

Transporte de fondo potencial mediante estudio en modelo físico de lecho móvil

Esteban A. Pacheco T., Verónica M. Carrillo S.

Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos LH&DF del Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril, Cuenca, Ecuador, 1010201.

Corresponding author: esteban.pacheco@ucuenca.edu.ec

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2014 - Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2014

RESUMEN

Se predice potenciales tasas de transporte de fondo mediante un estudio experimental en modelo físico de lecho móvil. El estudio fue realizado para el proyecto de generación hidroeléctrica HidroSanBartolo ubicado en el río Negro al sur del Ecuador. Para las condiciones de hidrología fluvial de interés, se establece las tasas teóricas potenciales mediante cinco ecuaciones de transporte de carga de lecho. Se evalúa la respuesta del modelo físico a los procesos de erosión-acreción de acuerdo a las leyes que rigen el equilibrio morfológico de un cauce con un punto de control aguas arriba, y se calibra las tasas teóricas mediante la evaluación de la pendiente del lecho. De acuerdo a los procesos morfodinámicos de control en la modelización, se establece que la ecuación simplificada propuesta por Nielsen, es el método recomendado para el cálculo de tasas de transporte, calibración del modelo físico de lecho móvil y análisis de escenarios para el río de estudio. Los valores de las tasas finalmente obtenidas corresponden al 85% de los valores teóricos calculados por dicha formulación, habiéndose obtenido tasas potenciales para transporte de carga de lecho de 662 kg/s para el caudal formativo de 50 m³/s, y 914 kg/s para el caudal promedio del periodo húmedo de 75 m³/s.

Palabras clave: Transporte de carga de lecho, Modelización hidráulica, Modelo de lecho móvil.

ABSTRACT

Potential bed-load transport rates are determined by an experimental study in a moving-bed physical model. This study was conducted for the HidroSanBartolo hydroelectric project located in Negro river South of Ecuador. Prospective bed-load rates were established with five theoretical equations for the fluvial hydrology conditions of interest. Additionally, according to the governing laws of the morphological equilibrium of a natural channel, the river response to erosion-accretion processes is evaluated through a control point upstream. Also, based on the bed slope, the theoretical rates are calibrated. Considering the control morphodynamic mechanisms, the Nielsen simplified method was established as the recommended scheme to calculate the transport rates, to calibrate the model, and to analyze the scenarios for the river. The final rates obtained represent the 85% percent of the values calculated with this formulation with values of 662 kg/s for the channel forming flow of 50 m³/s and 914 kg/s for the humid season flow of 75 m³/s.

Keywords: Bed load transport, Hydraulic Modelling, Moving-bed physical model.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de los procesos de arrastre de fondo es fundamental para la validación e identificación de los parámetros de diseño y de las condiciones a las cuales está sujeta una obra de aprovechamiento hidráulico en un cauce natural. Los modelos matemáticos establecidos para la predicción del inicio de movimiento de la carga de lecho en un esquema de flujo bidimensional toman en cuenta la variación

vertical de velocidades, el esfuerzo de corte que el agua ejerce en el lecho de un cauce y las propiedades de la partícula que caracteriza el material. La interacción entre la dinámica del flujo y las propiedades del sedimento, bajo la acción de las fuerzas gravitatorias, permite caracterizar los mecanismos del transporte de carga de lecho. La literatura define un perfil logarítmico para la distribución de velocidades en la zona turbulenta (Schlichting, 1979; von Kármán, 1934; Vanoni, 1941; Schetz, 1993), pudiendo aproximarse a una función potencial para el caso de flujo uniforme (Chen, 1990).

Tratándose de flujo uniforme estacionario en canales anchos, el esfuerzo cortante está expresado mediante:

$$\tau_0 = \rho g \gamma_n \text{sen}\theta \quad (1)$$

donde: ρ = la densidad del fluido; g = la aceleración de la gravedad; γ_n = la altura media del flujo; y $\text{sen}\theta$ = la pendiente de lecho.

El esfuerzo cortante del lecho permite definir la velocidad de corte V_* como:

$$V_* = (\tau_0/\rho)^{0.5} \quad (2)$$

Tanto el esfuerzo cortante de lecho como la velocidad de corte, proporcionan una manera directa de caracterizar el potencial del flujo para transportar sedimento. Por otro lado, el tamaño y la forma de las partículas de sedimento condicionan la rugosidad y afectan la distribución de velocidades.

Por lo antes expuesto, y de manera general para suelos granulares, el movimiento de carga de lecho inicia cuando la fuerza efectiva del fluido supera a la resistencia conjunta generada por el peso de la partícula y los efectos friccionantes, siendo posible establecer la condición final como una función del ángulo de reposo de la partícula (Van Rijn, 1993). Cuando el fondo contiene cantidades importantes de arcillas o limos se deberá considerar adicionalmente la influencia de los efectos de cohesión (Van Rijn, 1993; Van Rijn, 2007a; Van Rijn, 2007b).

Para estudiar el transporte de la carga de lecho, de acuerdo a Shields (1936), se destaca el parámetro de estabilidad definido en (3):

$$\tau_* = \tau_0/[\rho(s-1)gd_s] \quad (3)$$

expresión en la cual s = el peso específico relativo de las partículas, y d_s = el diámetro característico de las partículas.

Experimentalmente está establecido (Shields, 1936; Rouse, 1939; Vanoni, 1964), que el movimiento incipiente de la carga de lecho ocurre a partir de un valor crítico τ_{*c} del parámetro de estabilidad. Dicho valor permite definir la condición de movimiento $\tau_* > \tau_{*c}$ como función del número de Reynolds de corte expresado en (4):

$$Re_* = V_* d_s / \nu \quad (4)$$

donde ν es la viscosidad cinemática del agua. De manera particular, para material granular, algunos autores reportan para τ_{*c} valores menores que los indicados originalmente por Shields (1936). Más precisamente se sugiere el valor de 0.046 (Gessler, 1964) para la condición de movimiento cuando $Re_* > 500$ recomendándose dividir por 2 a los valores presentados en el diagrama de Shields-Rouse.

Al momento se dispone en la literatura técnica de varias ecuaciones que interpretan el fenómeno de transporte de carga de lecho en cauces, sin embargo, dichas ecuaciones han sido desarrolladas para condiciones particulares como: escenarios definidos de laboratorio, cauces anchos y de llanura, rangos limitados de pendiente o caudal, entre otras. Así mismo, se reportan (Wohl, 2000) varios estudios comparativos de datos de campo que favorecen diferentes ecuaciones, entre dichos estudios se encuentran (Georgiev, 1990; Gomez & Church, 1989; Bathurst et al., 1987). Las ecuaciones disponibles para calcular el caudal volumétrico unitario de transporte de la carga de lecho q_s pueden clasificarse según el criterio adoptado para que inicie el movimiento. Entre las ecuaciones que contemplan la descarga específica de flujo, como criterio para movimiento incipiente, se encuentra la propuesta por Schoklitsch (1962), que de acuerdo a estudios comparativos realizados con información de ríos de montaña (Georgiev, 1990), predice de manera adecuada las tasas de transporte.

Se han desarrollado un mayor número de expresiones basadas en el esfuerzo cortante del material de lecho. Así por ejemplo se tienen las expresiones propuestas por Einstein en 1942 y 1950 que no contemplan el esfuerzo cortante crítico y consideran una distribución uniforme de partículas en un lecho plano. También pertenece al mismo grupo, la ecuación de Meyer-Peter & Müller (1948), la cual ha sido verificada con datos de ríos de lecho de arena y de grava. Dicha ecuación, tiende a subestimar la tasa de transporte cuando es calculada en base al d_{50} del lecho superficial, o sobrestimar la tasa de transporte si el cálculo se hace en base al d_{50} de la capa subsuperficial del lecho (Carson, 1987). Otros estudios, realizados para este tipo de ecuaciones, reportan efectos notorios en la predicción de tasas de transporte debido al acorazamiento del lecho (Gomez & Church, 1989).

En los últimos años, se han propuesto algunas relaciones para modelar el transporte en función de las características de la capa de carga de lecho y de la velocidad representativa del sedimento de acuerdo a la expresión:

$$q_s = C_s \delta_s V_s \quad (5)$$

donde V_s es la velocidad promedio del flujo de sedimento en la capa de carga de lecho, C_s corresponde a la concentración media de sedimento, y δ_s es la altura de saltación promedio que representa la capa de carga de lecho. De entre dichas fórmulas se destacan el modelo simplificado propuesto por Nielsen (1992) y la formulación propuesta por van Rijn (1984), las cuales proponen expresiones para las relaciones de δ_s/d_s y V_s/V_* en función del esfuerzo cortante, el esfuerzo cortante crítico y la viscosidad del agua.

Todo lo anterior hace que no se disponga de relaciones únicas que permitan establecer tasas de transporte de carga de lecho para las situaciones específicas que presentan los ríos de zonas montañosas. El presente estudio expone el análisis del desempeño de cinco formulaciones que establece la literatura, y la estimación de la tasa potencial de transporte mediante la simulación de los procesos y aspectos de orden morfológico en un modelo físico de escala reducida de lecho móvil.

2. MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

El proyecto hidroeléctrico HidroSanBartolo está ubicado en el río Negro, al sur del Ecuador, en la provincia de Morona Santiago, en las coordenadas 787741 y 9696202 (UTM WGS84 Zona 17S). El proyecto contempla una presa de 12.8m y una estructura de captación para derivar 30 m³/s a una central de generación hidroeléctrica de pasada con una potencia de 92 MW que generará 350 GW por año. Para el estudio se ha caracterizado la fluviomorfología del cauce en una longitud de aproximadamente 6 km hacia aguas arriba del sitio de la obra indicándose los siguientes aspectos importantes:

- El tramo se encuentra en un proceso de transición de una zona de erosión de lecho a una de deposición con configuraciones morfológicas típicas de escalonamiento en micro y macro escala y un descenso de la pendiente longitudinal desde 5%, en la cuenca media, a 1.5% en la zona del proyecto.
- Del resultado de los estudios hidrológicos, se establece que la distribución de los valores medios mensuales para la zona, obedece al comportamiento de un régimen amazónico, que presenta los mayores caudales entre los meses de abril a septiembre.
- El material del cauce se clasifica como grava media con procesos de transporte de carga de lecho para caudales medios. De acuerdo a la tipificación disponible para ríos aluviales (Parker & Peterson, 1980) y considerando estudios adicionales (García, 2000), en el río se presentarían procesos de transporte de carga en suspensión para caudales superiores a los caudales medios.

Para replicar los procesos de transporte en el modelo físico debido a eventos de regularidad hidrológica anual, considerando la magnitud y la frecuencia de ocurrencia de los caudales líquidos de la serie hidrológica, se ha definido para el estudio el valor de 50 m³/s como caudal formativo, definido como aquel que es responsable de la geometría hidráulica del cauce. Para validar la respuesta del modelo físico ante la presencia de eventos de menor regularidad hidrológica, se han definido el caudal

medio mensual del periodo húmedo igual a $75 \text{ m}^3/\text{s}$, y los caudales de 300 y $800 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondientes a los periodos de retorno de 5 y 10 años respectivamente.

2.2. Modelo físico

El estudio se realizó en un modelo físico de lecho móvil con relación de escala de longitudes del modelo al prototipo L_r igual a $1/50$ en el cual se ha incorporado las tasas de transporte de fondo que fueran calculadas por diferentes ecuaciones a fin de verificar que se repliquen las condiciones de orden fluviomorfológico de interés. El tramo del cauce modelado fue de 1000 m (escala de prototipo), con un ancho promedio de 35m y 1.5% de pendiente longitudinal.

Para el estudio se ha adoptado las consideraciones teóricas establecidas en la literatura técnica para el movimiento incipiente de las partículas. Las fuerzas del fluido primarias consideradas corresponden a las de fricción superficial. De acuerdo a (Zanke, 2003), no se tomaron en cuenta los efectos en el perfil de velocidad debido a la variación en tamaño, forma y localización de las partículas ni los efectos por cohesión.

Para la calibración del modelo se han considerado los grados de libertad definidos por la planta del proyecto y por los calados de flujo para los caudales ensayados. Para evaluar la respuesta del modelo y las ecuaciones utilizadas, se ha dado importancia al análisis de los fenómenos de erosión y acreción considerándose la interrelación entre la pendiente longitudinal, caudal líquido, y caudal de sólidos incorporados, de acuerdo a las leyes que rigen el equilibrio de un cauce con un punto de control aguas arriba.

2.3. Material del lecho

Para el material de lecho del modelo se adoptó un peso específico relativo s de 2.64 , igual que el material del cauce natural, y en función de la caracterización granulométría original se realizó el escalamiento de acuerdo a las funciones de similitud que establecen igualdad, tanto en modelo como en prototipo, del parámetro crítico de Shields y de la velocidad de sedimentación de las partículas w_s (Soulsby, 1997):

$$w_s = \left[(107.3296 + 1.049D_*^3)^{0.5} - 10.36 \right] v/d_s \quad (6)$$

donde:

$$D_* = [g(s - 1)/v^2]^{1/3} d_s \quad (7)$$

La curva de distribución granulométrica del material de lecho del río fue obtenida mediante muestreo volumétrico y superficial para inspeccionar aspectos de acorazamiento. En la Fig. 1 se indican las curvas granulométricas del prototipo y la curva adaptada para el modelo.

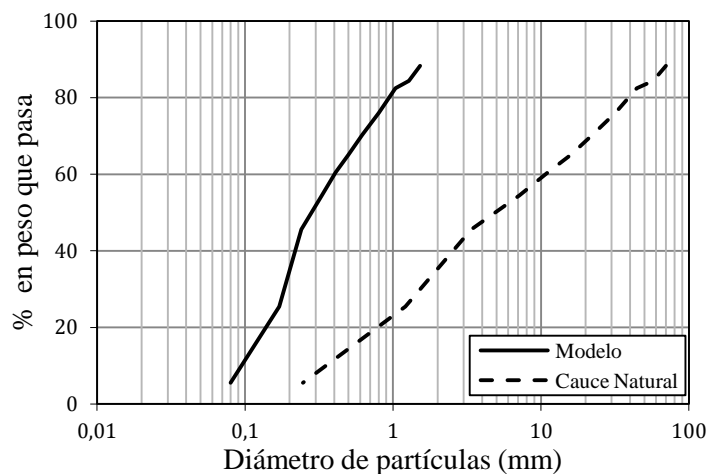


Figura 1. Curvas de distribución granulométrica para el material de lecho del cauce natural y distribución granulométrica adaptada para el modelo.

2.4. Ecuaciones de transporte para el estudio

Para establecer las condiciones de inicio de movimiento se calculó la velocidad de corte en función de la altura promedio de flujo y_n según la aproximación:

$$V_* \approx (g y_n \text{ sen } \theta)^{0.5} \quad (8)$$

El régimen de flujo corresponde a flujo turbulento completamente rugoso, $75 < R_{e*} < 100$ ubicándose el parámetro crítico en el rango $0.03 < \tau_c < 0.06$, condición para la cual el esfuerzo cortante crítico del lecho se asumió proporcional al tamaño del sedimento para simplificar los análisis en el rango de diámetros de partículas estudiado.

Para la validación experimental de la respuesta del modelo a los procesos de erosión o acreción, se calcularon las tasas de transporte unitario con las siguientes ecuaciones:

Schoklitsch: Para esta ecuación, la masa unitaria de flujo sólido m_s ha sido calculada mediante la expresión (Schoklitsch, 1950):

$$m_s = 2500(\text{sen}\theta)^{3/2}(q - q_c) \quad (9)$$

que está planteada en función del caudal líquido unitario de flujo q y del caudal crítico unitario q_c definido como aquel que da inicio al movimiento de las partículas y cuyo cálculo se realizó mediante la expresión:

$$q_c = 0.26(s - 1)^{5/3}d_{40}^{3/2}(\text{sen}\theta)^{-7/6} \quad (10)$$

Meyer-Peter

$$q_s / [(s - 1)gd_s^3]^{0.5} = [4 \tau_o / \rho(s - 1)gd_s - 0.188]^{3/2} \quad (11)$$

en la cual: $d_s = d_{50}$ (Meyer Peter, 1951)

Ecuación semiempírica de Nielsen

$$q_s / [(s - 1)gd_s^3]^{0.5} = \left(\frac{12 \tau_o}{\rho(s - 1)gd_s} - 0.05 \right) \sqrt{\tau_o / \rho(s - 1)gd_s} \quad (12)$$

Modelo simplificado de Nielsen

Para el modelo simplificado se ha tomado en cuenta el espesor de la capa de la carga de lecho δ_s y la velocidad media de sedimento V_s mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} C_s &= 0.65 \\ \delta_s / d_s &= 2.5(\tau_* - \tau_c) \\ V_s / V_* &= 4.8 \\ d_s &= d_{50} \end{aligned} \quad (13)$$

Van Rijn

Para el empleo de esta ecuación, se ha adoptado las siguientes expresiones para caracterizar la capa de carga de lecho (Van Rijn, 1993):

$$\begin{aligned} C_s &= (0.117/d_s)[v^2/(s - 1)g]^{1/3}(\tau_* / \tau_c - 1) \\ \delta_s / d_s &= 0.3(d_s [(s - 1)g/v^2]^{1/3})^{0.7}(\tau_* / \tau_c - 1)^{0.5} \\ V_s / V_* &= 7 \end{aligned} \quad (14)$$

en donde $d_s = d_{50}$.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Estudio de las tasas de Transporte

Para las ecuaciones consideradas, se calcularon las tasas teóricas potenciales de carga lecho en el cauce para los caudales naturales Q_p del prototipo. En la Tabla 1 se indican los valores correspondientes a la masa de sedimento obtenida para el modelo de acuerdo a las leyes de similitud.

Tabla 1. Carga de lecho potencial (kg/s) en prototipo P y modelo M, y pendientes de equilibrio promedio obtenidas.

Q_p (m ³ /s)	y_n^a (m)	Schoklitsch			Meyer-Peter			Nielsen ecuación semiempírica		
		P	M	%	P	M	%	P	M	%
50	0.74	230	0.013	2.44	774	0.044	1.18	1,216	0.069	0.03
75	0.94	344	0.019	2.63	1,120	0.063	1.22	1,742	0.099	0.05
300	2.22	1,378	0.078	2.89	4,157	0.235	1.27	6,331	0.358	0.18
800	4.16	3,674	0.208	3.25	10,744	0.608	1.38	16,246	0.919	0.26

Q_p (m ³ /s)	y_n^a (m)	Nielsen modelo simplificado			van Rijn		
		P	M	%	P	M	%
50	0.74	760	0.043	1.26	470	0.027	1.85
75	0.94	1,098	0.062	1.33	769	0.044	1.88
300	2.22	4,063	0.230	1.38	4,415	0.250	1.92
800	4.16	10,488	0.593	1.55	15,653	0.885	2.20

^a Los valores de y_n corresponden al calado promedio proyectado en el cauce natural (escala de prototipo).

Para el estudio en modelo físico de lecho móvil se hacen las siguientes observaciones:

- El diámetro representativo de partículas del material de lecho adoptado, se encuentra fuera del rango establecido para la formulación de Van Rijn.
- Un análisis realizado con diámetros dentro del rango de validez de la ecuación de Van Rijn ($0.2 < d_s < 2mm$), indica tasas muy superiores a las calculadas y un rápido descenso en la estimación de las tasas de transporte debido al comportamiento exponencial que presenta la ecuación de Van Rijn,
- Los valores más bajos calculados corresponden a la expresión propuesta por Schoklitsch.
- Los valores arrojados por las expresiones de Meyer-Peter y de Nielsen (modelo simplificado) son los más similares ya que presentan, para todos los caudales de estudio, variaciones de apenas 1% de sus promedios respectivos.
- Luego de que se procedió experimentalmente con la incorporación de las tasas de transporte, para los caudales de estudio, y de acuerdo a la Fig. 2, se reporta:
- Los ensayos realizados con la incorporación al flujo de las tasas calculadas mediante la ecuación de Schoklitsch, evidencian procesos de erosión en el material de lecho del modelo y propician pendientes longitudinales en el cauce del modelo de hasta 3.25%.
- Los ensayos realizados con la incorporación al flujo de las tasas calculadas por la ecuación semiempírica propuesta por Nielsen, presentan procesos de acreción que no permiten reproducir características morfológicas específicas observadas en el cauce natural, y no admite la conformación de la pendiente de equilibrio esperada en el modelo. Las pendientes de equilibrio obtenidas para el cauce del modelo se encontraron en el rango de 0.03% y 0.26%.

- Las tasas calculadas con la ecuación de Van Rijn generan pendientes de equilibrio en el lecho del modelo de 1.85% a 2.2%.
- Las tasas calculadas mediante la ecuación de Meyer-Peter y el modelo simplificado de Nielsen, posibilitan que se repliquen los fenómenos de socavación y las condiciones morfológicas observadas en el cauce natural del estudio.
- De manera particular para la ecuación de Meyer-Peter se obtienen pendientes de 1.18% a 1.38%. Dado que el material se ha clasificado como de grava media, no serían influyentes los efectos por acorazamiento del lecho sugeridos por Carson (1987) y Gomez & Church (1989).
- Las tasas incorporadas mediante el modelo simplificado de Nielsen, logran que se establezcan pendientes de equilibrio de 1.26% a 1.55%, mismas que corresponden bien a la pendiente de equilibrio esperada en el tramo de estudio.

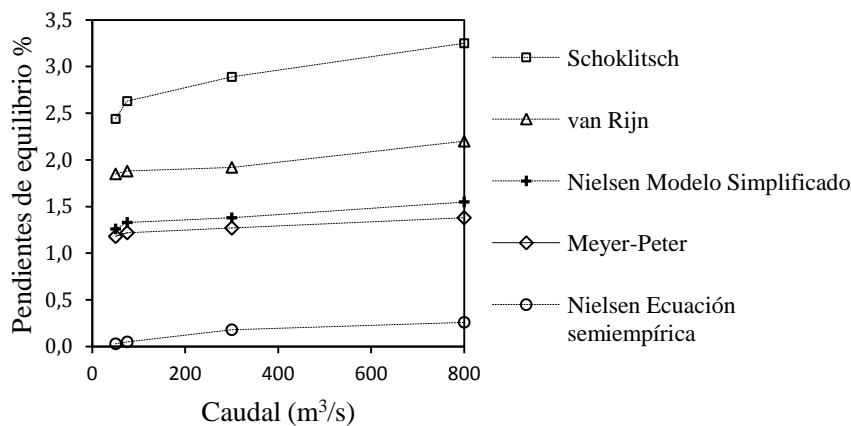


Figura 2. Pendientes de equilibrio promedio proyectadas en los ensayos con las tasas de transporte para los caudales de estudio.

Finalmente, luego de los ensayos de calibración realizados a los valores calculados con el modelo simplificado de Nielsen, se indica en la Tabla 2, las tasas obtenidas que permitieron la generación de la pendiente de equilibrio de 1.5% y la reproducción de los fenómenos y características morfológicas específicas observadas en el cauce natural de estudio.

Tabla 2. Tasas de transporte calibradas para el modelo de lecho móvil y proyectadas para el cauce de estudio.

Qp (m³/s)	Qm (m³/s)	Tasas de transporte (kg/s)	
		Modelo	Cauce natural
50	0.003	0.037	662
75	0.004	0.052	914
300	0.017	0.197	3,482
800	0.045	0.492	8,705

4. CONCLUSIONES

Se ha realizado el análisis de cinco formulaciones propuestas en la literatura técnica para la predicción de tasas de transporte de carga de fondo en cauces naturales mediante la validación experimental y calibración de procesos de transporte y sedimentación en un modelo de lecho móvil construido para el proyecto de generación hidroeléctrica HydroSanBartolo en un tramo de 1 km del río Negro en el sur del Ecuador.

Los ensayos de validación realizados en el modelo de lecho móvil indican que para el cauce de estudio, la ecuación propuesta por Schoklitsch subestima las tasas de transporte de fondo, arrojando valores del orden de 17 % de las tasas finalmente obtenidas en la calibración del modelo (Tabla 2). Sin embargo, considerando el rango de pendiente de equilibrio obtenido en la experimentación en el modelo de lecho móvil, y de acuerdo a Georgiev (1990), se podría indicar que la ecuación de Schoklitsch es apta para la estimación de tasas de transporte en cauces con pendientes mayores.

Las ecuaciones que mejor predicen las tasas de transporte de fondo son las propuestas por: Van Rijn, Meyer-Peter y Nielsen (modelo simplificado). Sin embargo, se debe descartar el empleo de la ecuación de Van Rijn dado que el valor del diámetro representativo y el rango de amplitud de diámetros en el cauce de estudio es superior al límite contemplado por dicha ecuación.

La ecuación propuesta por Meyer-Peter arroja resultados consistentes, calculando tasas apenas superiores en 15% de las tasas de transporte finalmente calibradas en el modelo de estudio. Por lo expuesto en la literatura técnica, y considerándose que dicha ecuación fuera formulada para cauces anchos, con pendientes de hasta 2% y diámetros del lecho de hasta 30 mm, se establece que es una formulación apropiada para la predicción de tasas de transporte en ríos con similares características a las del presente estudio.

La formulación que mejor responde a los procesos de equilibrio del estudio, es el modelo simplificado de Nielsen, mediante el cual se han proyectado, para el caudal dominante y para el caudal medio del periodo húmedo, tasas de transporte superiores en tan solo 14% y 9% respectivamente a las establecidas en la calibración final del modelo (Tabla 2). En consideración de su simplicidad y rango de funcionalidad, se concluye que el modelo simplificado propuesto por Nielsen se constituye en un método aceptable para la predicción de tasas de transporte de carga de lecho en ríos con similares características a las del presente estudio.

Los resultados obtenidos permiten concluir que, para propósitos de estudios y calibración en modelos de lecho móvil, es de fundamental importancia conocer las principales características y especificidades morfológicas que presenta un cauce a fin de lograr replicabilidad de los fenómenos observados en el prototipo. Por un lado es necesario y se recomienda definir adecuadamente los caudales dominantes que correspondan a los flujos formativos del cauce y generadores de los procesos fluviomorfológicos y por otro lado, el conocimiento certero de las características morfológicas ayudará en el ajuste final de las tasas de transporte que deberán incorporarse al flujo de modelización.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado gracias al aporte otorgado por la empresa HIDROTECH S. A., a través de la cual se financió la construcción y los estudios en modelo morfológico de lecho móvil para el proyecto hidroeléctrico HidroSanBartolo. Adicionalmente se agradece el soporte técnico y humano brindado por el Centro I+D+I PROMAS Universidad de Cuenca, que se constituye en una plataforma de apoyo del Departamento de Ingeniería Civil para la ejecución de proyectos de investigación científica.

REFERENCIAS

- Bathurst, J.C., W.H. Graf, H.H. Cao, 1987. Bed load discharge equations for steep mountain streams. En: Thorne, C.R., J.C. Bathurst, R.D. Hey (Eds.). *Sediment transport in gravel-bed rivers*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd., pp. 453-477.
- Carson, M., 1987. Bedload transport in gravel channels. *Journal of Hydrology*, 26, 1-151. Disponible en http://www.hydrologynz.co.nz/downloads/JoHNZ_1987_v26_1_Carson.pdf.
- Chen, C.L., 1990. Unified theory on power laws for flow resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117, 371-389.

- Einstein, H.A., 1942. Formulas for the transportation of bedload. *Trans., Am. Soc. Civil Engrs.*, 107, 561-577.
- Einstein, H.A., 1950. *The bed-load function for sediment transportation in open channel flows*. U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Bull. No. 1026.
- García, M.H., 2000. Discussion of "The legend of A.F. Shields". *Journal of Hydraulic Engineering*, 9(126), 718-720.
- Georgiev, B., 1990. *Reliability of bed load measurements in mountain rivers*. In: Hydrology in mountainous regions I: Hydrological measurements; the water cycle. IAHS Publ. no. 193, 263-270.
- Gessler, J., 1964. *Beginning and ceasing of sediment motion (Cap. 7)*. En: Shen, H.W. (Ed.). *River Mechanics*, Littleton, CO.: Water Resources Publications.
- Gomez, B. and Church, M., 1989. An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers. *Water Resources Research*, Issue 25, pp. 1161-1186.
- Meyer, P.E., R. Müller, 1948. *Formulas for bed load transport*. In: Report on Second Meeting of the International Association of Hydraulic Structures Research, Stockholm, pp. 39-64.
- Meyer, P.E., 1951. Transport des matières solides en général et problème spéciaux. *Bull. Génie Civil d'Hydraulique Fluviale*, Tome 5 (en francés).
- Nielsen, P., 1992. Coastal Bottom boundary layers and sediment transport. *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol. 4, 23 pp. Disponible en http://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/9789812796035_fmatter.
- Parker, G., A.W. Peterson, 1980. Bar resistance of gravel bed rivers. *Journal of Hydraulic Division*, 106, 1559-1575.
- Rouse, H., 1939. *An analysis of sediment transportation in the light of fluid turbulence*. Washington DC.: U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, SCS-TR 25.
- Schetz, J.A., 1993. *Boundary layer analyses*. USA: Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Schlichting, H., 1979. *Boundary layer theory*. USA: Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Schoklitsch, A., 1950. *Handbuch des Wasserbaues. Handbook of Hydraulic Structures* (2nd ed.). Vienna, Austria: Springer-Verlag.
- Schoklitsch, A., 1962. *Handbuch des Wasserbaus* (3th ed.). Viena: Springer-Verlag.
- Shields, A., 1936. *Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenz Forschung auf die Geschiebebewegung*. Berlin. Mitt. der Preussische Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau, 26.
- Soulsby, R.L., 1997. *Dynamics of marine sands*. London: Thomas Telford.
- Vanoni, V.A., 1941. Velocity distribution in open channels. *Civil Engineering*, 11(11), 356-357.
- Vanoni, V.A., 1964. *Measurement of critical shear stress for entraining fine sediments in a boundary layer*. California Institute of Technology, Pasadena, California: Report KH-R-7.
- Van Rijn, L.C., 1984. Sediment transport, Part I: bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, 1613-1641.
- Van Rijn, L.C., 1993. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. The Netherlands: Aqua, Amsterdam Publications.
- Van Rijn, L.C., 2007a. Unified view of sediment transport by currents and waves. III: Graded Beds. *J. Hydraulic Engineering*, 133(7), 761-775.
- Van Rijn, L.C., 2007b. Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport. *J. Hydraulic Engineering*, 133(6), 649-667.
- von Kármán, T., 1934. Turbulence and skin friction. *J. Aeronaut Sci.*, 11(1), 1.
- Wohl, E., 2000. *Mountain rivers*. Washington DC., USA: American Geophysical Union AGU, Resources Monograph 14.
- Zanke, U.C., 2003. On influence of turbulence on the initiation of sediment motion. *Int. J. Sediment Research*, 18(1), 1-15.