

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.

El presente informe contiene el resumen del proyecto de investigación titulado **“Cuantificación de los procesos de Transporte de sedimentos en cauces aluviales”**, que se ha desarrollado durante la gestión 2009.

La idea de este proyecto viene desde el año 2006, donde en una primera fase del mismo se tomaron todos los datos disponibles de crecidas observadas en el Rip Pirá y, mediante procesos matemáticos se llegó a determinar y cuantificar la variación del lecho en crecidas. Los rangos de datos son considerables ya que pasan los 2500 m³/s, y esto hace que el estudio que se presenta tenga características pioneras. (Ver informe de proyecto Fase I – diciembre 2007).

En la segunda fase del estudio desarrollado durante 2008, se ha avanzado en el conocimiento del proceso y se ha llegado a plantear una teoría sobre el movimiento dinámico de los sedimentos y partículas en el lecho de cauces aluviales y, además a proponer una ecuación o mejor dicho una metodología para cuantificar el fenómeno de transporte de sedimentos por el mecanismo de arrastre de fondo.

Dentro de los procesos de transporte de sedimentos se han desarrollado varias metodologías para poder cuantificar la cantidad de sedimentos que pasan por cauces fluviales aluviales atendiendo tanto al origen del material, como a los mecanismos por el cual estos transportan el material sólido formando un todo con el flujo líquido. El presente proyecto pretende abarcar el desarrollo de programas de ordenador que permitan cuantificar los procesos de transporte de sedimentos.

2. RESUMEN GENERAL.

La idea básica del proyecto es la de desarrollar los métodos de cómputo propuestos por varios autores y, a su vez, implementar programas de ordenador/computadora que permitan su uso.

En principio se vió por conveniente el desarrollar estos programas con fines netamente académicos, es decir de manera que al utilizarlos, el usuario pueda percibir tanto las variables que intervienen en el proceso, como los datos que son necesarios para poder cuantificar estos procesos.

El objetivo del proyecto fue complementado con el fin de tener programas de uso profesional y la aplicación de los programas al caso práctico Rio Grande.

3.- OBJETIVOS DEL PROYECTO.-

Se presenta una relación de los objetivos de origen y los alcanzados hasta el momento en la realización de este proyecto.

3.1.- Objetivos Generales.-

Los objetivos del proyecto de investigación estaban encaminados (siguiendo el perfil del proyecto presentado) a lo siguiente:

- Presentar las metodologías que más se utilizan –por su carácter- en el proceso de cuantificación del transporte de sedimentos en cauces fluviales aluviales concebidos por varios autores, y desarrollar métodos computacionales e implementarlos en programas de computadora que permitan su uso.
- Efectuar dos tipos de programas:
 - Programas de carácter académico, de manera interactiva entre las variables de ingreso, de proceso y resultados finales.
 - Programas de carácter más profesional en donde la serie de datos y resultados se presenten en planillas de archivos de EXCEL y los procesos internos de computo con programas en Visual Basic.
- Aplicar la serie de metodologías a casos específicos bien de Rio Grande o del Rio Pirai.

Finalmente, dentro del proyecto se han efectuado los siguientes trabajos:

- Desarrollo de las metodologías

- En lo referente a los programas de computación estos se han efectuado en Visual Basic 5.0 e interactúan con planillas de EXCEL.
- Se han aplicado las metodologías desarrolladas al caso del Rio Grande, toda vez que no se tienen antecedentes de este tipo de trabajo en el mismo.

3.2.- Objetivos específicos.-

Dentro del desarrollo del proyecto se persiguen los siguientes objetivos específicos:

- 3.2.1.- Desarrollo de metodologías de Transporte o arrastre de fondo.-

Dentro de estas se desarrollaran las siguientes metodologías:

Shields (1936)
Meyer-Peter-Muller (1948)
Einstein – Brown (1950)
Parker – Lechos de grava (1982)
García Gutiérrez (2008)

- 3.2.2.- Desarrollo de metodologías de Transporte en suspension.-

Einstein (1950)
Engelund-Hansen (1967)
Tofaletti,. (1968)
Ackers & White (1973)

- 3.2.3.- Desarrollo de metodologías de Transporte total de material del lecho.-

Engelund-Hansen (1967)
Tofaletti,. (1968)
Ackers & White (1973)

- 3.2.4.- Desarrollo de metodologías de Transporte total de material del lecho y carga de lavado.-

Einstein (1950)

Tofaletti (1968)

- Se han desarrollado las metodologías y algoritmos con un avance bastante adecuado y el desarrollo de las mismas se explicará en el apartado 5 del presente informe.

4.- IMPORTANCIA DEL PROYECTO.-

A nivel mundial, las investigaciones existentes para conocer y poder describir los fenómenos asociados al transporte de sedimentos en cauces aluviales han estado bien limitadas, ya que hay muy pocos expertos en el rubro. Los problemas que ocasionan los sistemas fluviales requieren del conocimiento cabal de los fenómenos de transporte del fluido en conjunto con los sedimentos y, en general de la naturaleza de las interrelaciones entre ambos. Por la razón indicada, esto supone una interrelación entre las disciplinas de Hidráulica y sedimentología.

El conocimiento y apreciación de los parámetros y variables del proceso es de gran interés en la ciencia e ingeniería ya que ellos permiten el poder cuantificarlos y finalmente sustentar las medidas estructurales de acuerdo a los procesos del sistema fluvial y a dimensionarlos de manera adecuada.

El aporte del presente proyecto `pretende brindar herramientas que permitan en el futuro abarcar la disciplina del transporte de sedimentos y transmitir a alumnos de ingeniería y profesionales, los medios actuales para la cuantificación de los procesos de transporte de sedimentos, haciendo uso de programas de computación.

5).- METODOLOGIA DE RELACIONES PARA CUANTIFICAR LOS PROCESOS DE TRANSPORTE DE FONDO O ARRASTRE DE FONDO.

5.1.- ANTECEDENTES Y GENERALIDADES SOBRE EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.-

El movimiento de las partículas se debe a la acción que ejerce el flujo sobre ellas, a través de las fuerzas normales y de corte.

Bien se sabe que los sedimentos se mueven en cauces aluviales según dos mecanismos;

- Transporte de fondo.
- Transporte en suspensión.

El transporte de fondo se caracteriza, por efectuarse con las partículas en continuo e íntimo contacto con el lecho granular. Se da en general para las partículas de mayor tamaño, en las que el peso sobrepasa a las fuerzas del escurrimiento. El movimiento se efectúa por la acción de fuerzas de arrastre, que son preferentemente en la dirección del escurrimiento. Este movimiento se caracteriza por ser intermitente; es decir, que las partículas se mueven y se detienen continuamente. Los períodos de reposo son en general mucho mayores que los de movimiento. Sin embargo, a medida que aumenta la capacidad de arrastre del flujo, estos períodos de reposo se van haciendo cada vez menores, tendiéndose paulatinamente hacia una uniformación del arrastre sólido.

El transporte en suspensión. se caracteriza por formar parte del flujo líquido, y suspendido en este a partir de cierto nivel por encima del lecho activo hasta la superficie libre. Este se da en continuo intercambio de masa turbulento.

Además, hay que diferenciar estos mecanismos de transporte según el origen del material, bien sea este de material del lecho o de lavado, siendo este último, material muy fino que no es del lecho, y que ingresa al sistema fluvial aguas arriba del punto en consideración y proviene de aportes de la cuenca.

El siguiente cuadro permite apreciar en resumen, los procesos de transporte de sedimentos tomando en cuenta el origen del material –o sedimentos-, como los mecanismos en los cuales este se transporta en la corriente aluvial:

| MATERIAL | (1)-ORIGEN/FUENTE | (2) MECANISMO DE TRANSPORTE | (3) TRANSPORTE TOTAL | |
|--------------------|---------------------|------------------------------------|--|------------------------------------|
| LECHO | 1.- Carga de Lecho | 1.- Transporte o arrastre de fondo | 1.-Transporte total de carga del lecho | 2.- Transporte total de sedimentos |
| LAVADO (Wash Load) | 2.- Carga de Lavado | 2.- Transporte en suspensión | | |

Cuadro No. 1.- Tipos y mecanismos de transporte de sedimentos en cauces fluviales. Fuente: Francisco García Gutiérrez

En lo que sigue, el desarrollo se centrará en el transporte de fondo, ya que el transporte en suspensión merecerá un capítulo especial una vez que se hayan terminado de desarrollar las metodologías.

En el transporte de fondo que corresponde a material del lecho, - o mas bien al transporte de carga de fondo- se deben diferenciar los siguientes modos de transporte:

- Deslizante o resbalante.
- Rodante.
- Saltante.

El movimiento rodante consiste en el avance de las partículas por medio de una rotación en torno a un punto de contacto, generado por un torque local.

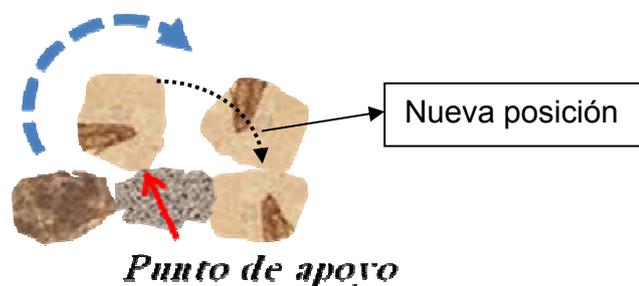


Ilustración 1.- Movimiento Rodante.-

El movimiento resbalante ocurre cuando las partículas se encuentran apoyadas sobre una superficie suficientemente plana de modo que no existe un punto de apoyo en torno al cual rotar.

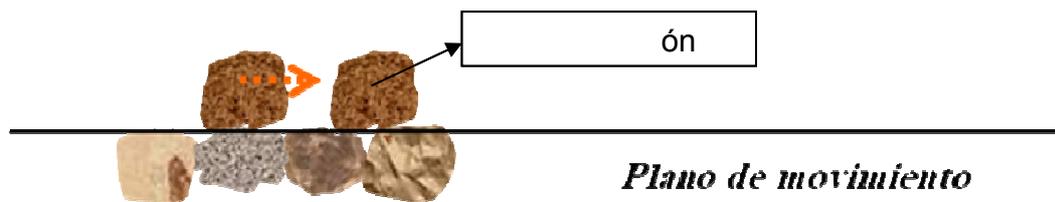


Ilustración 2.- Movimiento Deslizante o resbalante.-

El tercer tipo corresponde a lo que se denomina "transporte de saltación"; aquí las partículas son elevadas desde el lecho por el flujo traduciéndose ello en saltos intermitentes que alcanzan alturas de unos pocos diámetros de partícula. Es un modo de transporte que se da también en flujos gaseosos o de aire; se observa frecuentemente en el movimiento de sedimento inducido mediante la acción del viento (transporte eólico).

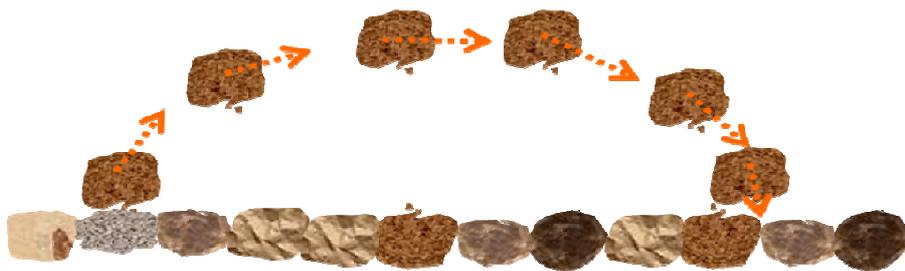


Ilustración 3.- Movimiento Saltante.-

Diversos han sido los autores y, consecuentemente las teorías e hipótesis bajo las cuales se han dado innumerables relaciones para poder cuantificar el transporte de sedimentos por el mecanismo de transporte de fondo. Sobre todo, porque este

es el mecanismo que se da en materiales que componen el lecho de características gruesas y que generalmente, pero no exclusivamente, se desplazan mediante dicho mecanismo.

Se tiene antecedentes desde Dubois (1879) hasta Shields (1936) cuyas formulas están basadas en los esfuerzos de corte tangenciales sobre el lecho, hasta la célebre relación de Meyer-Peter-Muller (1948), en la cual se hace ya referencia a la diferencia de la resistencia al flujo debida a la partículas que componen el lecho de la resistencia total, y propone una relación de carácter dinámico, ya que equilibra el peso sumergido de las partículas con relación al esfuerzo de corte que se produce por la resistencia de la partícula y el esfuerzo de corte que da el umbral de movimiento; es decir, al esfuerzo residual disponible para que la partícula se mueva (como diferencia entre el esfuerzo de corte total y el necesario para que la partícula entre en movimiento).

Hans A. Einstein (hijo del célebre físico y matemático) en 1942 plantea un modelo en base a las probabilidades de que las partículas que componen el lecho se pongan en movimiento y se desplacen, y su trabajo fue posteriormente modificado por Rouse, Boyer y Laursen en un capítulo descrito por Brown en 1950, dando lugar a la fórmula denominada de Einstein-Brown. Esta emplea dos parámetros adimensionales, como los fundamentales en la descripción del movimiento de partículas en el lecho y utiliza ya los conceptos de velocidad de asentamiento de las partículas. En su forma original se aparta de los conceptos de esfuerzo cortante crítico.

En 1970 Ashida & Michiue, establecieron una sencilla relación en base a esfuerzos de corte y al diámetro mediano, aunque puede utilizarse para mezclas. Esta fue calibrada en un sinnúmero de ríos de Japón y los Estados Unidos con datos de cauces naturales y de laboratorio.

5.2.- CLASIFICACION DE LOS SEDIMENTOS ALUVIALES CON FINES A ESTUDIOS DE HIDRAULICA FLUVIAL Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.

Si bien al momento la clasificación de las partículas sólidas que forman lo que se llama en ingeniería “suelos”, está bien definida en cuanto a los rangos de los tamaños; este tiene ligeras modificaciones en lo que se refiere al transporte de sedimentos o más bien al estudio de sedimentos que caracterizan los cauces fluviales.

El siguiente cuadro presenta un resumen de los rangos que, generalmente, pero no exclusivamente, son adoptados por varios autores para caracterizar los cauces fluviales atendiendo al tipo de sedimento que forma sus contornos (lecho y márgenes).

Generalmente en lo que se refiere al Transporte o arrastre de fondo, se adopta la nomenclatura tradicional. Sin embargo, y cuando se requiere efectuar la evaluación del transporte para cada componente del material que la corriente fluvial transporta – especialmente mediante el mecanismo de suspensión-, muchas veces se toman los límites de los rangos para el tamaño del material, siguiendo la clasificación alternativa presentada bajo el cuadro “sedimentología y morfología fluvial”.

| Tipo de partículas | Tradicionales | | Sedimentología y Morfología fluvial | | | | |
|--------------------|---------------|---------------|-------------------------------------|------------|-----------------------------|---|----------------------|
| | Clase | Rango (mm) | Clase | Rango (mm) | Diam. Medio geométrico (mm) | Clasificación del lecho en cauces aluviales | Naturaleza / Textura |
| PIEDRAS | | MAS DE 60.0 | GRAVAS | 16.0-256.0 | | 16.0-256.0 GRAVA | No-cohesivos |
| GRAVAS | GRUESA | 60-20 | | 2.0-16.0 | 5.650 | 2.0-16.0 TRANSICION | |
| | MEDIA | 20-6.0 | | | | | |
| | FINA | 6.0-2.0 | | | | | |
| ARENAS | GRUESA | 2-0.625 | MUY GRUESA | 2.0-1.0 | 1.414 | 2 - 0.05 ARENOSOS | |
| | | | GRUESA | 1.0-0.5 | 0.707 | | |
| | MEDIA | 0.625-0.2 | MEDIA | 0.5-0.25 | 0.354 | | |
| | FINA | 0.2-0.0625 | FINA | 0.25-0.1 | 0.158 | | |
| | | | MUY FINA | 0.1-0.05 | 0.071 | | |
| LIMOS | GRUESA | 0.0625-0.02 | LIMO | 0.05-0.002 | 0.010 | < 0.05 MATERIAL FINO | |
| | MEDIA | 0.02-0.00625 | | | | | |
| | FINA | 0.00625-0.002 | | | | | Cohesivos |
| ARCILLAS | | < 0.002 | ARCILLAS | < 0.002 | | | |

Cuadro No. 2.- Clasificación del material que compone el lecho de cauces aluviales y sedimentos transportados por la corriente fluvial.

Fuente: Fuente: Francisco García Gutiérrez

5.3.- METODOS PARA LA CUANTIFICACION DE LOS PROCESOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS MEDIANTE EL MECANISMO DE FONDO O ARRASTRE DE FONDO.

5.3.1.- GENERALIDADES.-

Como bien se indicó en el apartado 5.1 y el Cuadro No. 1, este mecanismo de transporte está asociado enteramente al material proveniente del lecho.

Hay que aclarar que los mecanismo pueden – y generalmente es así-, coexistir. Es decir, que las partículas mas gruesas que forman el lecho se transporte mediante arrastre de fondo y que, las mas finas – en el rango de arenas a arcillas – formen parte del flujo en suspensión con el mismo.

Se asume que las partículas de solidos viajan a la misma velocidad del flujo – especialmente las que lo hacen en suspensión - de ahí que el término “carga” haga alusión a este extremo y el de “concentración” a la posibilidad de que las partículas y el flujo tengan diferentes velocidades. Aunque, hoy en día, ambos términos, es decir carga y concentración, se utilizan indistintamente, es preciso aclarar el concepto fundamental de cada una de ellas.

Se presentarán las diversas teorías desarrolladas para cuantificar este proceso, y para empezar los datos que deben estar disponibles son los siguientes:

Datos sedimentológicos:

Composición del material del lecho.
Velocidad de asentamiento de las partículas.
Peso sumergido de las partículas.

Los dos últimos son los que básicamente sirven para determinar la predominancia en el mecanismo de transporte en conjunto con las características del flujo.

Dependiendo del autor los diámetros que caracterizan el transporte de fondo y el de suspensión pueden variar.

Datos hidraulicos:

Condiciones de rugosidad (correspondientes a partículas y formas de lecho).

Proyecto de Investigación
Informe Final

Velocidad media.

Relaciones de Descarga versus Profundidad de flujo.

Gradiente de Energía.

Geometricos:

Pendiente del cauce.

Sección transversal.

Las cantidades de sedimentos bien se hacen por volúmen o masa por unidad de tiempo y ancho de flujo. Por éello, debe tenerse especial cuidado en verificar las unidades de cada metodología.

Es de suma importancia destacar que la única manera de establecer la bondad de estas relaciones al momento de aplicarlas, es su buena correlación con datos medidos.

Las relaciones que se presentan, van acompañadas, en su caso de correcciones que incluyen el efecto de la pendiente longitudinal que, en muchos casos, es despreciada al asumir que esta és pequeña.

Las metodologías que se presentan son las siguientes:

- Duboys (1879)
- Shields (1936)
- Schoklitsch (1934).
- Meyer-Peter-Muller (1948)
- Einstein (1942-8)
- Einstein – Brown (1950)
- Parker – Lechos de grava (1982)
- Garcia Gutierrez (2008)

5.3.2. ECUACION DE BU-BOYS (1879).

En su forma original está dada por:

$$qb = Cd \tau_0 (\tau_0 - \tau_c) \quad (1)$$

Donde:

$$\begin{aligned} qb &= \text{descarga de fondo por unidad de ancho. (m}^3/\text{m s)}. \\ \tau_0 &= \text{tension de corte en el lecho.} \\ Cd &= \text{coeficiente dado por: } Cd = 0.17/D^{3/4}. \quad (2) \\ \tau_c &= 0.061 + 0.093 D \text{ (Kg/m}^2\text{)}. \\ D &= \text{diámetro del material en milímetros.} \end{aligned}$$

Las relaciones para Cd y τ_c fueron introducidas por Straub (1935), y es de observar también que el valor de τ_c en esta ecuación no corresponde al definido por la tensión crítica de Shields.

5.3.3. ECUACION DE SHIELDS (1936).

Esta ecuación sigue la misma línea que la de Duboys, en el sentido de que el transporte de fondo esencialmente se debe al “exceso del esfuerzo de corte”, que no es más que la diferencia entre el valor del esfuerzo de corte y el crítico que es el necesario para que la partícula que forma el lecho empiece a moverse.

Esta relación toma la forma:

$$\frac{qb\gamma_s}{q\gamma} = 10 \frac{\tau_0 - \tau_c}{(\gamma_s - \gamma)d} \quad (3)$$

Donde:

$$\begin{aligned} qb &= \text{descarga de fondo por unidad de ancho. (m}^3/\text{m s)}. \\ q &= \text{Descarga de flujo por unidad de ancho. (m}^3/\text{m s)}. \\ \tau_0 &= \text{tension de corte en el lecho.} \\ \tau_c &= \text{tension de corte crítica.} \\ d &= \text{diámetro del material en milímetros.} \\ \gamma_s &= \text{Peso específico de los sedimentos.} \\ \gamma &= \text{Peso específico del fluido.} \end{aligned}$$

Observe el lector que en esencia la diferencia entre esta relación y la de Duboys, es el coeficiente Cd. Todas las relaciones en la forma de tensiones de corte residuales, tienen esa característica.

5.3.4. RELACION DE SCHOKLITSCH. (1934).

Dada en la siguiente forma:

$$qb_v = \frac{7000}{\rho_s} \frac{J^{3/2}}{ds^{1/2}} (q_l - q_c) \quad (4)$$

Donde:

qb_v = Carga de fondo en $m^3/m \text{ s}$.

ds = Diámetro de la partícula en milímetros.

q_l = Descarga líquida específica. (m^2/s).

q_c = Descarga crítica en (m^2/s) y definida como la que causa movimiento incipiente.

= $1.94 \times 10^{-5} ds/J^{4/3}$, para partículas con $\rho_s = 2.65$.

ds = D50 para distribución uniforme.

J = Gradiente hidráulico.

Cubre rangos desde 0.3 mm hasta 0.7 mm. de forma adecuada y, debe tenerse en cuenta que el Gradiente Hidraulico en realidad corresponde al Gradiente de energía total, sin embargo, en muchas situaciones este se toma como la pendiente del lecho bajo la asunción de "flujo uniforme".

5.3.5. FORMULA DE MEYER PETER Y MULLER. (1948).

Esta dada por:

$$\left[\frac{qb(\gamma_s - \gamma)}{\gamma_s} \right]^{2/3} \left[\frac{\gamma}{g} \right]^{1/3} \frac{0.25}{(\gamma_s - \gamma) dm} = \frac{(K/K')^{3/2} \gamma RS}{(\gamma_s - \gamma) dm} - 0.047 \quad (5)$$

Donde:

qb = descarga de sedimentos de fondo en peso por unidad de ancho y tiempo ($Kg/m \text{ s}$).

$$dm = \sum P_i d_i \quad (6)$$

d_i = fracción de tamaño de la partícula.

d_i = tamaño medio de la fracción del material del lecho.

P_i = Fracción por peso del material del lecho de la clase " i ".

K y K' = Recíprocos del número de Manning definidos por:

$$V = K R^{2/3} S^{1/2}$$

y,
$$V = K' R^{2/3} S^{1/2}.$$

V = Velocidad promedio en la sección.

R = Radio hidráulico.

S = Gradiente total de energía.

S' = Gradiente de energía causado por la rugosidad de las partículas.

$$K' = 26/(D_{90})^{1/6} \quad (7)$$

D_{90} = Tamaño del grano para el cuál el 90% son más finos, en metros.

El término $(K/K')^{3/2}$ recibe el nombre de factor de rizadura (*"ripple factor"* en la literatura anglo-sajona), y éste toma en cuenta el hecho de que solo parte de la tensión de corte se usa en el transporte.

Consideraciones: Esta fórmula ha sido evaluada de forma experimental para materiales con $D \geq 0.4$ mm. y hasta 24 mm. en granos uniformes, y en ausencia de carga en suspensión hasta pendientes de 0.001; a partir de este valor de la pendiente pueden haber discrepancias entre valores medidos y calculados.

5.3.6. PROCEDIMIENTO DE EINSTEIN.

Este es un procedimiento particular, el cual incluye elementos que hacen a la probabilidad de que las partículas entren en movimiento.

El procedimiento de Einstein requiere de dos partes en su evaluación, una que hace a las características hidráulicas y la otra a la evaluación del transporte de sedimento de fondo.

Proyecto de Investigación
Informe Final

En lo que hace a la evaluación hidráulica se procede a evaluar los componentes de resistencia relacionados con el componente de las partículas y de las formas de lecho. De esa manera, se tienen los elementos para determinar el perfil de velocidades. Este se indica a continuación:

En primer lugar, y como ya se estableció líneas arriba, es necesario determinar las variables de resistencia al flujo correspondientes a: las partículas (indicadas con un superíndice prima) y formas de lecho (indicadas con un superíndice doble prima), en la forma de Radios hidráulicos, o Niveles de flujo o velocidades de corte.

La altura de rugosidad equivalente de Nikuradse se estima como igual al d_{65} (mm). Este es el diámetro característico definido por Einstein para el componente de partículas.

$$K_s = d_{65} \quad (8)$$

A partir de ellas se evalúa el parámetro “ δ ”, que no es mas que el espesor de la subcapa laminar de flujo e igual a:

$$\delta = \frac{11.6\nu}{U^*} \quad (9)$$

Donde:

δ = Espesor de la subcapa laminar.

ν = viscosidad cinemática (m²/s)

U^* = Velocidad de corte.

Se debe introducir una corrección al perfil de velocidad propuesto para tomar en cuenta la zona de transición, dicha corrección “X” está dada en función del valor de la variable “c”. Dicha relación viene dada en forma gráfica y, a efectos de su incorporación de forma matemática toma la siguiente forma:

$$X = f(K_s/\delta) \quad (9)A$$

De ahí se aplica la formula propuesta por Einstein en forma logaritmica para la velocidad media de flujo.

$$\frac{V}{U^*} = 5.75 \text{Log} \left(12.27 \frac{R'}{K_S} X \right) \quad (10)$$

Donde:

V= Velocidad media de flujo.

U*= Velocidad de corte

R' = Radio hidráulico debido al componente de partículas.

X = f(Ks/δ). Este viene dado en forma gráfica.

A partir de las variables sedimentológicas se calcula el valor “Ψ’”, dado por la siguiente relación:

$$\Psi' = \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \left(\frac{d_{35}}{R' \cdot S} \right) \quad (11)$$

Donde:

R' = Radio hidráulico debido a las partículas.

S = Pendiente del lecho.

d35 = Diametro caracteristico para las partículas de sedimento, corresponde al 35 % del material de la muestra que es mas fino en peso.

Observe el lector, que el diámetro característico para la función de movilidad “Ψ’”, es el d35 y que esta función está relacionado con los elementos relacionados a la resistencia de partícula.

Con dicho valor se evalúa el parámetro V/U*’, donde U*’, es el componente de la velocidad de corte debida a las formas de lecho. Dicha relación viene dada en forma gráfica, y de ahí se estima el valor de la velocidad de corte debida a las formas de lecho (U*’). Su forma relacional por lo tanto es la siguiente:

$$\frac{V}{U^{*'}} = f(\Psi') \quad (11)A$$

Con este procedimiento, que debe reproducir el caudal líquido, se evalúan los parametros y variables hidráulicas y sedimentológicas (sobretudo la relación de movilidad) necesarias para evaluar el transporte de fondo.

5.3.6.1. EVALUACION DE LA CARGA DE FONDO.-

Una vez obtenidos los parámetros hidro-sedimentológicos, se requiere computar el diámetro característico, en base al siguiente procedimiento:

Se evalúa Ψ' , para el diámetro medio de la muestra o de la fracción escogida para evaluar la carga de fondo, es decir:

$$\Psi' = \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \left(\frac{dm}{R' * S} \right) \quad (12)$$

Se evalúan los siguientes parámetros, para caracterizar el diámetro de la muestra o fracción:

$$\Delta = \frac{K_s}{x} \quad (13)$$

Donde: K_s es el diámetro d_{65} .

x es la corrección a la velocidad para la región del flujo, el cual es diferente del valor de "X", que es aplicable a la relación de velocidad.

Con el valor del espesor de la subcapa laminar dado por (9), se halla la relación; " Δ/δ ", y se procede como sigue para determinar el diámetro característico "X":

- Si $\Delta/\delta > 1,8$; $X = 0,77\Delta$
- Si $\Delta/\delta \leq 1,8$; $X = 1,39\delta$

Se halla el factor de ocultamiento "hiding factor", en función de ds/X , el cual está dado en forma gráfica

$$\xi = f\left(\frac{ds}{X}\right) \quad (14)$$

Y además debe aplicarse un corrector para la presión, que también es dado en forma gráfica y tiene la forma:

$$Y = f\left(\frac{K_s}{\delta}\right) \quad (15)$$

Proyecto de Investigación
Informe Final

Una vez que se han determinado las correcciones por ocultamiento entre las partículas y la de presión se evalúa el parámetro βx y β , dados por:

$$\beta x = \log \left(10,6 \frac{x}{\Delta} \right) \quad (16)$$

$$\beta = \log(10,6) \quad (17)$$

Y se halla la relación:

$$\left[\frac{\beta}{\beta x} \right]^2 \quad (18)$$

Finalmente se computa la intensidad de corte, para los granos individuales o para la fracción representativa de la muestra, la misma que está dada por la siguiente relación:

$$\psi^* = \xi Y \left[\frac{\beta}{\beta x} \right]^2 \psi \quad (19)$$

Donde: ψ es el valor calculado de intensidad de corte con la relación (12), para el diámetro de la fracción.

Finalmente, en función de la intensidad de corte " ψ^* ", se calcula el valor de la función de transporte de sedimentos " Φ^* ", cuyos valores de mejor ajuste se presentan en las siguientes ecuaciones. Estas han sido evaluadas por el autor del presente trabajo a partir de las gráficas que presenta en la metodología original.

Para;

$$0.075 < \psi^* < 4.5; \quad \phi^* = 6,337 \psi^{*-1.132} \quad (19 A)$$

$$4.5 < \psi^* < 17; \quad \phi^* = 221,66 \psi^{*-3.57} \quad (19 B)$$

$$17 < \psi^* < 35; \quad \phi^* = 8,217 * 10^5 \psi^{*-6.66} \quad (19 C)$$

Y, finalmente, dado que la fracción iB , tendrá una descarga qB , se tiene que la descarga de fondo esta dada por:

$$iBqB = \Phi^* * ib * \frac{Y^S}{g} * g^{3/2} * ds^{3/2} * (Ss - 1)^{1/2} \quad (20)$$

Donde:

l_b = es la fracción de la carga del lecho para el diámetro dado.

d_s = diámetro dado que es evaluado. (medio de la fracción o medio de la muestra)

S_s = gravedad específica de los sedimentos (2.65)

γ_s = Peso específico de los sedimentos $2,599 \cdot 10^4 \text{ N/m}^3$.

5.3.7. RELACION DE EINSTEIN-BROWN.

La relación aquí presentada es la correspondiente a Brown (1950), el cuál modificó la fórmula propuesta por Einstein (1948). Esta viene dada en la forma:

$$\phi = f(1/\psi) \quad (21)$$

Donde:

$$\phi = \frac{qbv}{\gamma_s K \sqrt{g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) D_s^3}} \quad (22)$$

$$\frac{1}{\psi} = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) D_s} \quad (23)$$

$$K = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36 v^2}{g D_s^3 \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}} - \sqrt{\frac{36 v^2}{g D_s^3 \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}} \quad (24)$$

qbv = Descarga volumétrica por unidad de tiempo.

K = Parámetro comparable con la fórmula de Rubey para la velocidad terminal de partículas y definida por (11).

$D_s =$ Tamaño representativo de las partículas, en este caso es igual al D50.

La aplicabilidad de ésta fué establecida usando los datos de laboratorio de Gilbert (1914) y de Meyer-Meter y Muller (1948) y en su versión final la función $f(1/\Psi)$ toma una forma tal que la relación (21) queda:

$$\varphi = 40 (1/\Psi)^3, \text{ para } \Psi \leq 5.5 \quad (25)$$

$$\text{y, } 0.465 \varphi = e^{-0.391\Psi}, \text{ para } \Psi > 5.5 \quad (26)$$

5.3.8. FORMULA DE PARKER. (1982-90).

Esta está desarrollada para corrientes aluviales con lechos formados por gravas ó materiales gravosos. Ha sido comparada con datos de campo en los rangos de diámetros de 0.60 mm. hasta 102.0 mm.

Está basada en los siguientes parámetros adimensionales:

- a).- Parámetro adimensional de carga del lecho para fracción "i", (W^*i):

$$W^*i = \frac{\Delta q_{bi}}{f_i (ghS)^{1/2} hS} \quad (27)$$

Donde:

- $f_i =$ Contenido en fracción por volúmen de la clase "i" de la sub-base.
 $q_{bi} =$ Descarga volumétrica por unidad de ancho de la fracción "i". (m^2/s)
 $d_i =$ Diámetro representativo de la clase "i".

- b).- Tensión de corte adimensional (φ_i) relacionada a un valor de referencia τ_{ri}^* :

$$\phi_i = \frac{h S}{\Delta d_i \tau i^*} \quad (28)$$

El valor de τi^* para el D50 fué determinado y se estableció su valor en 0.0876 basado en datos para otros tamaños; así de forma general se tiene:

$$\tau i^* = 0.0876 \quad (29)$$

Finalmente, basado en el hecho de que cuando la condición crítica para poner en movimiento y sobrepasar las partículas de la región superior (pavement) es excedida, prácticamente todos los tamaños tienen la misma movilidad. De tal manera que uno solo puede utilizarse para caracterizar la descarga de fondo. Este es el D50 correspondiente a la capa que está justo por debajo de la superior (sub-pavement), como función del parámetro adimensional de la tensión de corte. Así obtiene la siguiente versión (1982) para la descarga total de la carga de fondo en función del D50, que luego fué reformulada en 1990:

$$W^* = 0.0025 \exp(14.2(\phi 50 - 1) - 9.28(\phi 50 - 1)^2) \quad (30)$$

Para: $1 \leq \phi 50 \leq 1.59$

$$W^* = 13.68 \left(1 - \frac{0.853}{\phi 50} \right) \quad (31)$$

Para: $\phi 50 > 1.59$

$$W^* = 0.0025 \phi 50^{14.2} \quad (32)$$

Para: $\phi 50 < 1$

Donde:

$\phi 50$ = Es el parámetro adimensional definido por ecuación (28) basado en el D50 de la zona que se encuentra por debajo de la región superior.

W^* = Parámetro adimensional de carga total del lecho.

$$W^* = \frac{\Delta qbt}{(gh S)^{1/2} h S}, \quad y, \quad qbt = \sum qbi \quad (32)A$$

Cuando se dispongan de datos de la superficie, la siguiente relación es propuesta por Parker en 1990:

$$W_{si}^* = \frac{\Delta g q_{bi}}{(\Delta S g)^{3/2} F_i} \quad (33)$$

Donde:

F_i = Fracción en volumen del rango "i" de la superficie.

W_{si}^* = Parámetro adimensional basado en datos de la superficie.

Finalmente, propone la siguiente relación, para el caso de **composición superficial arbitraria**:

$$W_{si}^* = 0.00218 G(w \cdot \phi_{sgo} \cdot go(\delta_i)) \quad (34)$$

Donde:

G = significa función de....

D_i = Media Geométrica de gránulos de la clase "i".

$go(\delta_i)$ es un parámetro que denota la función de cobijamiento reducida para material de la superficie.

$$go(\delta_i) = \delta_i^{-\beta} \quad ; \quad \delta_i = \frac{D_i}{D_{sg}} \\ \beta = 0.0951 \quad ; \quad \ln D_{sg} = \sum F_i \cdot \ln D_i \quad (34)A$$

D_{sg} Denota el tamaño dado por la media geométrica del material de la capa superficial.

ϕ_{sgo} = Es la tensión de corte adimensional normalizada y definida por.

$$\phi_{sgo} = \frac{\tau_{sg}^*}{0.0386} \quad ; \quad \tau_{sg}^* = \frac{\tau}{\rho \Delta g D_{sg}} \quad (34)B$$

w = parámetro de "elongación" dado por:

$$w = 1 + \frac{\sigma_g}{\sigma_{go}}(w_0 - 1) \quad (34)C$$

σ_g denota la desviación estandar del material de la superficie en la escala Pi y se expresa por:

$$\sigma_g^2 = \sum \left[\frac{\ln(D_i/D_{sg})}{\ln 2} \right]^2 F_i \quad (34)D$$

$$w_o = w_o(\phi_{sgo}) \quad : \quad \phi_{sgo} < 4.5$$

$$g_o = g_o(\phi_{sgo}) \quad ; \quad \phi_{sgo} < 4.5 \quad (34)E$$

Estas relaciones funcionales estan dadas en forma gráfica por su autor y se encuentran en la referencia de origen.

$$w_o = 0.453 \quad : \quad \phi_{sgo} \geq 4.5$$

$$g_o = 1.501 \quad ; \quad \phi_{sgo} \geq 4.5 \quad (34)F$$

Así, las expresiones para el transporte total de carga del lecho són:

$$W_s^* = 0.00218 \sum G (w \cdot \phi_{sgo} \cdot g_o(\delta_i)) F_i \quad (35)$$

Donde:

$$W_s^* = \frac{\Delta q b T}{(gh S)^{1/2} h S}$$

Para el caso de **material uniforme** de tamaño D, resulta la siguiente relación:

$$q^* = 0.00218 (T^*)^{3/2} G (T^*/0.0386) \quad (36)$$

Donde:

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{\Delta g D \cdot D}} \quad ; \quad T^* = \frac{\tau}{\rho \Delta g D}$$

q = Transporte de sedimento volumétrico por unidad de ancho.

Esta última ha sido comparada con datos que cubren tamaños de 0.5 mm (arenas) y gravas de 28.6 mm., y ha sido comparada con las fórmulas de Meyer-Peter y Muller y Einstein, donde se ha comprobado que da buenos resultados.

Las relaciones (35) y (36) se asisten de las siguientes relaciones:

$$G(\phi) = \begin{cases} 5474 \left(1 - \frac{0.853}{\phi} \right)^{4.5} & ; \phi > 1.59 \\ \exp(14.2(\phi - 1) - 9.28(\phi - 1)^2) & ; 1 \leq \phi \leq 1.59 \\ \phi^{14.2} & ; \phi < 1 \end{cases} \quad (37)$$

Finalmente, es de hacer notar que la exclusión de partículas de arena y finos es necesaria para la aplicación de estas relaciones.

5.3.9. FORMULA DE GARCIA GUTIERREZ.-

Esta relación, desarrollada por el autor del presente trabajo, siguiendo la teoría desarrollada (3) que describe el movimiento de partículas bajo principios dinámicos, está dada por la siguiente relación:

$$i_b = \frac{\tau_o(1 + \mu r) - \tau_c}{\mu} \left[cU * \left(1 - \left(\frac{\tau_c^*}{\tau^*} \right)^{1/2} \right) \right] \quad (38)$$

Donde:

- i_b = Cantidad de sedimentos en peso sumergido que pasan por unidad de ancho de la sección. [Kg/m.s].
- τ^* = Tensión de corte adimensional.
- τ^*c = Tensión de corte crítica adimensional. Definida por (11).
- τ_o = Esfuerzo de corte que ejerce el fluido sobre el área del lecho.

- τ_c = Esfuerzo de corte crítico que ejerce el fluido sobre el área del lecho, y que es el necesario para el inicio del movimiento de las partículas.
- c = $(U_{bs}/U^*)^2$, valor adimensional que relaciona la velocidad del flujo a nivel del lecho y el valor de la velocidad de corte.
- r = Coeficiente que relaciona los coeficientes de arrastre (C_d) y de sustentación (C_l).
- μ = Coeficiente de fricción dinámico de Coulomb. Generalmente se determina experimentalmente. Este depende de las propiedades de las partículas y de su movimiento, y del fluido en el cual se desplazan.

5.4.- METODOS PARA LA CUANTIFICACION DE LOS PROCESOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS MEDIANTE EL MECANISMO DE SUSPENSION.

5.4.1.- GENERALIDADES DE LA TEORIA DE DIFUSION TURBULENTA.-

Una parte del transporte total de sedimentos en cauces fluviales es llevada por el flujo en suspensión. El campo gravitacional siempre conlleva a que las partículas de forma constante tiendan a caer hacia el lecho del cauce, pero al mismo tiempo este es continuamente balanceado por los componentes turbulentos de la velocidad en dirección hacia arriba.

Las teorías desarrolladas en el pasado, no están de acuerdo con la visión y entendimiento modernos de la dinámica de fluidos. Se han desarrollado muchas teorías relacionadas a los sedimentos en suspensión y, en este estudio, no se pretende presentar el desarrollo histórico que ha llevado a la situación actual.

A efectos prácticos, prácticamente existen dos tendencias teóricas aplicables a los sedimentos en suspensión bajo condiciones de equilibrio, estas son:

- La Teoría de la difusión turbulenta.
- Teorías de energía.

En el presente trabajo, y para dar una mejor idea al lector, la primera será explicada toda vez que las predicciones a que esta teoría lleva están más de acuerdo a los resultados observados, tanto en sistemas naturales como en experimentos de laboratorio.

Este proceso equilibra dos componentes;

- La tasa de transporte debida a difusión turbulenta en dirección hacia arriba.
- El movimiento hacia abajo causado por la fuerza de gravedad.

La evaluación del proceso de difusión turbulenta en dirección hacia arriba, está basada en la distribución turbulenta de la velocidad, la misma que está compuesta por la velocidad media y las fluctuaciones verticales turbulentas. Estas fluctuaciones verticales turbulentas varían continuamente tanto en magnitud como en dirección. Si se toma una superficie paralela al lecho y ubicada a una cierta distancia del mismo; la suposición básica es que si no hay flujo neto en cualquiera de las direcciones, el valor medio de las fluctuaciones verticales de la velocidad será cero, o en otras palabras, el volumen neto de flujo que atraviesa dicha superficie plana paralela al lecho a una cierta distancia del mismo en las direcciones positivas y negativas deben ser iguales, esto implica, por otra parte, que la concentración por encima de la superficie considerada será menor que aquella por debajo de la misma. Por lo tanto, aunque no hay flujo neto a través de dicha área, habrá un flujo neto de sedimento en la dirección hacia arriba, debido a la diferencia en la concentración de los sedimentos.

De esa manera se puede evaluar la cantidad de sedimentos por unidad de tiempo y area en función de dos elementos; una viscosidad cinemática de remolino (comparable con la viscosidad molecular) que depende de la densidad, velocidad y el tamaño de los remolinos, y la segunda es la concentración de sedimentos.

En un espacio bi.-dimensional, y bajo condiciones de equilibrio este movimiento hacia arriba de sedimentos debido al proceso descrito de difusión turbulenta debe ser balanceado por el componente hacia abajo del movimiento causado por la fuerza de gravedad, y este último es función de la velocidad de asentamiento de las partículas que están en suspensión.

5.4.2.- DESCARGA DE SEDIMENTOS EN SUSPENSION.

Si se tiene a disposición la variación en la vertical (profundidad de flujo) de la componente de la viscosidad cinemática de remolino, se puede establecer una relación de la distribución relativa de la concentración de sedimentos en un campo bi-dimensional, la misma que, después de efectuar el proceso, está dada por:

$$\frac{c}{Ca} = \left[\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right]^z \quad (39)$$

Donde:

C = Concentración de sedimentos en el nivel “y” por encima del lecho.

Ca = Concentración de referencia a nivel “a” por encima del lecho.

z = $Ws/\kappa U^*$. No. de Rouse.

Ws = Velocidad terminal de la partícula.

κ = Constante de Von Karman (0.4)

U^* = Velocidad de corte.

h = Profundidad local del flujo.

ε = Coef. promedio de viscosidad de remolino.

y = Altura medida desde el nivel de referencia del lecho (a).

a = Nivel de referencia por encima del lecho.

En la forma que se presenta la ecuación (39) fue presentada por Hunter Rouse. Sin embargo, hoy en día existen muchas expresiones para la distribución de concentraciones relativa de sedimentos en suspensión, desarrolladas por varios investigadores.

Lo rescatable de la expresión (39) es que al incrementar el coeficiente “z” las concentraciones tienden a ser mayores en el lecho y menores en la superficie, y de manera conversiva, para valores menores a la unidad de “z”, al disminuir dicho valor las concentraciones en la superficie tienden a ser mayores que en el lecho. Se supone que cuando se habla de lecho, se está hablando al nivel de la referencia “a” por encima del lecho activo.

Para evaluar la descarga de sedimentos en suspensión exclusivamente, los volúmenes parciales de agua y de sedimento que atraviesan unidades de área de ancho unitario y de altura “dy”, deben sumarse. Es decir que en otras palabras, la descarga unitaria de sedimentos en suspensión está dada por:

$$qs = \int_a^h c(y)v(y)dy \quad (40)$$

Donde:

- $C(y)$ es la distribución de la concentración en la vertical dada por la relación (39).
- $V(y)$ es la distribución de velocidad en la vertical. Esta depende del autor, pero generalmente se asume un perfil de tipo logarítmico.

Aún al sustituir los valores de la distribución de la concentración y de la velocidad, la integral es bastante complicada y no puede evaluarse al menos que se tenga información cuantitativa acerca de la concentración de referencia “ C_a ”, o medios para estimarla.

Varios métodos han sido propuestos, y el que se desarrollará es el debido a Hans A. Einstein (hijo), que desarrolló, una metodología para evaluar la descarga de sedimentos en suspensión, de manera similar a la presentada para la descarga de sedimentos de fondo establecida en 6.3.6.

5.4.3. PROCEDIMIENTO DE EINSTEIN

Como quiera que uno de los procedimientos más utilizados, por su carácter, es aquél introducido por H.A.Einstein (hijo), el mismo se detallará a continuación.

Lo que se requiere es tener a disposición lo siguiente:

- La distribución de la concentración en la vertical
- y la distribución de velocidad en la vertical.

Para la distribución de la concentración relativa, con la salvedad explicada en lo que hace a la concentración de referencia a nivel del lecho “ C_a ”, Einstein propone el uso de la relación (39), pero la velocidad de corte (U^*), es reemplazada por la velocidad de corte debida a la rugosidad de grano o partícula ($U^{*'}), dada por:$

$$U^{*' = (g R' S)^{1/2} \quad (41)$$

Donde:

R' = Es el radio hidráulico correspondiente al lecho.

S = Pendiente del lecho.

De esa manera el coeficiente o, mejor dicho el exponente “ z ”, que da forma a la distribución de la concentración queda de la siguiente forma:

$$z = Ws/\kappa U^{*'} \quad (42).$$

Por otro lado, y de manera similar que para evaluar el transporte de fondo, Einstein toma el perfil de velocidad logarítmico, dado por la siguiente relación – observe el lector que la velocidad de corte a su vez, es reemplazada por la velocidad de corte a la rugosidad de grano o partícula ($U^{*'}$):

$$\frac{U(y)}{U^{*'}} = 5.75 \log \left(30.2 \frac{y}{K_s} X \right) \quad (41)$$

La relación funcional (9)A, que da el valor de corrección “X” que se aplica a la distribución de velocidad para incluir los efectos de la zona de flujo, se debe introducir en la relación (41).

Introduciendo las ecuaciones (39) y (41) en la relación (40), esta última queda en la siguiente forma:

$$qs = \int_a^h Ca \left[\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right]^z 5.75 U^{*' } \log \left(30.2 \frac{y}{K_s} X \right) dy \quad (42)$$

En dicha relación “qs”, representa la carga en suspensión en peso por unidad de tiempo y ancho. Ca es la concentración de referencia al nivel “a” sobre el lecho y K_s es diámetro de rugosidad.

Para facilitar la integración, se efectuó es siguiente cambio de variables:

$$Ae = \frac{a}{h}, \quad (43)A$$

$$y' = \frac{y}{h} \quad (43)B$$

Con dicho cambio de variable la relación (42) queda en la forma

$$qs = \int_{Ae}^1 C v dy' \quad (44)$$

Efectuando operaciones esta finalmente queda en la forma:

$$qs = 5.75 Ca U^{*' } h \left[\frac{Ae}{1-Ae} \right]^z \left[\log \left(30.2 \frac{y}{K_s} X \right) \int_{Ae}^1 \left[\frac{1-y'}{y'} \right]^z dy + 0.434 \int_{Ae}^1 \left[\frac{1-y'}{y'} \right]^z \ln y' dy \right] \quad (45)$$

La integración en forma cerrada es imposible, por lo que Einstein transformó la ecuación (45) a una forma mas adecuada y amena para la integración numérica, dando como resultado la siguiente expresión:

$$qs = 5.75 U^{*'} Ca h \left[2.303 \log \left[\frac{30.2h}{Ks} X \right] I_1 + I_2 \right] \quad (46)$$

Donde:

$$I_1 = 0.216 \frac{A_e^{(z-1)}}{(1-A_e)^z} \int_{A_e}^1 \left[\frac{1-y}{y} \right]^z dy \quad (47)$$

$$I_2 = 0.216 \frac{A_e^{(z-1)}}{(1-A_e)^z} \int_{A_e}^1 \left[\frac{1-y}{y} \right]^z \ln y dy \quad (48)$$

Los resultados de la integración numérica de las funciones I1 e I2, de la manera que las presentó Einstein, han estado en forma gráfica para valores de "Ae" y "z".

Einstein también asumió que el espesor de la capa del lecho que provee todo el material que entra en suspensión es $a=2ds$, donde ds es el diámetro representativo del material del lecho. Dentro de esta capa el proceso de suspensión no es posible.

5.4.4. ENGELUND – HANSEN

Esta es una relación que desde su aparición se ha convertido en popular, tanto por su simplicidad, como por los resultados de la misma aplicados a lechos predominantemente de arenas.

Responde a la siguiente expresión:

$$\frac{qbv}{Ds^{3/2}(g\Delta)} = \frac{0.05}{1-p} \left(\frac{\Delta Ds}{\left(\frac{C^2}{g} \right)^{2/5} h J} \right)^{-5/2} \quad (49)$$

Proyecto de Investigación
Informe Final

Donde:

p = Porosidad del material.

C = Coeficiente de Chezy.

$\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$

$D_s = d_{50}$.

Esta relación ha dado bastante buenos resultados para cauces aluviales de arena fina.

La versión de la ecuación (49) adaptada para efectos de pendiente longitudinal, como la describe Struiksma et al. es:

$$q_{bv} = \frac{0.05}{1-p} \sqrt{D_s^3 g \Delta} \left(\frac{h J}{\Delta D_s} \right)^{5/2} \left(1 - \varepsilon \frac{\partial \ell}{\partial s} \right) \quad (50)$$

Donde:

ε = un coeficiente dado por (51).

$\partial \ell / \partial s$ = pendiente longitudinal.

El valor de ε es equivalente a la expresión dada por Yen (1990) en la forma:

$$\varepsilon = \frac{2 g \Delta D_s}{3 \alpha \lambda U_*'^2} \quad (51)$$

Donde:

α = Factor de forma = 1.27

λ = Coeficiente de cobijamiento = 2/3.

Se encuentra que ésta da buenos resultados en ríos de arena fina con sustancial transporte en suspensión. Originalmente fué basada en observaciones con tamaños mayores a 0.19mm.

6.- APLICACIÓN AL CASO DE RIO GRANDE.-

6.1.- Transporte de fondo.-

Las metodologías que de forma comparativa se han utilizado para el caso de Rio Grande son las siguientes:

- Duboys (1879)
- Shields (1936)
- Meyer-Peter-Muller (1948)
- Einstein – Brown (1950)
- Ashida-Michiue (2002)
- Garcia Gutierrez (2008)

Se han efectuado los cálculos, además con el fin de comparara la Ecuación de García-Gutierrez. Para comparar la bondad de la ecuación descrita, se la ha comparado con las siguientes ecuaciones y metodologías; Duboys (1879), Shields (1936), Meyer-Peter Muller (1948), Einstein-Brown (1942-1950), y Ashida y Michiue (1970).

Para efectuar el estudio comparativo se utilizaron datos de carácter hidráulico y de sedimentos de la estación de Abapó en el Rio Grande en Santa Cruz – Bolivia, evaluados por el autor del presente trabajo, los mismos que se presentan en el Cuadro No 3.

| MUESTRA No | FLUJO MEDIO DIARIO (M ³ /S) | Caudal por unidad de ancho – qw (m ² /s) | Ancho de flujo B (m) | Diámetro mediano partículas d50 (mm) | Pendiente de energía. S (m/m) |
|------------|--|---|----------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| 2009 | 201 | 2.052 | 97.83 | 0.151 | 0.000480 |
| 2 | 505 | 3.881 | 130.28 | 0.194 | 0.000810 |
| 3 | 760 | 5.144 | 147.94 | 0.165 | 0.001022 |
| 1 | 830 | 5.466 | 152.05 | 0.249 | 0.001074 |
| 7 | 1300 | 7.448 | 174.82 | 0.214 | 0.001053 |
| 5 | 1450 | 8.015 | 180.86 | 0.244 | 0.001105 |
| 14 | 1460 | 8.052 | 181.25 | 0.213 | 0.001108 |
| 10 | 1650 | 8.756 | 188.28 | 0.203 | 0.001170 |
| 8 | 1740 | 9.104 | 191.41 | 0.206 | 0.001198 |
| 13 | 1760 | 9.170 | 192.09 | 0.138 | 0.001204 |
| 12 | 2020 | 10.071 | 200.50 | 0.187 | 0.001280 |
| 6 | 2050 | 10.186 | 201.42 | 0.163 | 0.001288 |
| 4 | 2070 | 10.252 | 202.03 | 0.165 | 0.001294 |
| 9 | 2450 | 11.505 | 212.91 | 0.217 | 0.001394 |
| 11 | 4110 | 18.035 | 228.00 | 0.234 | 0.001754 |

Cuadro No 3.- Datos Hidráulicos y característica de sedimentos del lecho de la Estación Abapó.- Fuente Francisco Garcia Gutierrez.

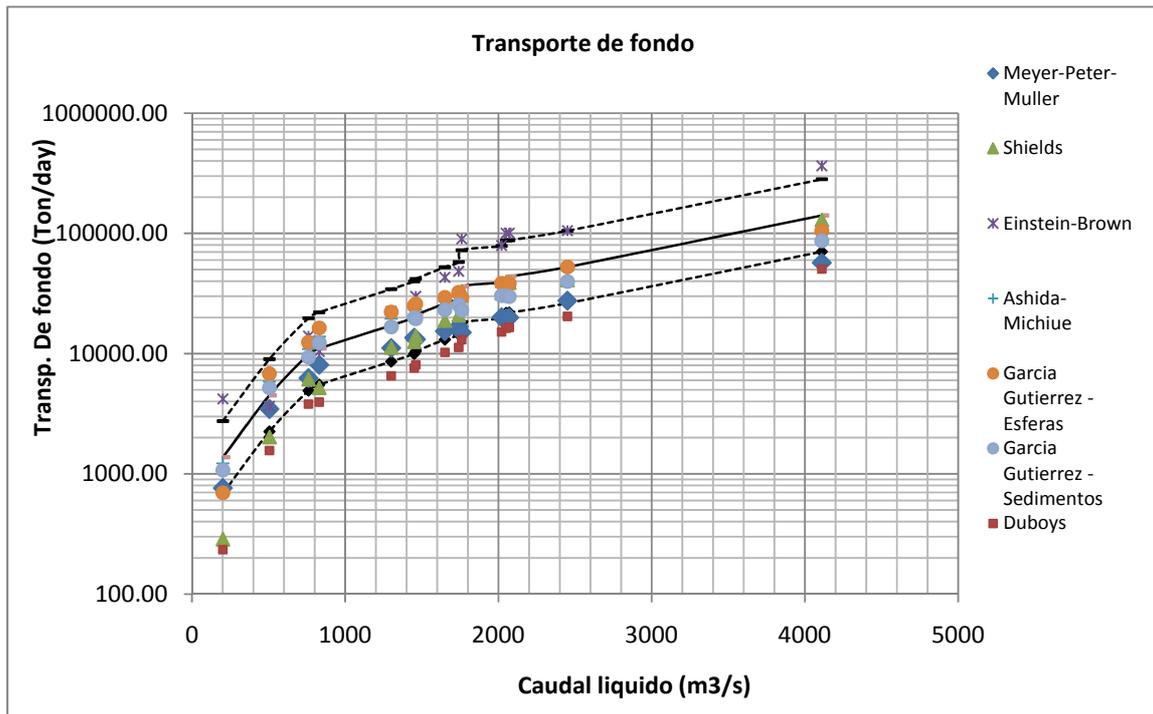
Los resultados numéricos de la aplicación de las diversas metodologías se muestran en el Cuadro No.4, en los cuales –y para poder apreciar mejor los resultados- se tiene la cantidad de sedimentos por unidad de tiempo en Toneladas métricas/día (Ton/día).

Los resultados también se presentan en la Gráfica No. 1, donde puede apreciarse, que todas las metodologías –incluyendo las del autor- siguen la misma tendencia.

| MUESTRA No | FLUJO MEDIO DIARIO (M ³ /S) | TRANSPORTE DE FONDO EN TON/DIA | | | | | | |
|------------|--|--------------------------------|----------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|---|
| | | DUBOYS (1879) | SHIELDS (1930) | Meyer-Peter-Muller (1948) | Einstein-Brown (1950) | Ashida & Michiue (1970) | Garcia Gutierrez - ESFERAS | Garcia Gutierrez - SEDIMENTOS NATURALES |
| 2009 | 201 | 233.68 | 286.24 | 762.82 | 4202.50 | 1220.82 | 695.05 | 1072.73 |
| 2 | 505 | 1562.94 | 2026.58 | 3465.36 | 3648.81 | 5854.97 | 6808.34 | 5182.92 |
| 3 | 760 | 3798.31 | 6124.26 | 6268.84 | 14016.78 | 10928.40 | 12409.41 | 9334.01 |
| 1 | 830 | 3957.52 | 5200.73 | 8075.87 | 10435.39 | 13840.97 | 16330.47 | 12310.19 |
| 7 | 1300 | 6533.59 | 11245.35 | 11142.09 | 22378.79 | 19496.73 | 22203.21 | 16659.41 |
| 5 | 1450 | 7607.20 | 12539.48 | 13586.35 | 24976.49 | 23551.13 | 24971.82 | 19931.69 |
| 14 | 1460 | 8072.74 | 13985.76 | 13141.72 | 29951.91 | 23057.23 | 25867.39 | 19497.43 |
| 10 | 1650 | 10236.06 | 18850.50 | 15389.54 | 43077.01 | 27228.63 | 29371.95 | 23121.70 |
| 8 | 1740 | 11240.63 | 20915.10 | 16794.23 | 48378.10 | 29576.73 | 32403.84 | 25459.41 |
| 13 | 1760 | 13047.03 | 33154.42 | 15019.83 | 89784.46 | 27072.46 | 29210.39 | 22978.87 |
| 12 | 2020 | 15146.38 | 31879.89 | 20086.79 | 79204.97 | 35756.28 | 38450.22 | 30326.54 |
| 6 | 2050 | 16270.52 | 38757.84 | 19662.97 | 100141.89 | 35229.59 | 37628.41 | 30234.64 |
| 4 | 2070 | 16491.58 | 38882.90 | 19928.31 | 100705.53 | 35858.26 | 38212.39 | 29795.42 |
| 9 | 2450 | 20423.10 | 41023.42 | 27580.25 | 105390.26 | 49128.35 | 52553.53 | 39751.94 |
| 11 | 4110 | 50472.14 | 129503.57 | 57021.06 | 364198.76 | 103789.98 | 104555.72 | 86620.61 |

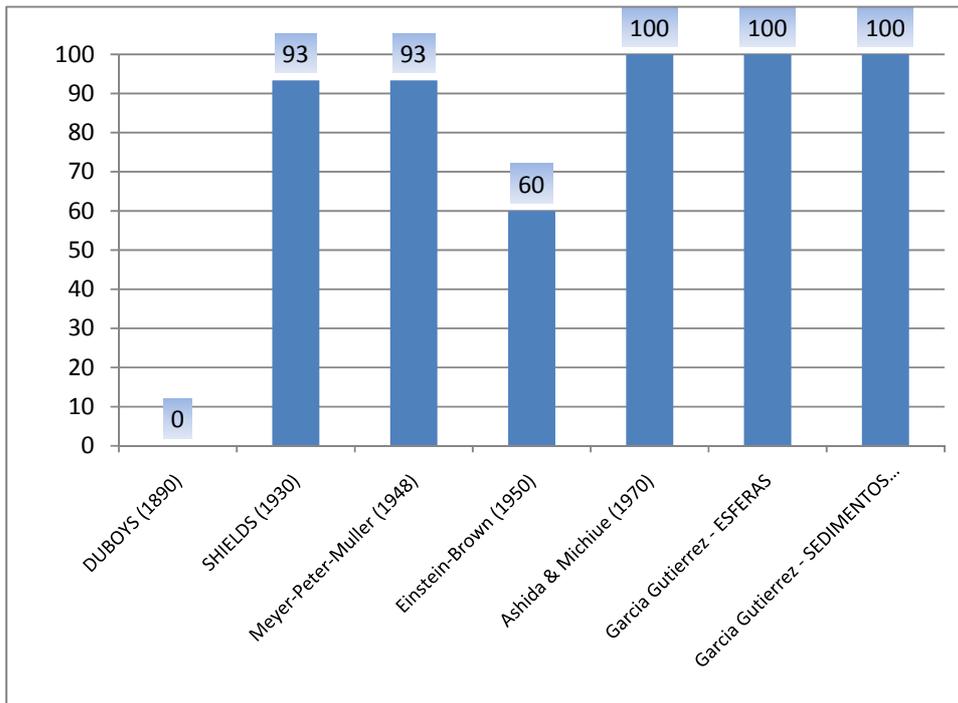
Cuadro No 4.- Resultados de aplicación de ecuaciones de Transporte de carga de fondo a la Estación Abapó.- Rio Grande – Santa Cruz – Bolivia.
Fuente: Francisco Garcia Gutierrez.

Para poder tener una idea comparativa mas real de la actuación y bondad de las metodologías estudiadas, se procedió a obtener el valor medio de todas ellas con excepción de los resultados obtenidos por la metodología de García-Gutiérrez – cuyos resultados son los que se quieren verificar - (línea continua en la gráfica No 1) y, a fines de poder comparar la bondad de ajuste de las relaciones del autor, se seleccionaron aquellos datos que se encuentren a “+/- ½” de la desviación con relación a la media obtenida (trazo discontinuo en la gráfica 1). Este tipo de comparación es práctica común en estudios comparativos como el que se presenta



Grafica 1.- Resultados de aplicación de formulas de Transporte de carga de fondo para la estación de Abapo – Rio Grande – Santa Cruz –Bolivia.-

El resultado de aquéllos valores que caen dentro del rango indicado en el párrafo anterior en forma de porcentaje con respecto al total, se muestran en la gráfica No. 2, para cada una de las metodologías; y a partir de ellos se puede ver la bondad de los resultados de las metodologías estudiadas y, de forma particular, de las ecuaciones que se presentan en el presente trabajo.



Grafica 2.- Resultados comparativos de aplicación de formulas de Transporte de Fondo – Valores dentro del rango +/- 1/2 de la media - Estación de Abapo – Rio Grande – Santa Cruz –Bolivia.- Fuente: Francisco Garcia Gutierrez.

6.2.- METODOS SELECCIONADOS PARA LA CUANTIFICACION DE LOS PROCESOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS MEDIANTE EL MECANISMO DE SUSPENSION Y CARGA TOTAL. APLICACIÓN AL CASO DE RIO GRANDE.

De las teorías presentadas se han seleccionado las siguientes por ser las que mejor se ajustan a los procesos reales

.

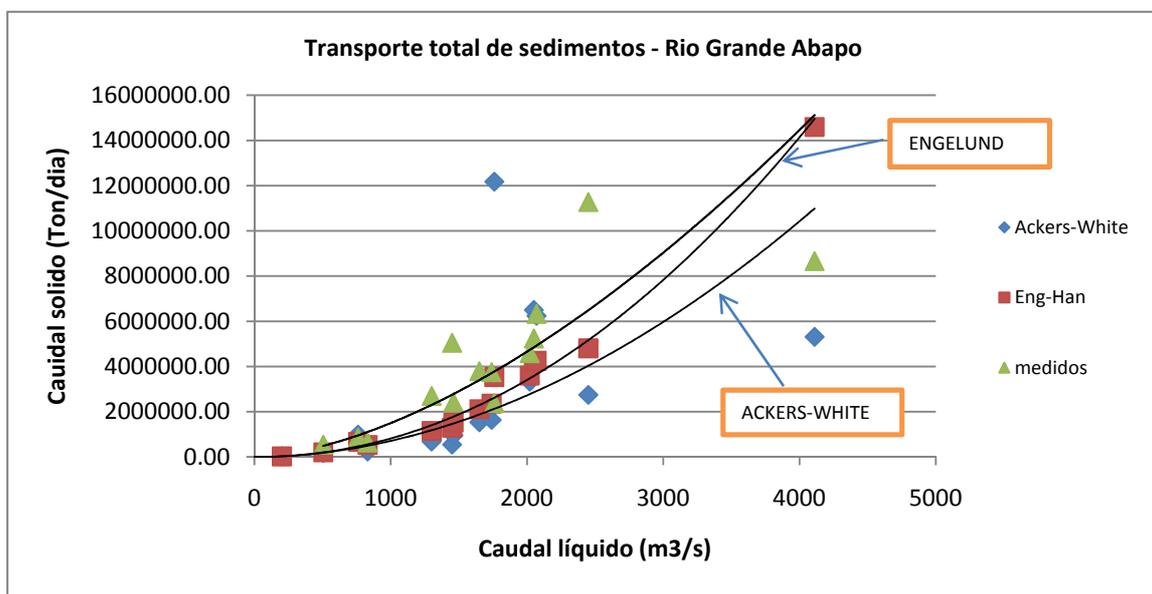
- Ackers-White.

- Engelund Hansen.

En la siguiente gráfica se muestra el resultado de ambos métodos y las líneas de mejor ajuste a las mismas. Por otro lado se ha incluido en la gráfica como “datos medidos” aquéllos correspondientes a las concentraciones medias diarias de superficie de las 14 muestras en las unidades respectivas, con fines comparativos. Se puede observar que los valores medidos y de ambas metodologías son

comparables y tienen factores de relación en promedio de 2.6 para Ackers y de 1.7 para Engelund. Esta tendencia comparativa es muy usual en el análisis de Transporte de sedimentos.

De los valores calculados y de las líneas de tendencia se puede concluir que la metodología de Engelund-Hansen (coef. de relación de 0.985), para el caso de los datos analizados se ajustan mejor a los valores medidos (sin ajustar para obtener conc. media en la vertical). Esta ecuación, por lo tanto puede ser de utilizada para evaluar la carga total en rangos que se encuentren fuera de los establecidos por los rangos de caudales de las 15 muestras analizadas.



Gráfica 3. Relaciones de transporte total – Rio Grande – Abapo.
Fuente: Francisco Garcia Gutierrez.

8.- CONCLUSIONES.-

En el presente trabajo se han desarrollado herramientas útiles, y alternativas, para evaluar el transporte de sedimentos en cauces fluviales, tomando en cuenta los mecanismos de transporte de material del lecho.

Hay que hacer notar que, no existe “el metodo” aplicable a cada cauce fluvial, como se ha podido apreciar en los apartados 6.1 y 6.2, y que necesariamente –

cuando no se tengan mediciones fiables- se deben utilizar varias metodologías para obtener la sensibilidad del problema.

Finalmente, recalcar que lo mas importante no es el “programa de computacion en si”, sino la sensibilidad y experiencia del modelador.

9.- REFERENCIAS

1. GARCIA GUTIERREZ, Francisco Pablo & FERNANDEZ BONO, Juan Francisco.
“AN ALTERNATIVE METHOD TO ESTIMATE THE STABLE TRANSVERSE BED SLOPE IN CURVED ALLUVIAL CHANNELS” – THE GARCIA-GUTIERREZ EQUATION”
Proc. XXIV Congress “International Association for Hydraulic Research”, IAHR.
Palacio de los Congresos - Madrid – España. 1991.
2. GARCIA GUTIERREZ, Francisco Pablo.
“ESTUDIO DEL FLUJO LIQUIDO Y MASICO Y SUS INTERACCIONES, PARA ALTOS NUMEROS DE FROUDE, EN CAUCES ABIERTOS NATURALES – ALUVIALES CON MEANDROS. ANALISIS Y MODELACION DE LA EVOLUCION DEL LECHO Y MIGRACION DEL CAUCE.”
TESIS DOCTORAL (CUM LAUDE) como requisito parcial para el título de “Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.”
Depto. de Ing. Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia, España. 1994.
3. GARCIA GUTIERREZ, Francisco Pablo.
“UN MODELO DINÁMICO PARA EL MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS Y SEDIMENTOS EN LECHOS DE CAUCES NATURALES ALUVIALES”. - PONENCIA MAGISTRAL –CUARTO CONGRESO NACIONAL DE ESTUDIANTES DE INGENIERIA CIVIL UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES. Pp. 41. JULIO DEL 2008. LA PAZ - BOLIVIA
4. RAUDKIVI, A.J.
“LOOSE BOUNDARY HYDRAULICS”.
Pergamon Press, Oxford, U.K., 2nd. Ed., 1976.

Proyecto de Investigación
Informe Final

AGRADECIMIENTOS:

El autor agradece a la Dirección de la Carrera de Ingeniería Civil y al Instituto de Investigaciones Tecnológicas de la FCET, por el impulso que dá a temas nuevos e innovadores.