ss = peso específico del sólido = 2.65

ds = tamaño medio de las partículas

Los valores de ds y R deben de usarse en el mismo sistema - de unidades (mm-mm) (m-m), de tal manera que ψ es adimensional. El valor de ds se determina como se indicó en el método anterior. En la columna (4) se anota el inverso de (ψ).

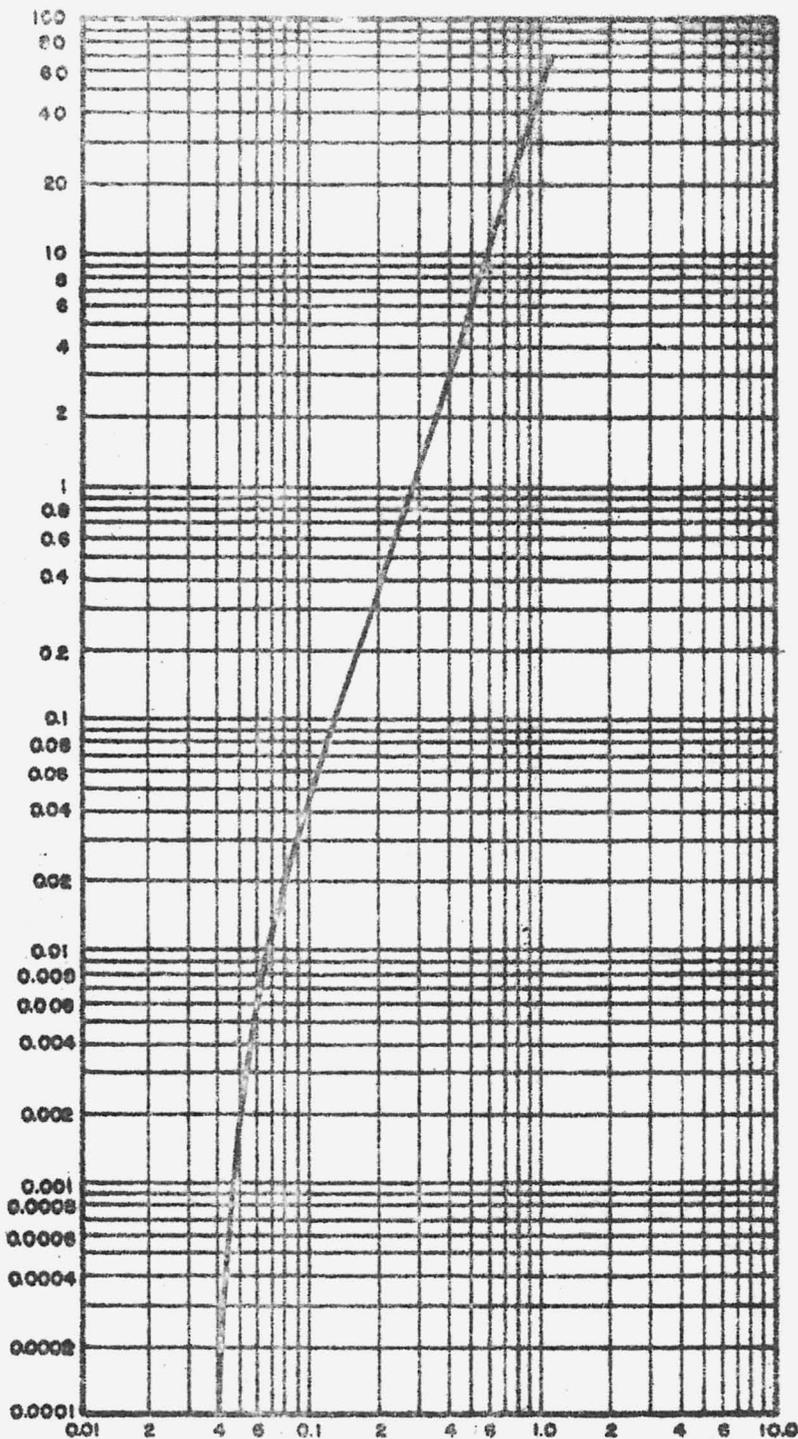
- 5o- Con el ábaco de Einstein, mostrado en la Fig. 7-C se calcula ϕ

Donde:

$$\phi = f(\psi)$$

el resultado se anota en la columna (5)

$$\phi = \frac{Q_s}{\gamma \sqrt{g(Ss-1)} F d_s^{3/2}}$$



$$\frac{1}{\psi} = \frac{r}{\gamma(s-1) ds} = \frac{ds}{(Ss-1) ds}$$

Gráfico de la función $\phi = f\left(\frac{1}{\psi}\right)$ para
la Ecuación de Einstein - Brown

FIG. 7-c

6o- A continuación se calcula F, que es función de ds de acuerdo con la siguiente tabla.

<u>ds (mm)</u>	<u>F</u>
0.3	0.6
0.5	0.7
1	0.8
2	0.8
5	0.8
10	0.8

El valor de F obtenido se anota en (c) del Cuadro.

7o- Se calcula g_s , gasto sólido en kg/seg/m. mediante la fórmula:

$$g_s = Y_s \phi F d_s \sqrt{g d_s} \cdot \sqrt{(S_s - 1)}$$

en donde:

Y_s = peso específico del sólido = 2650 kg/m^3

ϕ = valor adimensional (col. 5)

F = valor adimensional (c)

d_s = tamaño medio de la partícula en metros (b)

g = aceleración de la gravedad m/seg^2

S_s = Densidad relativa (o gravedad específica) adimensional
= 2.65.

El resultado obtenido se anota en la columna (6)

8o- Se calcula $G_s = g_s \cdot b$ (col. 6 y 7)

9o- Se dibuja la curva $G_s = f(Q)$ Fig. 7-D.

10o- A continuación se llena el Cuadro No. 7, en igual forma --
que el Cuadro No. 5, usando la misma curva de duración de --
descarga y la Fig. 7-D para llegar a obtener el arrastre --
por el fondo en Ton/año.

CUADRO No. 6

CALCULO DEL ARRASTRE POR EL FONDO

Sección: Cahapoal en Puente Arqueado

$n = 0.04$ (a)

Fórmula: Einstein-Brown

d_{50} : 40 mm (b)

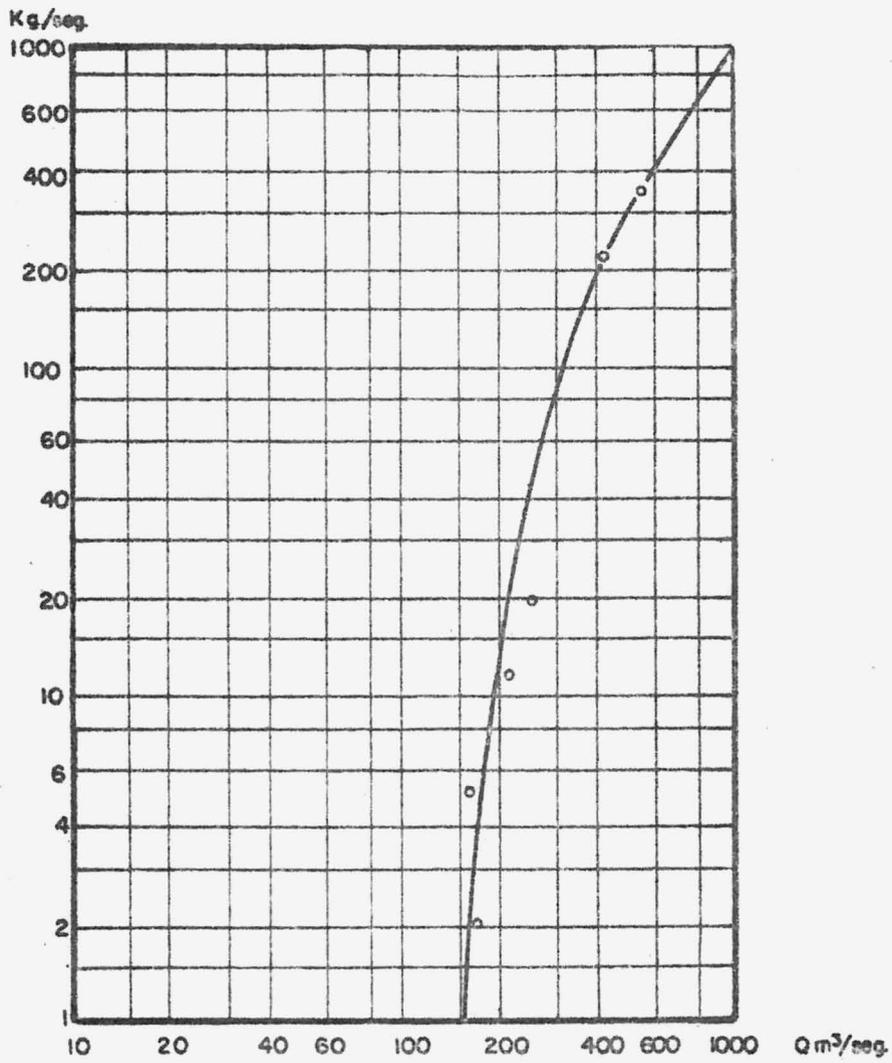
F : 0.8 (c)

Aforo	Q m^3/seg	R m	1.000 S	$\frac{1}{\psi}$	ϕ	$\frac{g}{seg^2/m}$	b m	G kg/seg
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
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	0.078	0.027	1.85	110	204
26	546.5	1.46	4.61	0.102	0.041	2.80	172	480

CUADRO No. 7

Fórmula de Einstein-Brown

Q m^3/seg (1)	P % (2)	\bar{Q} m^3/seg (3)	P % (4)	n días (5)	n miles de seg. (6)	G kg/seg (7)	G Ton (8)	G Ton/año
150	16	175	8	29.2	2523	6	15,138	
200	8	250	5	18.2	1572	50	73,600	
300	3	350	1.5	5.5	475	150	71,250	
400	1.5	450	0.7	2.55	220	275	60,500	
500	0.8	550	0.4	1.46	126	400	50,400	
600	0.4	650	0.15	0.55	47.5	500	23,750	299,638
700	0.25							



Curva de descarga del
arrastre por el fondo.
Rio Cachapoel; Formula
de Einstein-Brown. 2

Fig. 7-D

Estimación de la carga de fondo como un porcentaje de la carga suspendida.

Dada la complejidad de determinar exactamente la carga de fondo, ya sea por la dificultad de obtener directamente las muestras o por las limitaciones a que están sometidas las fórmulas teórico-empíricas. Durante la etapa de un anteproyecto de caracter hidráulico, será necesario para el cálculo de la carga total, hacer una estimación del arrastre de fondo como un porcentaje de la carga suspendida.

*De notoria importancia es saber: que un error del 100% en la estimación de la carga de fondo nos da mayor seguridad en la vida útil del proyecto hidráulico determinado.

Clasificación de Maddock para determinar la carga de fondo.^{8/}

Concentración de carga suspendida p.p.m.	Tipo de materias que forma el canal de corriente.	Textura del material suspendido	Porcentaje de la carga de fondo en función de la carga suspendida
Menos que 1000	Arena	Similar al del fondo	25 a 50
Menos que 1000	Grava, roca o arcilla consolidada	Pequeña cantidad de Arena	5 a 12
1000 a 7500	Arena	Similar al material de fondo	10 a 35
1000 a 7500	Grava, roca o arcilla consolidada	Arena o menos	5 a 12
sobre 7500	Arena	Similar al material de fondo	5 a 15
sobre 7500	Grava, roca o arcilla consolidada	25% arena o menos	2 a 8

NOTA: Lane, E. W. and H. N. Boatland, Method of Estimating Bed Load. Washington D.C. Franc. A.

CAPITULO VIII

Criterio de varios investigadores sobre el arrastre por el fondo.

Después de un estudio minucioso de la investigación del arrastre sobre el fondo, los diferentes investigadores mencionados en esta Tesis, han expuesto sus criterios personales resumiéndolos así: 3/

- 1- Cuanto menos sea la concentración de materia suspendida, más alto será el porcentaje de la carga de fondo.
- 2- Cuanto menos sea la diferencia entre el tamaño de las partículas del material en suspensión mayor será el porcentaje de la carga de fondo respecto a la carga total.
- 3- Dependiendo del tipo de material que resulta de la erosión de las fuentes básicas, (erosión superficial, erosión de concavos o de los canales), la carga de fondo será alta si el material es grueso, por el contrario si el material es fino, la carga suspendida será la más alta.
- 4- En canales anchos y poco profundos, las corrientes llevan -- cierto porcentaje de sedimento como carga de fondo. Sucede -- lo contrario en canales, angostos y profundos.
- 5- La carga de fondo disminuye con el aumento de la Turbulencia.

6- El porcentaje de material de fondo con respecto a la carga suspendida puede ser más alta en niveles bajos o medios que durante niveles altos. De manera que en corrientes con pequeñas fluctuaciones, la existencia de carga de fondo es mayor.

CAPITULO IX

Conclusiones y Recomendaciones

Después de haber explicado brevemente los diferentes métodos para la determinación del sedimento suspendido y arrastrado por el fondo, y teniendo en cuenta que la cuantificación de estos sólidos es de vital importancia para la ejecución de muchos proyectos hidráulicos, se recomienda:

- 1o) Controlar las fuentes de erosión mediante un programa intensivo de reforestación, consiguiendo así una menor producción de sedimentos.
- 2o) Proyectando con más técnica las labores de cultivo, arando según las curvas de nivel y cultivando mediante sistemas de terrazas y sus drenajes respectivos.
- 3o) Medir continuamente el gasto sólido en los ríos principales del país. Especialmente en aquellos lugares donde se proyectan construir obras de almacenamiento.
- 4o) Formar un personal especializado en esta rama de la hidrología, proporcionando para ello toda clase de facilidades. (becas y cursillo que en el exterior se realicen).

Anexo No. 1

Valores del Coeficiente de Rugosidad n para usarlo en las
Fórmulas de Manning

Anexo No. 1

Valores del Coeficiente de Rugosidad n para usarlo en las fórmulas de Manning según la referencia.

	Valor de Medio de n
Canoas pequeñas rectas, en madera cuidadosamente cepilladas o canoas de laboratorio revestidas de vidrio o bronce.....	0,009
El más bajo valor que se debe emplear en canoas rectas de madera cepillada bajo condiciones de servicio en el terreno (R mayor de 0.60 M)	0,010
Canales de madera recientemente cepilladas y en condiciones excelentes canales revestidos de concreto afinado; canoas de metal pulido, -- sin juntas sobresalientes (para R superior a 1.50 m).....	0,012
Tuberías vidriadas de alcantarillado o de mayores tamaños bien instaladas, cañerías de ladrillos fundidos o buenas cañerías de concreto.....	0,013

Anexo No. 1

Para canoas de metal pintado, de duelas de ma- dera o canoas de concreto en condiciones <u>in</u> feriores a lo normal; canoas de tablonas con cubre-juntas longitudinales; canoas revesti- das a pistola con mortero de cemento; tejas comunes de arcilla, de drenaje.....	0,014
Acueductos revestidos de cal y ladrillo corriente; tuberías vitrificadas de alcantarillado en -- condiciones ordinarias; albañilería de piedra canteada.....	0,015
Canoas metálicas (con barras de compresión) valor - general para otra clase de canoas en condicio <u>o</u> nes malas.....	0,017
Canales en tierra sin revestir y en las mejores - condiciones.....	0,020
Canales en tierra sin revestir, bien conservados, tierra y ripio en buenas condiciones, con <u>al</u> gunas curvas.....	0,0225
Canoas en metal corrugado y en alcantarillas del mismo material, canales sin revestir de tie- rra y ripio, con curvas, en condiciones regu- lares.....	0,025

Anexo No. 1

Canales con rugoso lecho de piedras, con vegetación en los bordes, acequías hechas con draga, limpias y derechas; corrientes naturales con paredes limpias y rectas, sin cambios bruscos en su sección transversal ni en su trazado.....	0,030
Corrientes naturales con vueltas y curvas, limpias, pero con ensanches, canales reacondicionados en regular estado.....	0,035
Ríos en secciones irregulares en estiaje; correntadas con vegetación, sucias.....	0,040
Inundaciones en planicies.....	0,100

Anexo No. 2

Viscosidad del agua a distintas temperaturas

Anexo No. 2

Viscosidad del agua a distintas temperaturas

Fluido	Temperatura		Peso específico, kilogramos por metro cúbico	Viscosidad kilogramos por metros segundo	Viscosidad cinemática metros cua drados por segundo.	Presión del - vapor satura do pv, kilo gramos por me tro cuadrado.
	°F	°C				
Agua	32	0	999.9	0.0001829	0.000001794	62.0
	39.2	4.0	1000.9	0.0001598	0.000001567	82.5
	50	10.0	999.7	0.0001335	0.000001310	125.0
	60	15.6	999.0	0.0001152	0.000001131	179.6
	70	21.1	998.0	0.0001001	0.000000934	255.2
	80	26.7	996.6	0.00008783	0.000000864	356.2
	100	93.3	963.0	0.00003110	0.000000317	8052

BIBLIOGRAFIA

- 1/ LINSLEY, RAY K. y FRANZINI, JOSEPH B. 1967. Ingeniería de los Recursos Hidráulicos.
- 2/ MANUAL DE INSTRUCCIONES. Primera Parte, Publicación No. 11 - (Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano).
- 3/ TERRON CALDERON, JOSE LUIS EDUARDO. 1966. Consideraciones generales para la determinación de sedimentos en los ríos. - Tesis Doctoral. Guatemala.
- 4/ LISNLEY, KHOLER and PAHLUS. Hidrología para Ingenieros
- 5/ BASSO S. EDUARDO. Técnicas de Laboratorio en Hidrología. Publicación No. 14. (Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano).
- 6/ TRABAJOS TECNICOS PRESENTADOS A LA (11) REUNION DEL COMITE REGIONAL DE RECURSOS HIDRAULICOS. Publicación No. 26. (Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano).
- 7/ VANONI, VITO A. Curso de Sedimentación. Empresa Nacional de electricidad; Santiago de Chile. Diciembre 1965.-
- 8/ BASSO S. EDUARDO. Métodos para la determinación del arrastre por el fondo. Publicación No. 7. (Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano).