

MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES

IV CONFERENCIA SOBRE CONTROL DE EROSION

METODOS Y CRITERIOS USADOS EN EL CALCULO DEL
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN RIOS DE VENEZUELA

AUTOR: DAVID PEREZ HERNANDEZ

Maracay, 13-18/11/1991

I N D I C E

	PAG.
1. INTRODUCCION.....	1
2. FORMAS DE TRANSPORTE.....	2
3. LIMITACIONES DE LAS ECUACIONES Y DEL MUESTREO.....	2
4. RESULTADOS DE APLICACION DE ECUACIONES DE TRANSPORTE.....	5
5. DATOS Y CONCEPTOS BASICOS PARA CALCULAR LOS CAUDALES Y EL TRANSPORTE SOLIDO.....	6
6. CALCULOS DE ESCURRIMIENTO Y TRANSPORTE SOLIDO PARA LARGOS PERIODOS.....	9
7. CAMPAÑAS DE MEDICION EN LOS GRANDES RIOS.....	12
8. DEFINICION DE TERMINOS.....	16
9. BIBLIOGRAFIA.....	18

METODOS Y CRITERIOS USADOS EN EL CALCULO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN RIOS DE VENEZUELA

1. INTRODUCCION

Un dilema al que se enfrenta el Ingeniero Hidráulico ó Hidrólogo, que trata con el Estudio de los Ríos, consiste en la selección del método más adecuado para calcular ó estimar el transporte sólido. Una alternativa -la más común adoptada cuando se carece de mediciones hidrológicas-, es la de utilizar modelos matemáticos que permitan calcular la máxima capacidad de transporte, bajo condiciones hidráulicas específicas en el canal, ya se trate de uno de laboratorio ó natural. Al tomar esta vía, se admite que la mayoría de estas ecuaciones se han derivado, a través de una fase final de experimentación en canales artificiales y por lo tanto, es difícil comprobar su aplicabilidad en canales aluviales, donde no existen las condiciones de laboratorio bajo las cuales estas expresiones, se han deducido.

La otra alternativa consiste, en disponer de un limitado grado de información de campo relativa a algunas variables hidráulicas, hidrológicas y geométricas determinantes de la condición del flujo en la sección fluvial, lo que lleve a través de procedimientos simples de cálculo, a definir el transporte sólido. Uno y otro procedimiento, presentan ventajas y desventajas que deben ser consideradas al tratar de seleccionarse el método de cálculo, así como al aceptar el grado de confiabilidad y exactitud de los resultados obtenidos. En Venezuela como en otros países, se han utilizado ambos procedimientos por parte de investigadores en el campo de la Hidráulica Fluvial, así como en Oficinas Hidrológicas, considerándose ríos con distintas características en su régimen hidrológico, condiciones geológico-topográficas, tipos de sedimentos transportados y condiciones geométricas en su escala espacial.

En este informe se hace una revisión de los métodos comunes empleados en el país, a fin de calcular el transporte de los sedimentos en los ríos. Se mencionan las restricciones más comunes de los métodos teóricos y prácticos, así como sus fundamentos, se ejemplifican resultados obtenidos de las prácticas de medición en algunos ríos llevadas a cabo por la Dirección de Hidrología y Meteorología del MARNR y además, se indican recomendaciones para adecuar mejor estos procedimientos en los ríos tropicales.

2. FORMAS DE TRANSPORTE

Antes de considerar los métodos utilizados para calcular el transporte sólido en los ríos, es útil definir algunos conceptos de uso común y frecuente en Hidráulica Fluvial, que se prestan a mal interpretaciones en otros campos de la ingeniería, debido tal vez a la complejidad y diversas formas como las partículas de sedimentos son transportadas por un flujo. Esto ocurre como resultado de uno ó la combinación de las siguientes modalidades de transporte:

- a) Partículas que se deslizan ó se mueven rodando sobre el lecho en contacto permanente.
- b) Partículas que se desplazan a través de saltos con intervalos de estabilidad temporal en el lecho e intervalos de movimiento suspendido.
- c) Partículas que se mantienen suspendidas en el flujo por efecto de las fuerzas de flotación y la turbulencia, conservando una velocidad en dirección aguas abajo, igual al de la corriente.

La separación entre la condición de saltación y suspensión de las partículas, es difícil de establecer en un sector del lecho; ello es importante sin embargo, al tratar de definir las dos más importantes formas de transporte sólido y las cuales son gobernadas por leyes hidrodinámicas diferentes a saber: la carga del lecho ó carga de contacto (Bedload), formada por partículas que como a y b se mueven en contacto permanente u ocasional con el lecho, ya sea bajo las formas de saltación, arrastre, rodamiento ó creptación. Mientras la carga suspendida (suspended Load), se corresponden con las señaladas en c. Es por lo tanto la condición hidráulica del flujo, lo que determina el tipo de movimiento de las partículas, existiendo entre la carga suspendida y la carga del lecho, así como entre la última y el lecho, un activo intercambio y partículas de la carga de lecho en un instante dado, pueden pasar a formar parte de la carga suspendida y viceversa.

3. LIMITACIONES DE LAS ECUACIONES Y DEL MUESTREO

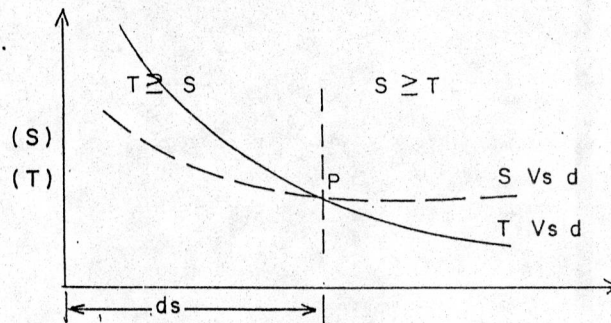
En un río particular la descarga del sedimento del lecho para una condición dada del flujo y una fracción dada del tamaño de las partículas del lecho, puede no ser igual a su capacidad de transporte. Puede suceder que aguas arriba a la sección considerada, el flujo recoge un exceso de material sedimentario ó

se suministra una elevada cantidad de sólidos por erosión de los bancos del canal o de los suelos, al incorporarse nuevas tierras a la actividad agrícola y si el tamaño de los materiales es incrementado, entonces existe una tendencia a producirse deposición en el lecho. A este valor límite en el transporte que señala la condición, a partir de la cuál comienza la deposición en el lecho, se conoce como la capacidad de transporte -T- del río.

Aquí se ha seguido a Shen (3), quién ha analizado las curvas de capacidad de suministro -S-, la de capacidad de transporte -T- para un río con un caudal Q (Gráfico N° 1), admitiendo que ellas se interceptan en un punto -P- para el cuál el tamaño del material transportado es d_s .

Si la rata de suministro de partículas con tamaños mayores ó iguales a d_s desde aguas arriba, es menor ó igual a este valor límite, se producirá en el tramo superior del canal deposición, mientras tanto el río está transportando en el tramo inferior, partículas con tamaños menores ó iguales a d_s , ya que la capacidad de transporte del río es mayor que la capacidad de suministro y es ésta quién determina en este tramo, la cantidad de sedimento transportado por el flujo.

GRAFICO N° 1
CURVAS DE CAPACIDAD DE TRANSPORTE Y DE SUMINISTRO EN
UN RÍO, PARA UN CAUDAL Q



Puede intentarse también, establecer una ecuación de transporte basada en la capacidad de suministro del río que concuerde con la cantidad de transporte en el tramo inferior, pero para partículas de tamaño menores ó iguales a d_s , la capacidad de transporte excede la capacidad de suministro desde aguas arriba y el transporte sólido para estos tamaños está determinado por la última y no por la capacidad de transporte del río; en consecuencia, uno debe estar interesado más bien, en determinar la capacidad de suministro desde aguas arriba y no la capacidad de transporte.

Es justo al ser T igual a $-S-$, cuando es factible aplicar con propiedad una ecuación de transporte basada en la condición hidráulica del flujo, de aquí la importancia que tiene definir ese tamaño d_s . Se han propuesto distintos criterios para lograrlo, Einstein arbitrariamente recomienda se elija el d_{10} (diámetro para el cual el 10% en peso de la granulometría del material del lecho, es más fino que dicho tamaño), basado en que partículas con este tamaño ó menores, son eficazmente removidas por el flujo desde el lecho, mientras otros ingenieros basados en las experiencias de campo, adoptan el tamaño de separación entre la arena y limo ($d = 0,0625 \text{ mm} = 62,5 \mu\text{m}$).

Aquella porción del gasto sólido controlada por el suministro desde aguas arriba a una sección fluvial que es siempre inferior a la capacidad de transporte $-T-$, se conoce como carga lavada (Washload) y tiene un tamaño menor o igual a d_s , mientras que otra definición aceptable para la carga del sedimento de lecho es: aquella porción del transporte sólido controlada por la capacidad de transporte del río que es menor ó igual a la capacidad de suministro desde aguas arriba, presentando las partículas un tamaño mayor o igual a d_s . De aquí que podemos considerar la descarga sólida total Q_T , como formada por la descarga del sedimento del lecho $-Q_b-$ y la carga lavada $-Q_w-$.

$$Q_T = Q_b + Q_w \quad \dots\dots\dots (1)$$

De otra parte, las mediciones de campo con los muestreadores diseñados hasta el presente para captar sedimentos fluviales, también ofrecen limitaciones, a pesar de su perfeccionamiento en los últimos años.

Un buen muestreador debe ser capaz de no perturbar físicamente las condiciones del flujo de la mezcla de agua y sedimentos y captar una muestra espacial y temporalmente representativa de la concentración del sedimento, al ser sumergido en el flujo ó permanecer estable en el lecho. En Venezuela se han usado en el pasado, muestreadores de diseño tan simple como una botella, hasta los de tipo integradores ó instantáneos existentes en el presente. Los últimos permiten tomar en un punto del flujo, un volumen de la mezcla de agua y sedimento en un intervalo finito de tiempo, mientras los integradores en la profundidad, captan una porción discreta de la mezcla en cada punto y en cada instante sobre la vertical, cuando ascienden o descienden a una rata uniforme $v_t = dy/dt$, promediándose así las fluctuaciones de la concentración.

Cuando uno de estos aparatos integradores es empleado, una parte del flujo $-a-$ comprendida entre el lecho y la posición de la boquilla no es muestreada (Figura A).

FIG. A

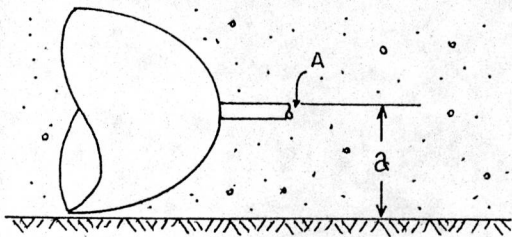
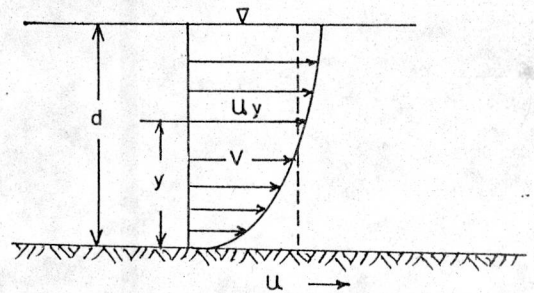


FIG. B



A esta porción del transporte sólido se denomina "no medida", para diferenciarla de la que se capta en el muestreador, así tenemos de nuevo que:

$$Q_T = Q_s(\text{medido}) + Q_s(\text{no medido}) \dots\dots\dots (2)$$

En esta formulación debe notarse que el transporte medido incluye, parte de la descarga del sedimento del lecho y la mayor parte del transporte suspendido (incluida la carga lavada).

4. RESULTADOS DE APLICACION DE ECUACIONES DE TRANSPORTE.

En diferentes proyectos y estudios del MOP - MARNR se han aplicado métodos teóricos para determinar el transporte sólido en ríos con diferentes características y diferentes tipos de sedimentos. En aquellos de piedemonte con altas pendientes, la experiencia con las conocidas ecuaciones de transporte del sedimento del lecho, casi siempre han llevado a resultados aparentemente sobreestimados y algunas indican magnitudes que carecen de sentido físico real. Las aplicaciones de ecuaciones como la de GRAF-SUSKA que permiten determinar ratas de transporte para las condiciones de pre y posterior a la condición umbral que define la iniciación del movimiento de las partículas, han probado dar resultados más racionales.

El método de Einstein Modificado, se ha aplicado en ríos con bajas pendientes. En el río Neverí (8) con un $Q = 92 \text{ m}^3/\text{s}$, ancho $b = 45,5 \text{ m}$, $S = 10^{-6}$, el transporte total fue de 2.680 Ton/d; siendo el del lecho $Q_b = 169,5 \text{ Ton/d}$ que representa un 6,3 % del transporte total. En el río Orinoco, se ha calculado (7) para amplios rangos de caudales ($51.850 - 70.700 \text{ m}^3/\text{s}$) un transporte sólido total ($892.000 - 605.000 \text{ Mg/d}$) representando el transporte del sedimento del lecho, una proporción de 20 - 24 % del total.

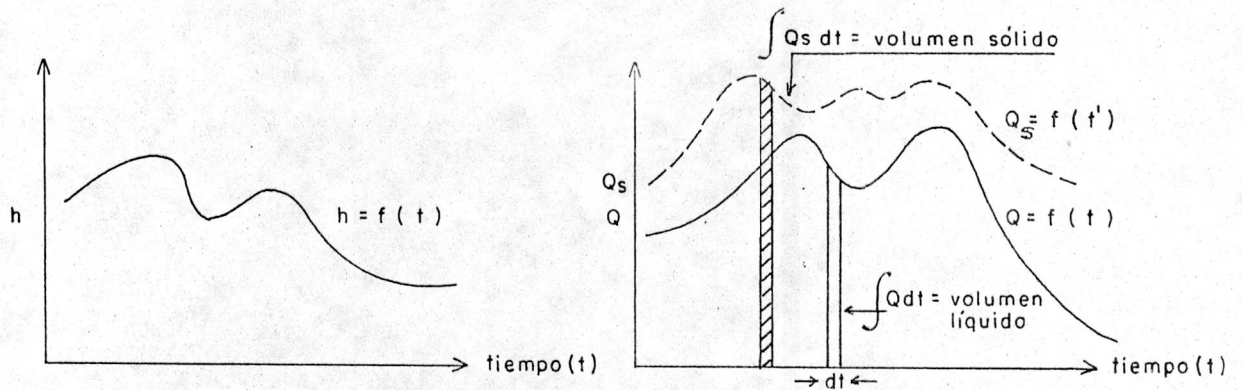
Como sugerencia y siempre que se disponga de algunas mediciones de campo que es el caso de muchos ríos en el país, se

recomienda aplicar preferiblemente el método de Einstein Modificado para estimar el transporte no medido y compararlo con el medido, ello permite a su vez separar el transporte del sedimento del lecho de la carga lavada.

5. DATOS Y CONCEPTOS BASICOS PARA CALCULAR LOS CAUDALES Y EL TRANSPORTE SOLIDO.

La información hidrológica básica recolectada en una estación hidrométrica, consiste generalmente de un registro histórico de niveles -h- del flujo, caudales líquidos -Q-, concentraciones de sedimentos, y eventualmente datos sobre físico-química y termicidad de las aguas.

Los dos primeros en forma gráfica se conocen como hidrogramas.



Considérese un flujo bidimensional y uniforme en la sección recta de un río (fig.B). Las descargas unitarias líquidas -q- y sólidas -qs-, se calculan mediante las expresiones:

$$q = \int_0^d u_y dy = vd \dots\dots\dots (3)$$

$$qs = \gamma \int_0^d u_y C_y dy \dots\dots\dots (4)$$

El transporte de sedimentos -Qs- pasando a través de la sección recta del flujo en un intervalo de tiempo t₂-t₁, se determina integrando la ecuación (4) para toda la sección, obteniéndose:

$$Qs = \gamma Q \bar{C} \dots\dots\dots (5)$$

siendo la cantidad total $-W_s-$ de sedimentos transportado en ese período de tiempo:

$$W_s = \int_{t_1}^{t_2} Q_s dt = \int_{t_1}^{t_2} Q \bar{C} dt = Q \bar{C} (t_2 - t_1) \dots \dots \dots (6)$$

de las expresiones (3) y (4), puede obtenerse para la concentración $-C_i-$ en la vertical de orden i .

$$C_i = \frac{q_s}{q} = \frac{\int_0^d u_y C_y dy}{\int_0^d u_y dy} \dots \dots \dots (7)$$

Que también puede expresarse en término del volúmen de la muestra $-V-$ y el peso $-W_s-$ de sedimento captado en un muestreador integrador, siendo:

$$W_s = \int_0^t C_y u_y A dt \dots \dots \dots (8)$$

$$V = \int_0^t u_y A dt \dots \dots \dots (9)$$

Si definimos la velocidad uniforme de tránsito como v_t :

$$v_t = \frac{dy}{dt} \quad (+ \text{ ascenso}) \dots \dots \dots (10)$$

e introducimos $- dy -$ en (8) y (9), separando términos constantes y eligiendo nuevos límites de integración, obtenemos:

$$W_s = \frac{A}{v_t} \int_a^d C_y u_y dy = \frac{A}{v_t} q_s \dots \dots \dots (11)$$

$$V = \frac{A}{v_t} \int_a^d u_y dy = \frac{A}{v_t} q \dots \dots \dots (12)$$

Obteniéndose finalmente similar expresión a (7), al hacer el cociente entre (11) y (12):

$$C_i = \frac{W_s}{V} \dots \dots \dots (13)$$

Para la sección, la concentración media \bar{C} deducida de (5), expresada en unidades consistentes es:

$$\bar{C} = \frac{Q_s}{Q} \dots \dots \dots (14)$$

Tomando como peso unitario γ de la mezcla de agua y sedimento*, el valor correspondiente al agua (1gr/cc).

Cuando en los ríos se producen variaciones notables de la concentración en un sentido transversal en la sección, se establecen programas de muestreo que consideran captaciones en diferentes verticales y como ésta además cambia con el tiempo $C = f(x, y, z, t)$, es necesario intensificar las mediciones del sedimento dentro del amplio rango de variación de caudales (ó niveles), de modo que pueda ser definida una apropiada relación (Q Vs Q_s), conocida como la curva de sedimentación (gráfico 3).

Los cambios espaciales de la concentración se asocian principalmente al tipo de sedimento, y las variables hidráulico - geométricas en la sección. Tratándose de n verticales de muestreo, la concentración promedio en la sección \bar{C} , se calcula a partir de:

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i = \frac{1}{n} [c_1 + c_2 + c_3 + \dots + c_n] \dots \dots \dots (15)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \left[\frac{W_1}{V_1} + \frac{W_2}{V_2} + \frac{W_3}{V_3} + \dots + \frac{W_n}{V_n} \right] \dots \dots \dots (16)$$

Mientras los caudales sólido - Q_s - y líquido - Q - totales en la sección, resultan de la adición de los gastos parciales $Q_{s,i} = q_{s,i} b_i$ y $Q_i = q_i b_i$, al aplicar las expresiones (11) y (12) puede demostrarse** que la captación equi-espaciada de las n - muestras, en verticales con una separación constante - b -

* Admisible solo en ríos con bajas concentraciones de sedimento.

** Tarea que se deja al lector.

permiten mezclar todas las muestras en una sola. Esto reduce el proceso de análisis de laboratorio y el transporte de grandes volúmenes de muestras luego de separar la arena y seleccionar una alícuota de la fracción granulométrica más fina, y de este modo se obtiene la concentración media - \bar{C} - en la sección.

En los ríos grandes del Sur de Venezuela, debido a la influencia de tributarios con distintos suministros de sólidos, existe separación de los flujos durante largos tramos fluviales, presentandose casos de desmezcla, lo cual hace necesario elegir varias verticales (10-15) en la sección, pero en ríos menores medidos en vado ó desde canastilla, una selección de tres verticales de muestreo separadas a 1/3, 1/2 y 2/3 del ancho -b- en la sección, se recomienda con el fin de uniformizar el número y la separación de las verticales. En este caso de la ecuación (15), se tiene:

$$\bar{C} = \frac{1}{3} (c_1 + c_2 + c_3) \dots\dots\dots (17)$$

Ello junto con el caudal líquido medido, permite evaluar el caudal sólido aplicando (5) y con una serie de mediciones se logra establecer, tanto la curva de gastos (h Vs Q) como la curva de sedimentación del período considerado.

6. CALCULOS DE ESCURRIMIENTO Y TRANSPORTE SOLIDO PARA LARGOS PERIODOS

Quando se procesan datos de caudales líquidos y transporte sólido, además de los valores instantáneos ó extremos, estamos interesados en evaluar las magnitudes para un mayor período, considerándose lapsos de meses, años particulares ó un largo período.

El procedimiento para transformar los niveles continuos del río en caudales líquidos -Q- y sólidos -Qs-, así como en escurrimientos y transportes sólidos de un extenso período, se fundamenta en relaciones funcionales sencillas, establecidas en base a mediciones de campo y el análisis estadístico.

Estas pueden expresarse en las siguientes formas:

$$h = f (t) \dots\dots\dots (18)$$

$$Q = f (h) \dots\dots\dots (19)$$

$$Q = f [f(t)] = f(t) \dots\dots\dots (20)$$

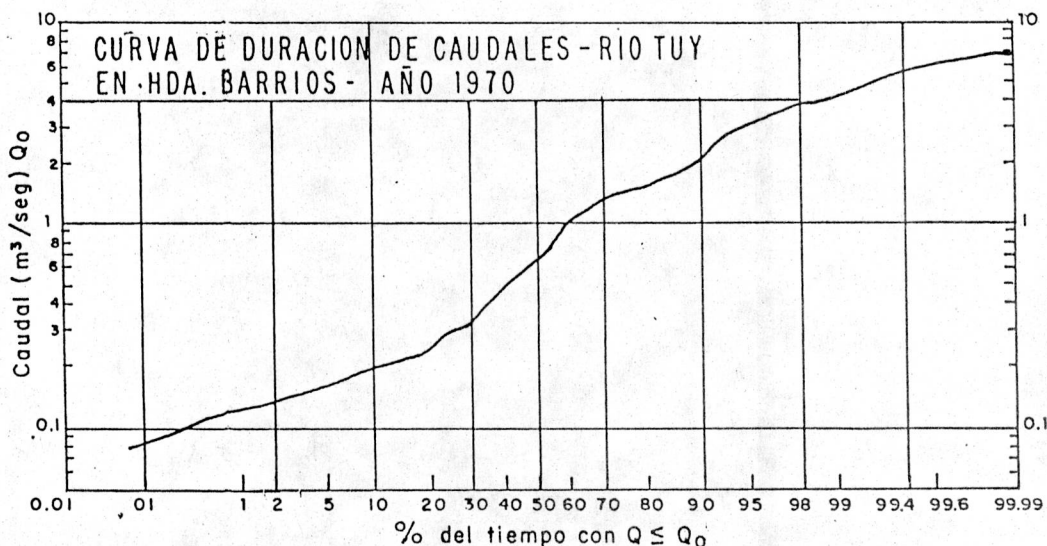
A través de un razonamiento similar se obtiene para el gasto sólido Q_s :

$$Q_s = f(Q) \dots\dots\dots (21)$$

$$Q_s = f [f(t')] = f(t') \dots\dots\dots (22)$$

Las series de tiempo expresadas por (20) y (22), pueden ser transformadas a través del apropiado tratamiento estadístico como se muestra en el cuadro N° 1, en curvas de frecuencia acumulativas (función de distribución de probabilidades. Gráfico N° 2), con validéz para el período de tiempo considerado y de ellas se obtienen los valores promedios de los caudales líquidos y sólidos (\bar{Q}, \bar{Q}_s), mediante la integración de las áreas

GRAFICO N° 2



subyacentes a las curvas de frecuencia de caudales y sólidos respectivamente, así se tiene:

$$\bar{Q} = \int_0^{1.0} f(t) dt \dots\dots\dots (23)$$

$$\bar{Q}_s = \int_0^{1.0} f(t') dt \dots\dots\dots (24)$$

El cálculo del escurrimiento y el transporte sólido total del período considerado, es inmediato. Un ejemplo ilustrativo

CALCULO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTO. RIO TUY - HDA. BARRIOS
AÑO 1970

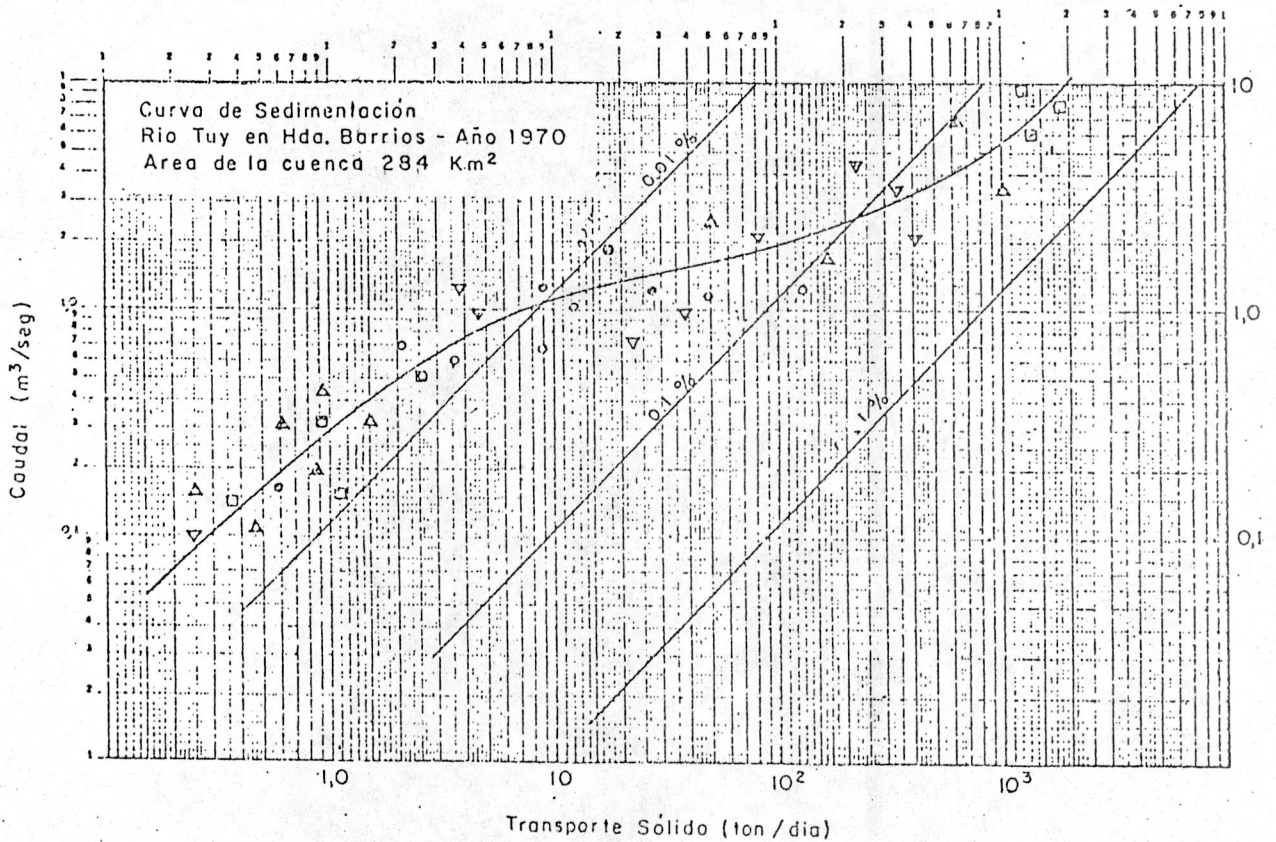
(1) LIMITES %	(2) INTERVALO %	(3) ORD. MEDIA %	(4) GASTO m ³ /seg	(5) SEDIMENTO ton/d	(6)	
					(2 X 4) 100	(2 X 5) .100
0,00 - 0,02	0,02	0,01	6,75	1.191,00	0,0014	0,233
0,02 - 0,1	0,08	0,06	6,30	1.111,00	0,0040	0,89
0,1 - 0,5	0,4	0,3	5,40	952,50	0,0216	3,82
0,5 - 1,5	1,0	1,0	4,40	649,00	0,0440	6,49
1,5 - 5,0	3,5	3,25	3,45	405,00	0,1208	14,18
5,0 - 15,0	10,0	10,0	2,00	105,00	0,2000	10,50
15,0 - 25,0	10,0	20,0	1,55	48,00	0,1550	4,80
25,0 - 35,0	10,0	30,0	1,40	25,00	0,1400	2,50
35,0 - 45,0	10,0	40,0	1,05	9,50	0,1050	0,95
45,0 - 55,0	10,0	50,0	0,66	3,50	0,066	0,23
55,0 - 65,0	10,0	60,0	0,50	2,10	0,050	0,21
65,9 - 75,0	10,0	70,0	0,33	1,25	0,033	0,125
75,0 - 85,0	10,0	80,0	0,24	0,95	0,024	0,95
85,0 - 95,0	10,0	90,0	0,20	0,62	0,020	0,062
95,0 - 98,5	3,5	96,75	0,15	0,45	0,0053	0,016

$\bar{Q} = 1,00 \text{ m}^3/\text{s} \text{ Ec (23)}$

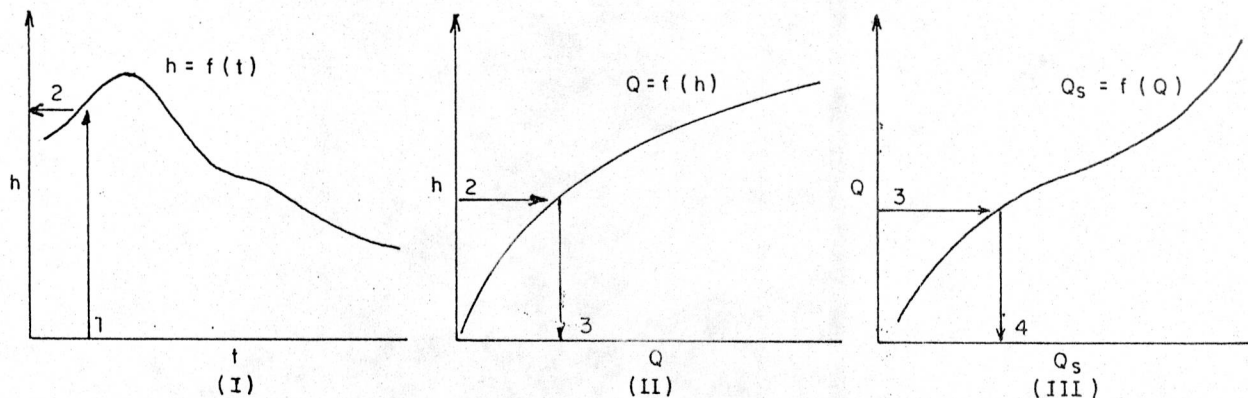
$\sum (6) \bar{Q}_s = 45,21 \text{ ton/d Ec (24)}$

$Q_s (\text{Año}) = \bar{Q}_s \times 365 = 16.500 \text{ Ton.}$

GRAFICO Nº 3



considerando el río Tuy se presenta utilizando los gráficos Nos. 2 y 3, así como la evaluación en el cuadro N° 1 de las expresiones (23) y (24), lo que permite definir el transporte anual Q_t , así el procedimiento iterativo se puede resumir en la aplicación continua para el período de interés, de las ecuaciones (18), (19) y (21), de acuerdo a la secuencia gráfica ilustrada a continuación:



Este método fué empleado en el pasado por la División de Hidrología del MOP y con el advenimiento de las computadoras fué modificado para considerar el caso común de ríos que presentan distintas curvas de sedimentación, reportar los datos para períodos mensuales y considerar las propiedades granulométricas del sedimento. Una versión adaptada a Microcomputadoras, será utilizada para procesar los datos de sedimentación correspondientes a los últimos años por parte de la Dirección de Hidrología y Meteorología.

7. CAMPAÑAS DE MEDICION EN LOS GRANDES RIOS

Con la relevancia de proyectos para la utilización de los grandes ríos de Venezuela con fines de generación de hidroelectricidad, control de inundaciones, navegación, se ha hecho necesario en la última década, intensificar los programas de mediciones hidrológicas y sedimentológicas, especialmente en los ríos Apure, Orinoco y sus mayores tributarios.

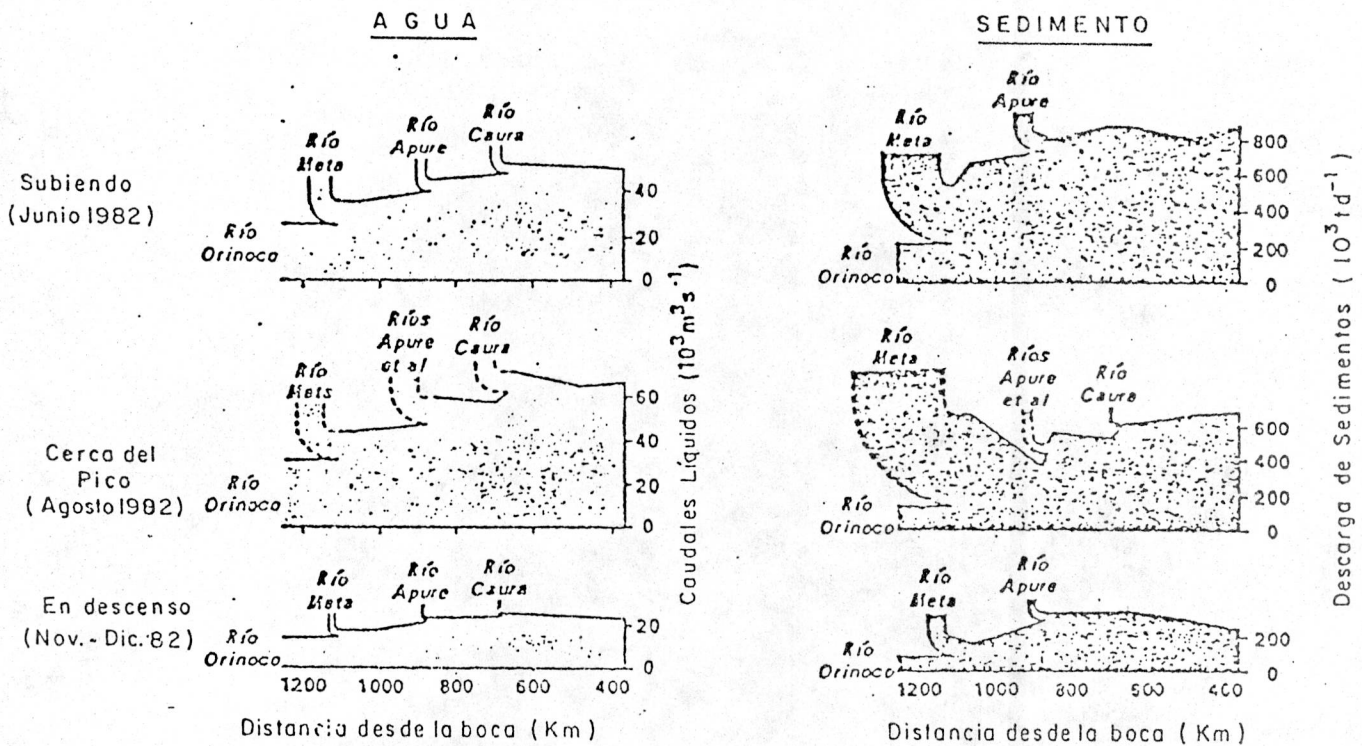
Técnicas modernas aplicadas por vez primera en los grandes ríos en aspectos como posicionamiento, muestreo, levantamiento de estructuras sedimentarias y mediciones de campo de velocidades, fueron introducidas y adaptadas a estos ríos en cooperación con el USGS de Estados Unidos.

Se ha introducido la variante de practicar las mediciones,

empleando un esquema Lagrangeano, mediante el cual se miden los flujos de materiales en sucesivas estaciones en dirección aguas abajo, incorporando el aporte de tributarios y realizando las campañas para condiciones particulares del régimen hidrológico de los ríos. Como ejemplo ilustrativo, se muestran resultados obtenidos en el río Orinoco en su tramo medio durante tres periodos señalándose espacialmente como se distribuyen los caudales sólidos y líquidos (Gráfico N° 4).

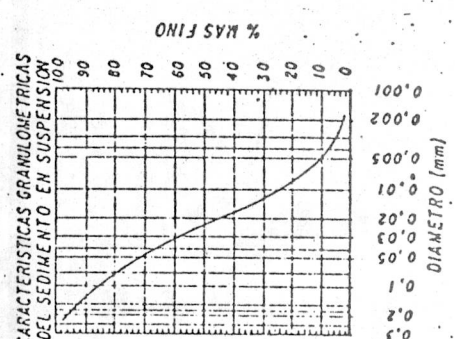
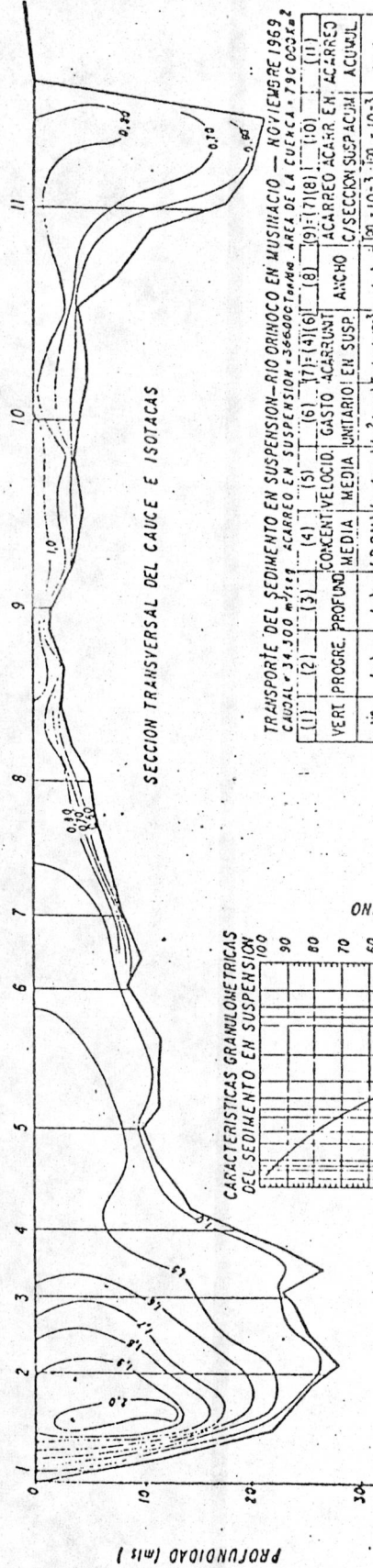
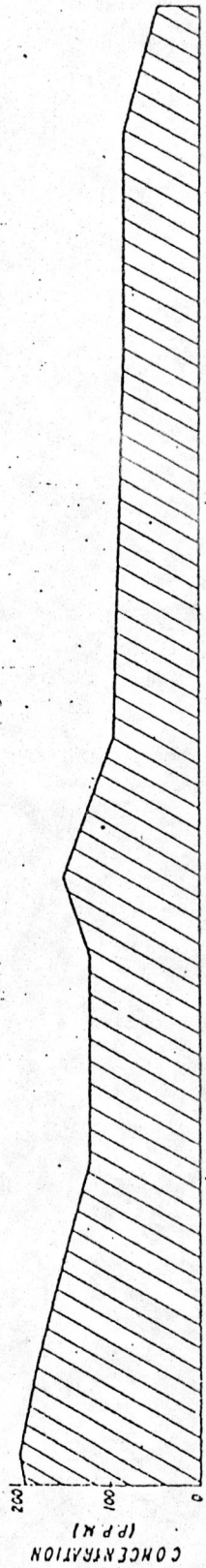
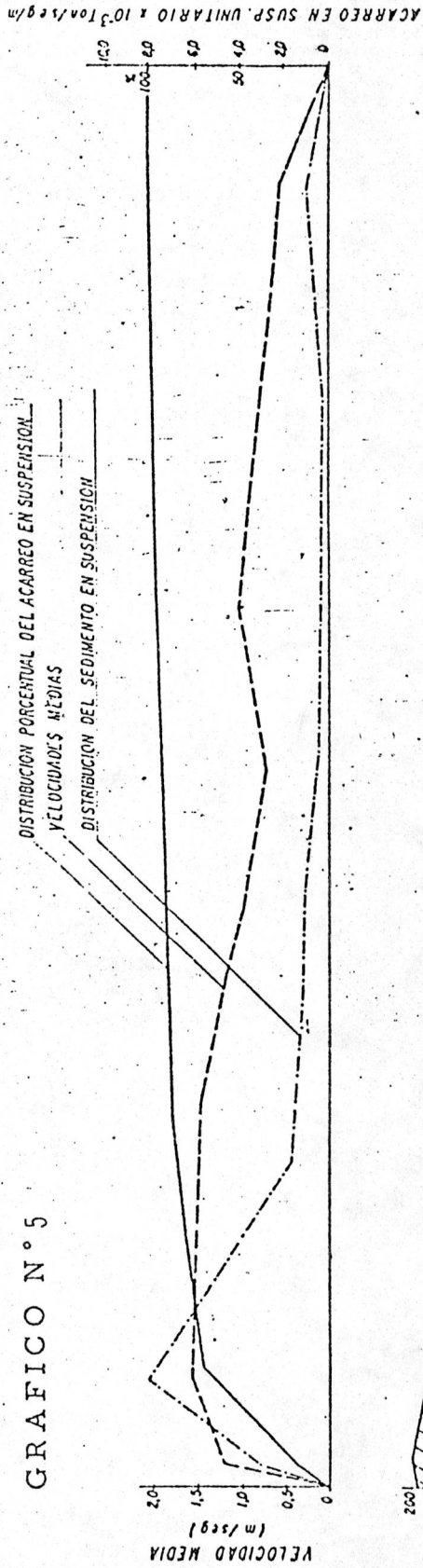
GRAFICO N° 4

DISTRIBUCION DE CAUDALES Y TRANSPORTE SOLIDO PARA TRES CONDICIONES DEL REGIMEN HIDROLOGICO DEL RIO ORINOCO Y ALGUNOS TRIBUTARIOS DEL TRAMO MEDIO.



Una medición rutinaria en estos ríos contempla definir el campo de velocidades, la distribución de la concentración y por ende del transporte sólido y los caudales líquidos en la sección transversal. Un ejemplo ilustrativo de la presentación de los datos, se muestra en el Gráfico N° 5. En la tabla anexa al mismo, se indican las verticales de muestreo y su localización en la sección, así como la profundidad - d -, la velocidad media - v -. Se obtiene del perfil de velocidad, con cinco mediciones puntuales

GRAFICO N° 5



TRANSPORTE DEL SEDIMENTO EN SUSPENSION—RIO ORINOCO EN MUSIHACIO — NOVIEMBRE 1959
CAUDAL = 34,500 m³/seg ACARREO EN SUSPENSION = 36600 Ton/mo AREA DE LA CUENCA = 790,000 km²

VERT	PROGRE.	PROFUND. (m)	CONCENTRACION MEDIA (PPM)	VELOCIDAD MEDIA (m/seg)	ACARREO UNITARIO EN SUSP. (Ton/seg/m ²)	ANCHO (m)	ACARREO ACARREO EN ACARREO C/SECCION SUSPACUM ACUMUL (%)	
1	0+40	11.00	200	1.38	15.20	3.04	128.5	
2	0+217	27.69	180	1.63	45.66	8.18	154	
3	0+348	23.60	157	37.05	3.67	284	1045	
4	0+472	18.84	130	1.50	28.26	1.75	255	
5	0+661	10.67	110	1.49	15.90	1.22	246	
6	0+982	8.38	110	1.32	11.06	1.04	170	
7	0+1153	7.04	150	0.99	6.50	0.72	132	
8	0+1323	5.03	150	0.72	3.62	0.543	243.5	
9	0+1640	3.23	90	1.01	3.26	0.293	376.5	
10	0+2080	4.45	80	0.75	3.33	0.266	387	
11	0+2415	17.71	80	0.65	11.54	0.923	353	
TOTAL							4236	100.0

a cada 0,20d, los caudales unitarios, líquidos y sólidos se calculan mediante las expresiones (3) y (4), lo cual conduce al caudal y al transporte sólido en cada sub-sección, al multiplicarlos por el ancho respectivo - b -. El transporte sólido medido - Q_m - es el resultado de sumar estos valores parciales.

Las mediciones se acompañan de sondeos batimétricos para definir formas de fondo y estructuras sedimentarias, además de termicidad y muestreos para análisis físico-químicos del agua. Finalmente se realizan muestreos del material de lecho tanto en depósitos sub-acuáticos como expuestos a la atmósfera, -al punto de que pocos ríos grandes en el mundo, poseen una información en este aspecto tan amplia, como el río Orinoco. Resultados parciales de éstas investigaciones, han sido publicadas recientemente (2), (5) y (7).-

8. DEFINICION DE TERMINOS

- A - área de la sección circular de la boquilla de un muestreador integrador (L^2).
- a - espesor de la capa del fondo no muestreada (L)
- b - ancho de una sub-sección fluvial. (L)
- bi - ancho de una sub-sección de orden i (L)
- \bar{C} - concentración media del sedimento en una vertical ó sección fluvial.
- Ci - concentración del sedimento en una vertical de orden i ($i=1,2,3\dots n$).
- Cy - concentración del sedimento a una profundidad y.
- d - profundidad del flujo en una vertical (L).
- ds - diámetro de las partículas de sedimento (L).
- H,h - nivel ó mira de referencia en una sección fluvial (L).
- n - número de verticales medidas ó muestreadas en una sección.
- Q - caudal líquido instantáneo en una sección (L^3T^{-1}).
- \bar{Q} - caudal líquido promedio en una sección (L^3T^{-1}).
- Qb - descarga del sedimento de lecho (FT^{-1}).
- Qi - caudal líquido en una sub-sección de orden i (L^3T^{-1}).
- Qsi - caudal sólido en una sub-sección de orden i
- Qw - carga lavada (FT^{-1}).
- Qs - transporte sólido instantáneo (FT^{-1}).
- \bar{Q}, \bar{Q}_s - valores promedios de Q y Qs (FT^{-1}).
- Qsi - caudal sólido de una sub-sección de orden i (FT^{-1}).
- QT - transporte sólido total en una sección (FT^{-1}).
- q - caudal líquido unitario en una sección (L^2T^{-1}).
- qs - caudal sólido unitario en una sección ($FT^{-1}L^{-1}$).
- qsi - caudal sólido unitario en una sección de orden i.

- S - capacidad de suministro de sedimentos a una sección ó tramo fluvial (FT^{-1}).
- T - capacidad de transporte de sedimentos de un río (FT^{-1}).
- v - velocidad media del flujo en una vertical (LT^{-1}).
- v_y - velocidad a una profundidad y del flujo en la vertical (LT^{-1}).
- W_s - peso del sedimento captado en una muestra integrada (F).
- $W_1, W_2 \dots W_n$ - peso de sedimento en cada muestra (F).
- V - volúmen de la mezcla de agua y sedimento captado en un muestreador integrador (L^3).
- $V_1, V_2 \dots V_n$ - volúmenes de las muestras en cada vertical (L^3).
- v_t - velocidad uniforme de ascenso ó descenso de un aparato integrador en la profundidad del flujo ($v_t = dy/dt$).
- δ - peso unitario promedio de la mezcla de agua y sedimento (FL^{-3}).

9. **BIBLIOGRAFIA**

1. GRAF. W. Hydraulics of Sediment Transport. MC. Graw Hill series in water resources and enviromental engineering.
2. MEADE R., NORDIN, C., PEREZ H.D., A. MEJIA - PEREZ GODOY (1983). "Caudales Líquidos y Sólidos en el Río Orinoco, Venezuela y Colombia - MARNR - USGS. Public.
3. SHEN H. W. (1970). Wash load and Bed Load "In river Mechanics". Chap. 11, Col. State Univ. Pub. Vol. I.
4. TASK COMMITTEE for preparation of sediment manual. Hyd. Div. Chapter II. "Sediment Transportation Mechanics" H. Sediment Discharge Formulas.
5. Mc KEE E. D., (1989). "Sedimentary Structures and Textures of rio Orinoco Channel Sand", Venezuela and Colombia. USGS WS paper 2326-B.
6. NORDIN C., E. RICHARDSON (1970). "Instrumentation and Measuring Technics".Chapter 14, Col. State Univ. Pub. Vol.I.
7. NORDIN C., PEREZ HERNANDEZ D., (1990). "Sand waves, bars and wind-blown sands of the rio Orinoco", Venezuela and Colombia. USGS. WS paper 2326-A.
8. PEREZ HERNANDEZ. D., (1975) "Procesos Fluviales en la Cuenca y Sistema Deltáico del Río Neverí", Venezuela Oriental. División de Hidrología, DGRH-MOP.
9. ----- (1985). "Distribución de Caudales Líquidos y Sólidos en secciones de ríos grandes y evaluación de Parámetros Estadísticos de los Sedimentos del Lecho". V Jornadas Nacionales de Ingeniería Hidráulica. Caracas.
10. ----- (1971). "Transporte del Sedimento de Lecho" I Seminario sobre Mecánica Fluvial y Aplicaciones a Proyectos de Obras Hidráulicas en Venezuela. LNH Ernesto León D.
11. ----- (1983). "Técnicas Modernas de Medición en el Río Orinoco". Dirección de Hidrología. DGSIIA-MARNR.

GRÁFICO No. 101
CURVA DE SEDIMENTACIÓN
 RIO - EST. FRO - PUENTE RIO FRIO
 AÑO 1971/72 MUESTREO (EST. DM-48 USD-40)
 AREA DE LA CUENCA 1.486 Km²
 SIMBOLOGÍA:
 ○ ENE ○ ABR ○ JUL ○ OCT
 □ FEB ▼ MAY ▲ AGO ○ NOV
 ■ MAR ○ JUN ○ SEP ● DIC.

TABLA

REVIS

