

UNIVERSIDAD DE CUENCA

FUNDADA EN 1867



**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARACTERIZACIÓN DE LA CARGA DE LECHO EN EL RÍO CALABÍ MEDIANTE
UN ESTUDIO EXPERIMENTAL EN CANAL DE LABORATORIO**

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR:

Ing. MSc. Esteban Alonso Pacheco Tobar

AUTORES:

Byron Rodrigo Chacha Cabrera

Tania Maribel Molina Ortiz

Cuenca – Ecuador

2014



RESUMEN

En el presente estudio se predice tasas de transporte de fondo mediante un estudio experimental en modelo físico de lecho móvil. El estudio fue realizado para el río Calabí ubicado en la Región Costa del Ecuador para el proyecto “Plan de Aprovechamiento y Control de Agua de la provincia de Los Ríos” que se ejecuta a través del convenio celebrado entre la Universidad de Cuenca y la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA). Se evalúa la respuesta del modelo físico a los procesos de movimiento incipiente para condiciones determinadas de caudal y pendiente y se realiza un estudio comparativo de los resultados con las tasas teóricas potenciales que proyectan varias ecuaciones de transporte de carga de lecho disponibles en la literatura. El estudio establece que el lecho del río Calabí corresponde a un lecho acorazado en referencia al diámetro d_{50} que caracteriza la granulometría del material de superficie. Para el material que representa diámetros menores, pendiente de 3 por mil y para el caudal formativo del río ($61.7 \text{ m}^3/\text{s}$) se establece la tasa unitaria de 6.61 kg/s/m (escala de prototipo).

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. The study was conducted for the Calabí River located on the coast of Ecuador to the "Plan of Development and Control of Water in the province of Los Rios" than is executed through the agreement between the University of Cuenca and the Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA). This study evaluates the response of the physical model to the processes for incipient movement for specific conditions related to flow and a comparative study of the theoretical rates projected for several equations available in the technical literature is done. The study establishes that the river Calabí presents an armor layers in the gravel bed in reference to diameter d_{50} than represents the surface material. For material that representing smaller diameters and for the formative flux, the study establishes a transport rate of 6.61 kg/s/m for the prototype scale.

Keywords — Bed load transport, Hydraulic modelling, Moving-bed physical model.



CONTENIDO

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
CLÁUSULA DE DERECHOS DE AUTOR.....	6
CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL	8
DEDICATORIA.....	10
AGRADECIMIENTO.....	11
LISTA DE SÍMBOLOS.....	12
PRESENTACIÓN.....	13
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Antecedentes.....	13
1.2. Objetivos y Alcance	13
MARCO CONCEPTUAL	15
2. TRANSPORTE DE FONDO EN CAUCES	15
2.1. Movimiento incipiente de la carga de lecho	16
2.2. Transporte de carga de lecho	18
2.3. Tamaño y forma de la partícula característica	19
MATERIALES Y MÉTODOS	21
3. INFORMACIÓN PARA EL ESTUDIO	21
3.1. Proyecto “Plan de Aprovechamiento y Control de Agua de la provincia de Los Ríos”	21
3.2. Consideraciones de Hidrología e Hidráulica fluvial	21
3.3. Consideraciones de orden Morfológico del río Calabí	23
4. ESTUDIO EN MODELO DE LECHO MOVIL.....	24
4.1. Material de lecho.....	25
4.2. Consideraciones de escalamiento	27



4.3. Ecuaciones de transporte	27
4.4. Experimentación	29
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
5. TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO EN MODELO DE LABORATORIO .	33
5.1. Determinación de las tasas de transporte potenciales.....	33
5.2. Proyección del proceso de transporte de fondo para el río Calabí	36
CONCLUSIONES.....	37
BIBLIOGRAFÍA	39



CLÁUSULA DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Byron Rodrigo Chacha Cabrera, autor de la tesis “CARACTERIZACIÓN DE LA CARGA DE LECHO EN EL RÍO CALABÍ MEDIANTE UN ESTUDIO EXPERIMENTAL EN CANAL DE LABORATORIO”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de INGENIERO CIVIL. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, noviembre de 2014

Byron Rodrigo Chacha Cabrera

CI: 0105462790



CLÁUSULA DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Tania Maribel Molina Ortiz, autora de la tesis “CARACTERIZACIÓN DE LA CARGA DE LECHO EN EL RÍO CALABÍ MEDIANTE UN ESTUDIO EXPERIMENTAL EN CANAL DE LABORATORIO”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de INGENIERO CIVIL. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, noviembre de 2014

Tania Maribel Molina Ortiz

CI: 1400680243



CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Yo, Byron Rodrigo Chacha Cabrera, autor de la tesis “CARACTERIZACIÓN DE LA CARGA DE LECHO EN EL RÍO CALABÍ MEDIANTE UN ESTUDIO EXPERIMENTAL EN CANAL DE LABORATORIO”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de mi exclusiva responsabilidad.

Cuenca, noviembre de 2014

Byron Rodrigo Chacha Cabrera

CI: 0105462790



CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Yo, Tania Maribel Molina Ortiz, autora de la tesis “CARACTERIZACIÓN DE LA CARGA DE LECHO EN EL RÍO CALABÍ MEDIANTE UN ESTUDIO EXPERIMENTAL EN CANAL DE LABORATORIO”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de mi exclusiva responsabilidad.

Cuenca, noviembre de 2014

Tania Maribel Molina Ortiz

CI: 1400680243



DEDICATORIA

*A Dios por haberme bendecido con
padres (Rodrigo y Clara), hermanos (Adrián y
Karla), además de amigos que de alguna
manera han sabido aportar con su apoyo,
confianza, motivación y sabiduría, para que
este sueño se haga realidad, gracias a todo
ello hoy puedo decir,
sueño cumplido.*

Byron

*A Judith, por su esfuerzo y
ejemplo de superación
personal; a Tarquino, Vanesa y
Carlota por su apoyo
incondicional en mi vida.*

Tania



AGRADECIMIENTO

Al dueño de la sabiduría, Dios, por habernos dado un poco de ella para culminar este trabajo de graduación.

A nuestras familias y amigos por todo el apoyo durante la etapa de estudios.

A la Universidad de Cuenca que a través del Laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos y el Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS), nos ha brindado la oportunidad para desarrollar esta investigación. De manera especial al Ing. MSc. Esteban Pacheco, nuestro Director de Tesis; y, al Dr. Felipe Cisneros, Director del PROMAS, por permitirnos aportar con conocimientos acerca del tema estudiado.

Byron y Tania



LISTA DE SÍMBOLOS

C_s	concentración media de sedimento
d_i	diámetro que identifica a la marca de clase de cada intervalo y es igual a la semisuma de las aberturas de dos mallas contiguas que definen cada intervalo.
D_{max}	diámetro de la partícula de mayor tamaño
d_s	diámetro de partícula de sedimento representativa
d_{50}	diámetro de las partículas para la cual la mitad de datos son menores que dicho diámetro y la otra mitad mayores.
f	frecuencia de ocurrencia de diámetros característicos
g	aceleración de la gravedad
i	subíndice que corresponde a las clases de los tamaños
l_a	eje mayor del sedimento
l_b	eje medio del sedimento
l_c	eje corto del sedimento
m_s	relación de masa de caudal de sedimentos por unidad de ancho
q	caudal de agua por unidad de ancho de canal
q_s	caudal de sedimentos por unidad de ancho
Q	caudal
R_{e*}	número de Reynolds de corte
s	peso específico relativo de las partículas
V^*	velocidad de corte
V	velocidad de flujo
V_s	velocidad promedio de sedimento en la capa de carga de lecho
w_s	velocidad de sedimentación de partículas
y_n	altura media de flujo normal
δ_s	altura de saltación promedio en la capa de carga de lecho
ρ	densidad del agua
ρ_s	densidad del sedimento
λ	factor de escala
ν	viscosidad cinemática del agua
θ	pendiente del lecho de un río
ϕ_s	ángulo de reposo de partícula de sedimento
τ_0	esfuerzo de corte en el lecho
τ^*	parámetro de estabilidad de Shields
τ_{*c}	valor crítico del parámetro de estabilidad de Shields



PRESENTACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En el marco del proyecto “Plan de Aprovechamiento y Control de Agua de la provincia de Los Ríos” que se ejecuta a través del convenio celebrado entre la Universidad de Cuenca y la Secretaría Nacional del Agua SENAGUA, se ha planteado necesario, dar paso a un estudio específico que permita caracterizar los procesos de transporte de sedimento para establecer criterios suficientes y dar respuesta a cuestiones de diseño de las obras de captación y de control del cauce a ser intervenido. Para ello se ha propuesto realizar un estudio experimental con lecho móvil en canal de laboratorio que permita la identificación de aspectos importantes relativos al proceso de transporte de carga de lecho en consideración de las características de hidrología fluvial, características morfológicas y físicas del río Calabí.

1.2. Objetivos y Alcance

Objetivo general

Aportar al entendimiento de los procesos de transporte de fondo en cauces mediante el estudio en modelo físico de lecho móvil.

Objetivos específicos

- 1) Estudiar expresiones analíticas para predecir el movimiento de carga de lecho.
- 2) Implementar un modelo físico de lecho móvil en canal de laboratorio.
- 3) Estudiar los procesos de movimiento incipiente y las tasas de carga de lecho para el río Calabí.



El estudio realizado tiene un carácter de exploración experimental mediante el cual se ha generado información relevante que dispone de elementos y consideraciones técnicas importantes para el diseño de la obra de captación proyectada en el río Calabí del proyecto “Plan de Aprovechamiento y Control de Agua de la provincia de Los Ríos”. Mediante la ejecución del estudio se da un aporte al entendimiento y aplicación de formulación técnica actualizada para cálculo y análisis de tasas de transporte de fondo en cauces. Adicionalmente, los resultados obtenidos forman parte del documento de divulgación técnica/científica No 22, del Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos LH&DF y el Grupo de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca, y han sido considerados para la elaboración de un artículo de divulgación científica a ser propuesto para la publicación en una revista indexada.



MARCO CONCEPTUAL

2. TRANSPORTE DE FONDO EN CAUCES

Se conoce que el transporte de sedimento en cauces naturales ocurre de dos formas: en suspensión, sostenido dentro del flujo por un proceso de mezcla turbulenta; o bien, sobre el lecho, mediante rodadura, deslizamiento y saltación, que es el proceso de mayor influencia en los cambios del fondo de los ríos (Chanson, 2002). Para cuantificar, la cantidad de material transportado en el fondo, llamada carga de lecho, se emplean un sin número de ecuaciones empíricas y semi-empíricas (Schlichting, 1979; von Kármán, 1934; Vanoni, 1941; Chen, 1990; García, 2000), que son modelos matemáticos establecidos para la predicción del inicio de movimiento de la carga de lecho y que toman en cuenta principalmente, 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 (Schlichting, 1979; García 2000).

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 estará sujeta una obra hidráulica en un cauce natural (Pacheco & Carrillo, 2014). Estudios recientes realizados a nivel mundial (Dedkov & Gusarov, 2006) establecen tasas específicas de transporte de sedimento hacia los océanos en el rango de 50 a 1770 t km⁻² año⁻¹ lo cual, considerando el hecho de que el transporte de fondo representa entre el 10% y 20% del transporte total de sedimento en cauces, las tasas de carga de lecho resultarían en el orden de 6 a 416 t km⁻² año⁻¹. Debido a que las formulaciones propuestas han sido elaboradas y calibradas para condiciones particulares o con datos específicos de ríos estudiados, no es del todo factible poder aplicarlas de manera directa (Wohl, 2000). Por otro lado, bajo ciertas condiciones se puede producir fenómenos locales, como socavación, y otros procesos de carácter morfodinámico, como acorazamiento, hechos que requieren ser analizados para lograr caracterizar de manera adecuada los procesos de transporte de carga de lecho en un río.



2.1. Movimiento incipiente de la carga de lecho

Las condiciones de flujo y de frontera que dan origen al movimiento de las partículas de fondo constituyen el umbral o inicio de movimiento, en el cual, las fuerzas desestabilizantes (arrastre, sustentación, flotación), superan a las fuerzas resistentes (peso de partícula y efectos friccionantes). Por un lado, las condiciones que definen el proceso dependen del tamaño y de la forma de las partículas de sedimento que influyen en la rugosidad de la frontera física del flujo y cuyo efecto resulta una función final del ángulo de reposo ϕ_s , mismo que obedece a la geometría de la partícula y a su angularidad (Rijn L. C., 1993). Por otro lado, el proceso de movimiento está influenciado por aspectos relacionados al campo de flujo (velocidad de flujo, distribución de velocidades, calado de flujo, entre otros).

Para el análisis del movimiento incipiente, los aspectos indicados son representados por: el esfuerzo cortante del lecho τ_0 , la densidad del sedimento ρ_s , la densidad del fluido ρ , el diámetro de la partícula considerada representativa d_s , la aceleración de la gravedad g y la velocidad del fluido V (Chanson, 2002). Sin embargo, cuando el fondo contiene cantidades importantes de arcillas o limos se deberá considerar adicionalmente la influencia de los efectos de cohesión (Rijn, 1993; Rijn, 2007a; Rijn, 2007b).

De entre los parámetros indicados, reviste especial importancia el esfuerzo cortante de lecho ya que a través del mismo se establece la capacidad que tiene un campo de flujo para provocar el movimiento incipiente y el arrastre de fondo en un cauce. En referencia a flujo uniforme estacionario en canales anchos, el esfuerzo cortante de lecho se expresa mediante la relación:

$$\tau_0 = \rho g y_n \text{sen} \theta$$

donde:

$\rho =$ Densidad del fluido

$g =$ Aceleración de la gravedad

$y_n =$ Altura media del flujo

$\text{sen} \theta =$ Pendiente de lecho



Mediante el esfuerzo cortante del lecho se define adicionalmente un parámetro importante para caracterizar el estado de movimiento que posee unidades de velocidad y que se conoce como velocidad de corte o velocidad cortante V_* :

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

Velocidades de corte V_* grandes, implicarán entonces mayores valores de esfuerzo cortante y por lo tanto un alto gradiente de velocidad (Chanson, 2002), lo cual se traducirá en un balance favorable para las fuerzas desestabilizantes y para el proceso de carga de lecho.

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

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

expresión en la cual:

$s =$ *Peso específico relativo de las partículas*

$d_s =$ *Diámetro característico de las partículas*

Varios autores (Shields, 1936; Rouse, 1939; Vanoni, 1964), han establecido experimentalmente que el movimiento incipiente de la carga de lecho ocurrirá a partir de un valor crítico τ_{*c} del parámetro de estabilidad de Shields que permite definir la condición de movimiento $\tau_* > \tau_{*c}$ como función del número de Reynolds de corte expresado como:

$$R_{e*} = V_*d_s/\nu$$

donde ν es la viscosidad cinemática del agua.

De manera particular, para materiales granulares, 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 $R_{e*} > 500$ recomendándose dividir por 2 a los valores presentados en el diagrama de Shields-Rouse.



El concepto introducido por Shields para el parámetro de estabilidad tiene una amplia aplicación para el estudio de los procesos de movimiento de carga de lecho, lo cual ha generado varias expresiones dirigidas a representar de mejor manera los datos experimentales, una de dichas ecuaciones y que ha sido validada para cauces de montaña (Pacheco E. , 2004) es la propuesta por Guo (2002):

$$(\tau_*)_c = \frac{0,11}{R_{e*}} + 0,054 \left[1 - e^{-\frac{4 R_{e*}^{0,52}}{25}} \right]$$

2.2. Transporte de carga de lecho

Al momento se dispone en la literatura técnica de varias ecuaciones para valorar el 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 (Pacheco & Carrillo, 2014). Así mismo, se reportan (Wohl, 2000) varios estudios comparativos de datos de campo que favorecen diferentes ecuaciones (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 que haya sido adoptado para el inicio del 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.

Por otro lado, se indica (Pacheco & Carrillo, 2014), que se han desarrollado un mayor número de expresiones basadas en el concepto de esfuerzo cortante del material de lecho, así por ejemplo se mencionan las expresiones propuestas por Einstein en 1942 y 1950 que no contemplan el esfuerzo cortante crítico y consideran más bien una distribución uniforme de partículas en un lecho plano. También pertenece al mismo grupo, la ecuación de Meyer-Peter & Müller (1948), que 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:

$$q_s = C_s \delta_s V_s$$

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.

2.3. Tamaño y forma de la partícula característica

Tanto el tamaño como la forma de las partículas de sedimento, son propiedades importantes que definirán la condición de movimiento de lecho (Petrie, 1998). Para establecer el tamaño característico d_s que será considerado finalmente para evaluar la carga de lecho, se atiende a las siguientes definiciones (Chanson, 2002):

- Diámetro de Tamiz: es el tamaño de la partícula que pasa a través de un tamiz de malla cuadrada de tamaño dado, pero no a través del siguiente tamiz de diámetro más pequeño.
- Diámetro de Sedimentación: es el tamaño de una esfera de cuarzo que se va lentamente al fondo con una velocidad de asentamiento igual a la velocidad de la partícula de sedimento real. También se lo conoce como diámetro standard de sedimentación.



- Diámetro Nominal: es el tamaño de una esfera de la misma densidad y de la misma masa que la partícula real.

En la determinación del tamaño de las partículas gruesas como gravas y arenas se realiza a través de análisis granulométricos que proporcionan como resultado una curva granulométrica del material. Para la caracterización de los tamaños del sedimento, se recurre, por ejemplo a la clasificación de la American Society for Testing Materials (ASTM).

Por otro lado, el factor de forma determina la forma de los sedimentos por medio de la medición de sus ejes ortogonales, más largo (l_a), intermedio (l_b), y más corto (l_c).



MATERIALES Y MÉTODOS

3. INFORMACIÓN PARA EL ESTUDIO

3.1. Proyecto “Plan de Aprovechamiento y Control de Agua de la provincia de Los Ríos”

El Gobierno Ecuatoriano, a través de la Secretaria Nacional del Agua (SENAGUA), realiza estudios y ejecuta megaproyectos de aprovechamiento hidráulico en beneficio de la colectividad y con miras al cambio de la matriz productiva. Uno de dichos proyectos es el “Plan de Aprovechamiento y Control del Agua, en la Provincia de Los Ríos - PACALORI”, cuyos estudios de prefactibilidad, factibilidad y diseños definitivos se ejecutan mediante convenio entre SENAGUA y la Universidad de Cuenca a través del Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS, con una inversión de USD 8'554.268,80 millones. En este contexto, para el proyecto se ha previsto el diseño de una obra de captación en el río Calabí, la cual conjuntamente con tres trasvases y un grupo de obras hidráulicas complementarias y de intervención en cauces, permitirán proveer de agua para desarrollo agrícola de aproximadamente 170 000 hectáreas, abastecimiento de agua para poblaciones urbanas y rurales y control de inundaciones en el área de Vinces – Babahoyo y Guayaquil.

3.2. Consideraciones de Hidrología e Hidráulica fluvial

En consideración de que el cauce en análisis corresponde a un río en la zona de inicio de llanura y en plena dinámica de procesos de transporte, para el estudio se ha dado especial interés a la hidrología de los eventos de regularidad hidrológica, y a la hidrología de eventos extremos.

Hidrología de caudales clasificados y seleccionados

Del análisis de los estudios hidrológicos que fueron realizados para el proyecto se establece que la distribución de los valores medios mensuales para la zona obedece al comportamiento de régimen costanero, con caudales mayores hacia el inicio del



año y caudales bajos hacia el mes de junio. De acuerdo a los estudios de prefactibilidad y factibilidad del proyecto PACALORI, se han obtenido los caudales medios mensuales del río Calabí en la estación Calabí en Lechugal que se indican a continuación:

Tabla 1. Caudales medios mensuales y caudales característicos en (m³/s) para el río Calabí.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Promedio	45.2	108.6	113.9	98.9	51.0	19.8	10.9	6.5	5.7	5.1	9.2	17.7	41.0
Máximo	150.7	214.7	205.4	189.0	137.4	60.2	36.7	24.6	36.0	36.9	186.6	231.0	87.6
Mínimo	5.5	24.4	36.7	29.1	14.5	1.1	2.1	1.3	1.1	0.8	0.4	1.2	15.8
σ_{n-1}	37.7	46.1	46.0	42.0	29.5	13.6	7.5	4.4	5.5	5.6	28.4	39.3	15.3

Fuente: (PROMAS - Universidad de Cuenca, 2014)

El estudio de la distribución de los caudales medios mensuales del período húmedo, ha permitido definir como adecuado el caudal de 75% de garantía como caudal formativo del río Calabí, estableciéndose el valor de 61.7 m³/s para efectos del estudio sobre el modelo físico.

Así mismo, y para efectos de identificación de otros caudales de interés, y para validación de los procesos de transporte de sedimento, se ha considerado para el estudio, el caudal medio anual de la época lluviosa y los caudales en el rango correspondiente de los máximos mensuales del periodo húmedo comprendidos entre 41 y 210 m³/s. Para el análisis, adicionalmente se ha considerado los caudales medios mínimos mensuales en el rango de 5 a 41 m³/s.

Hidráulica fluvial

Los niveles de agua en el sitio de toma y las condiciones de flujo identificadas, de acuerdo a la configuración topográfica, han sido definidos para tres secciones de interés a través de la implementación del modelo numérico HEC-RAS (U.S. Army Corps of Engineers, 2010).

Tabla 2. Niveles de flujo según caudales para las secciones de interés del estudio*

Caudal (m ³ /s)	Sección 0+400		Sección 0+450		Sección 0+500	
	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)
5	0.21	0.66	0.48	0.30	0.70	0.25
10	0.28	0.87	0.58	0.43	0.82	0.38
20	0.38	1.10	0.72	0.64	0.98	0.57
30	0.45	1.29	0.83	0.80	1.09	0.73
35	0.48	1.37	0.87	0.87	1.14	0.79
41	0.52	1.46	0.92	0.95	1.20	0.87
45	0.54	1.52	0.95	1.00	1.23	0.92
50	0.57	1.59	0.99	1.06	1.27	0.97
55	0.59	1.65	1.02	1.11	1.31	1.02
61.7	0.63	1.73	1.07	1.18	1.36	1.09
100	0.71	2.39	1.30	1.50	1.62	1.40
150	1.05	2.26	1.51	1.87	1.86	1.74
180	1.25	2.21	1.65	2.03	2.01	1.90
210	1.43	2.20	1.79	2.15	2.15	2.03

* Los niveles indicados corresponden a una rugosidad de calibración n de Manning de 0.032 y un acho de río característico de 65 m. **Nota:** Los calados y velocidad se obtuvieron con los datos de las secciones transversales levantadas en el tramo de emplazamiento de la obra.

3.3. Consideraciones de orden Morfológico del río Calabí

El río Calabí es un río perenne, meándrico (en la zona de llanura), con lecho de gravas que atraviesa colinas y llanuras en la provincia de Los Ríos hasta unirse con el río Zapotal. La cuenca de aporte del Calabí es de 1073.97 km². Desde el punto de vista morfológico, el río presenta un recorrido Norte-Sur. En el tramo de interés, la pendiente media del cauce es del orden de 3 por mil (macroescala).

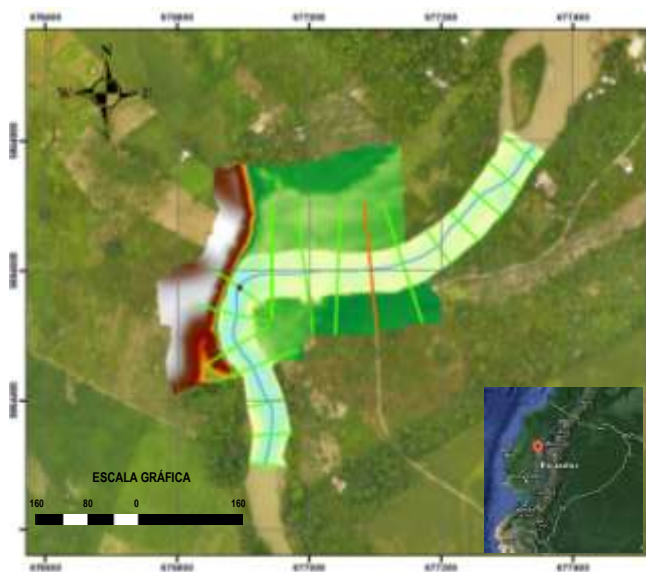


Figura 1. Cauce del río Calabí en el Tramo de Emplazamiento de la Obra.

Para la determinación de los calados del río se contó con los levantamientos de secciones transversales, espaciadas 50 m, a lo largo del tramo en estudio. Así mismo, se dispuso de ortofotografía y de un levantamiento de la franja del río realizado mediante sonar en una extensión de 400 m, esto es 250 m aguas arriba y 150 m aguas abajo del sector de la obra de toma.



En términos generales se identifican los siguientes aspectos de importancia:

- El cauce presenta una alineación suave, con un descenso paulatino de la pendiente longitudinal como parte del proceso natural de evolución hacia la zona de llanura final.
- Se establece entonces necesario correlacionar los procesos morfológicos presentes en el río con los posibles efectos debidos a la regularidad hidrológica formativa del cauce y eventos extremos.
- El tramo de interés pertenece entonces a un río en proceso de transición hacia la zona de depositación por lo cual presenta las típicas configuraciones morfológicas (meandros, zonas de depositación, zonas de acorazamiento, entre otras)
- Se indica que la relación ancho/calado en la mayoría de las secciones de estudio es mayor a 30, por tal motivo, para análisis de procesos hidráulicos, se puede tipificar al cauce como un canal ancho.
- De acuerdo a las batimetrías realizadas en el río Calabí, se conoce que existen cambios considerables de pendiente, encontrándose un rango de 0.2 a 12 por mil.

4. ESTUDIO EN MODELO DE LECHO MOVIL

El estudio se realizó mediante un modelo físico de lecho móvil implementado en canal de laboratorio (*Laboratorio de Hidráulica & Dinámica de Fluidos del Departamento de ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca*). Para el estudio se ha considerado los siguientes componentes:

- Caracterización del material de lecho
- Escalamiento
- Definición de ecuaciones de transporte
- Experimentación

4.1. Material de lecho

Granulometría y definición del tamaño característico

La caracterización del material de lecho del río Calabí ha sido realizada mediante un muestreo y análisis granulométrico. Dado que en los estudios de geología y morfología del proyecto, se exponen indicios de fenómeno de acorazamiento en el río, se ha llevado a cabo un procedimiento de muestreo superficial y el empleo de métodos de selección de material representativo. Para ello, se procedió a delimitar un área de 1 m² aproximadamente en el lecho, según la recomendación de Diplas y Fripp (1992), la cual señala que el área muestreada debe ser mayor o igual a $100(D_{max})^2$, donde D_{max} representa el diámetro de la partícula de mayor tamaño encontrada. Posteriormente, se recolectó manualmente todas las partículas dentro de la zona preestablecida, como se observa en la Figura 2.

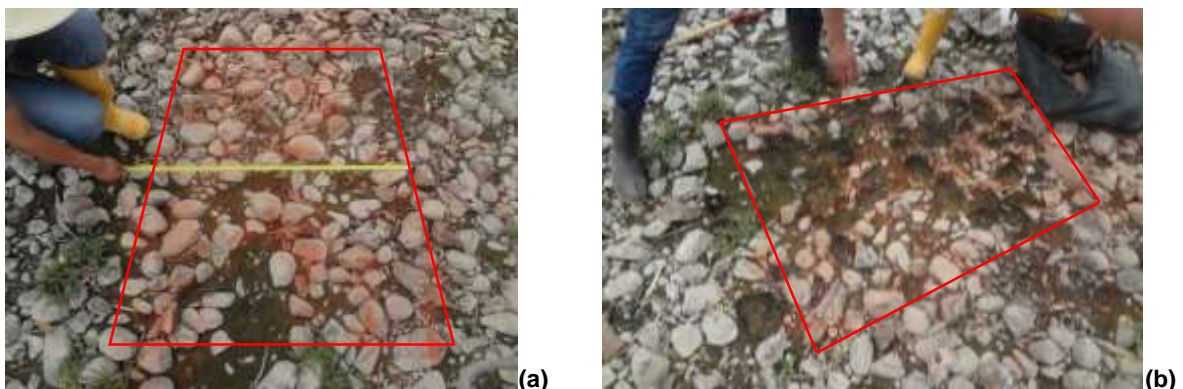


Figura 2. (a) En la fotografía se observa el área representativa pintada en el lecho del río Calabí. **(b)** Recolección de las muestras en un espesor de capa del lecho igual al D_{max} , para su posterior análisis en el laboratorio.

Para elaborar la curva granulométrica de esta muestra superficial, se midió los ejes ortogonales l_a y l_b de las partículas, considerándose l_b el tamaño característico de la partícula para el estudio.

El material obtenido fue corregido a fin de disponer de la distribución volumétrica respectiva considerando la frecuencia de ocurrencia de diámetros característicos f_i de acuerdo a la siguiente formulación:

$$f_i = \frac{f_i d_i^{-1}}{\sum f_i d_i^{-1}}$$

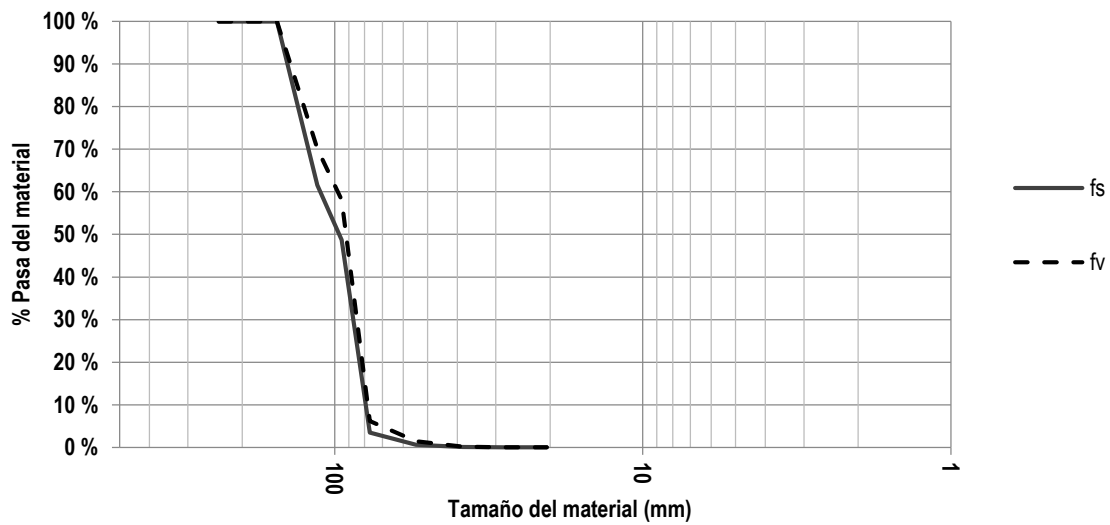


Figura 3. Distribución granulométrica superficial y volumétrica de la muestra de material de la capa superficial del lecho del río Calabí. Nota: fs es la frecuencia superficial, esto es que a cuanto mayor es el tamaño de la partícula, más presencia tiene proporcionalmente en el peso de la muestra superficial, con respecto a su frecuencia verdadera fv en el volumen (Sotelo Ávila, 2002).

Por otra parte, debido a que las capas, superficial y subsuperficial del río están conformadas por materiales de diferentes tamaños, se procedió a realizar el análisis granulométrico en forma independiente. Del análisis granulométrico del material subsuperficial se obtuvo la distribución granulométrica que se presenta a continuación.

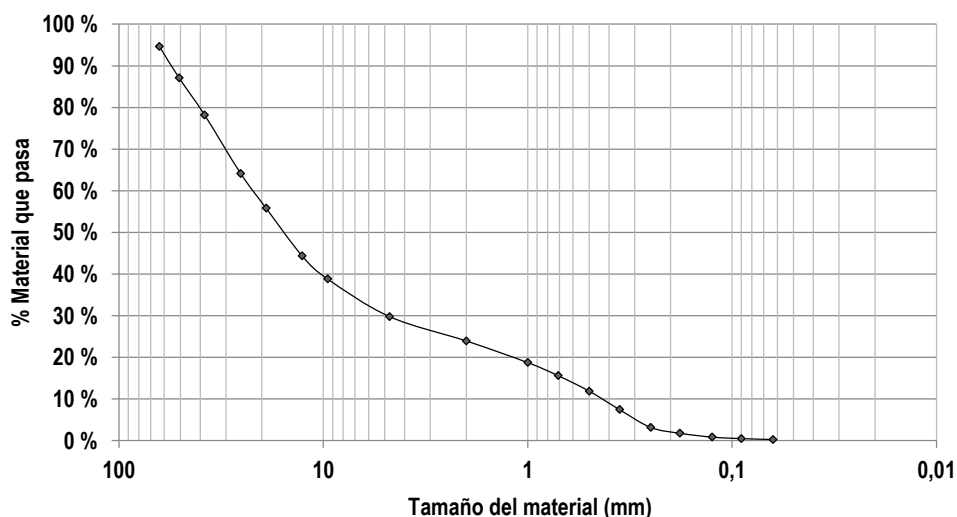


Figura 4. Distribución granulométrica del material subsuperficial del lecho del río Calabí. La muestra tomada corresponde al sector de Quimsaloma.



El análisis granulométrico permite identificar que el material no presenta propiedades de cohesividad concluyéndose que las fuerzas mecánicas serían las fuerzas dominantes para los procesos de movimiento a considerar.

4.2. Consideraciones de escalamiento

De acuerdo a las leyes de similitud hidráulica, en consideración de la información morfológica, hidrológica e hidráulica para el proyecto, y de acuerdo a las capacidades físicas de laboratorio, se ha realizado un análisis de escalamiento para el estudio en modelo de lecho móvil. En la Tabla 4 se indica las principales relaciones de escalamiento que fueron definidas para la experimentación en canal de laboratorio.

Para el material de lecho a ser empleado en la experimentación se adoptó un peso específico relativo s de 2.65, 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 (Pacheco & Carrillo, 2014). Para el cálculo de la velocidad de sedimentación w_s se adoptó la expresión siguiente (Soulsby, 1997):

$$w_s = \left[(10.36^2 + 1.049D_*^3)^{0.5} - 10.36 \right] v/d_s$$

donde:

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

4.3. Ecuaciones de transporte

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



Tabla 3. Correlaciones empíricas y semiempíricas de transporte de carga de lecho

Formulación	Ecuación	Rango de aplicación
Einstein (1942):	$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1)g d_s^3}} = 2.15 \exp\left(-0.391 \frac{\rho(s-1)g d_s}{\tau_o}\right)$	$1.25 < s < 4.25$ $0.315 < d_s < 28.6 \text{ mm}$ $\frac{q_s}{\sqrt{(s-1)g d_s^3}} < 0.4$ $d_s \approx d_{35} \text{ a } d_{45}$
Meyer-Peter and Müller (1948):	$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1)g d_s^3}} = 8 (\tau_* - \tau_{*c})^{3/2}$	$\tau_{*c} = 0.047$
Meyer-Peter (1949-1951):	$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1)g d_s^3}} = \left(\frac{4\tau_o}{\rho(s-1)g d_s} - 0.188\right)^{3/2}$	$1.25 < s < 4.2$ $d_s = d_{50}$ $s = 1.25$ (arenas de lignita)
Schoklitsch (1950):	$m_s = 2500 \text{ sen}(\theta)^{3/2} (q - q_c)$ $q_c = 0.26 (s - 1)^{5/3} d_{40}^{3/2} (\text{sen}\theta)^{-7/6}$	$s = 1.2$
Parker (1979):	$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1)g d_s^3}} = 11.2 \frac{(\tau_* - 0.03)^{4.5}}{\tau_*^3}$	
Hanes (1986):	$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1)g d_s^3}} = 6 \tau_*^{5/2}$	$\tau_* > 0.4$
Nielsen semiempírica (1992):	$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1)g d_s^3}} = \left(\frac{12\tau_o}{\rho(s-1)g d_s} - 0.05\right) \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho(s-1)g d_s}}$	$1.25 < s < 4.22$ $0.69 < d_s < 28.7 \text{ mm}$
Nielsen simplificada (1992):	$q_s = C_s \delta_s V_s$ $C_s = 0.65$ $V_s/V_* = 4.8$ $\delta_s/d_s = 2.5 (\tau_* - \tau_c)$	
Van Rijn simplificada (1984-1993):	$q_s = C_s \delta_s V_s$ $\frac{\tau_*}{(\tau_*)_c} < 2$ $C_s = \frac{0.117}{d_s} \left(\frac{v^2}{(s-1)g}\right)^{1/3} \left(\frac{\tau_*}{(\tau_*)_c} - 1\right)$ $\frac{\delta_s}{d_s} = 0.3 \left(d_s \left(\frac{(s-1)g}{v^2}\right)^{1/3}\right)^{0.7} \sqrt{\frac{\tau_*}{(\tau_*)_c} - 1}$ $\frac{V_s}{V_*} = 9 + 2.6 \log_{10} \left(d_s \left(\frac{(s-1)g}{v^2}\right)^{1/3}\right) \sqrt{\frac{\tau_*}{(\tau_*)_c} - 1}$ <p>Caso contrario</p> $C_s = \frac{0.117}{d_s} \left(\frac{v^2}{(s-1)g}\right)^{1/3} \left(\frac{\tau_*}{(\tau_*)_c} - 1\right)$ $\frac{\delta_s}{d_s} = 0.3 \left(d_s \left(\frac{(s-1)g}{v^2}\right)^{1/3}\right)^{0.7} \sqrt{\frac{\tau_*}{(\tau_*)_c} - 1}$ $\frac{V_s}{V_*} = 7$	$d_s = d_{50}$ $0.2 < d_s < 2 \text{ mm}$ $y_n > 0.1 \text{ m}$ $F_r < 0.9$



Cheng (2002):	$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1) g d_s^3}} = 13 \tau_*^{3/2} \exp\left(-\frac{0.05}{\tau_*^{3/2}}\right)$	
Wong and Parker (2006a):	$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1) g d_s^3}} = 2.66 (\tau_* - 0.0549)^{3/2}$	$s = 2.55$
Wong and Parker (2006b):	$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1) g d_s^3}} = 4.93 (\tau_* - 0.047)^{1.6}$ $\frac{q_s}{\sqrt{(s-1) g d_s^3}} = 3.97 (\tau_* - 0.0495)^{3/2}$	$s = 2.55$

Notas: m_s = relación de masa de caudal de sedimentos por unidad de ancho; q = caudal de agua por unidad de ancho de canal; q_s = caudal de sedimentos por unidad de ancho; τ_o = esfuerzo cortante medio de frontera; τ_* = parámetro de Shields; $(\tau_*)_c$ = parámetro crítico de Shields; y , d_s = diámetro característico.

4.4. Experimentación

Para el análisis de movimiento incipiente en canal de laboratorio, se calculó la velocidad de corte en función de la altura promedio de flujo y_n según la aproximación

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

El régimen de flujo corresponde a flujo turbulento completamente rugoso, $75 a 100 < R_{e*}$ 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 (Pacheco & Carrillo, 2014).

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 geometría del canal de laboratorio y por los calados de flujo para los caudales de estudio.

Se ha definido las variables dependientes e independientes, identificándose sus relaciones y rangos de interés para la experimentación.

**Tabla 4. Variables de estudio y rango de experimentación. Diseño de la experimentación**

Tipo de Variable	Factor	Relación Prototipo- Modelo	Rango de valores en Prototipo
Independientes			
Q	$\lambda^{5/2}$	$Q_m = Q_p \lambda^{5/2}$	5 a 210 (m ³ /s)
θ			1 a 12 por mil
y_n	λ	$y_{n_m} = y_{n_p} \lambda$	0.5 a 2.5 (m) *
d_s			
B	λ	$b_m = b_p \lambda$	51 - 65 (m)
n	$\lambda^{1/6}$	$n_m = n_p \lambda^{1/6}$	0.032
Dependientes			
V	$\lambda^{1/2}$	$V_m = V_p \lambda^{1/2}$	-
q_s	$\lambda^{3/2}$		

*El rango de y_n corresponde al rango adoptado para el estudio.

Los subíndice **m** y **p** indican las variables a escala de modelo o prototipo, respectivamente.

La escala seleccionada para el modelo corresponde a la relación 1:12.53 y fue construido en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos LH&DF de la Universidad de Cuenca, en un canal prismático de 12.5 m de longitud, 0.3 m de ancho y 0.45 m de profundidad con capacidad de 23.5 L/s. El caudal de ingreso al canal fue medido mediante un vertedero calibrado. El modelo implementado cuenta adicionalmente con una compuerta de control regulable a la salida del canal, la cual permite establecer condiciones de frontera referida a los calados según se requiera.

En la experimentación a escala reducida de carga de lecho del río Calabí se consideraron dos diámetros característicos: el d_{50} de la muestra superficial y el d_{35} de la distribución granulométrica del material de la subsuperficie. Mismos que fueron escalados en función de la velocidad de sedimentación w_s , obteniéndose las siguientes relaciones en modelo y prototipo (ver Tabla 5).



Tabla 5. Diámetros característicos empleados para la experimentación

Diámetro	Tamaño de la partícula		Observaciones
	Prototipo (mm)	Modelo (mm)	
Material Superficie			
d_{90}	141	11.1	Usado para calcular la capa* superficial en modelo.
d_{50}	92	7.3	Diámetro utilizado en modelo, para simular el lecho grueso del río.
d_{45}	90	7.2	
d_{40}	88	7.1	
d_{35}	87	7.0	
Material Subsuperficie			
d_{90}	54.9	4.5	Usado para calcular el espesor de la capa subsuperficial en el modelo.
d_{50}	15.8	1.4	
d_{45}	13.1	1.2	
d_{40}	10.3	1.0	
d_{35}	7.5	0.75	Diámetro utilizado en modelo, para calcular el proceso de arrastre de la subsuperficie del río.

* El espesor de la capa de carga de lecho que se usó en el modelo fue de dos veces d_{90} .

Nota: Los diámetros d_{50} , d_{45} , d_{40} y d_{35} del material subsuperficial fueron empleados para el cálculo de las tasas de carga de lecho en las ecuaciones del estudio.

En modelo, se simuló una capa de carga de lecho de 4 m de longitud en el canal, lo que corresponde a 50 m en prototipo, se experimentó el transporte de fondo considerando todas las variables independientes citadas en la Tabla 4. La experimentación se dividió en dos partes para simular los procesos en material superficial y los procesos en el material subsuperficial. En la primera parte, se conformó la capa con partículas de 92 mm de diámetro (escala prototipo), pintadas de diferentes colores, colocadas en tramos de 1 m cada uno (ver Figura 5a). El material arrastrado en un tiempo determinado fue recogido, pesado, registrado y devuelto al modelo. Para la segunda parte de la experimentación, se cubrió el



material grueso con una capa de arena de 9 mm de espesor, de 0.75 mm (escala de modelo) de diámetro que corresponde al d_{35} del material natural del río.

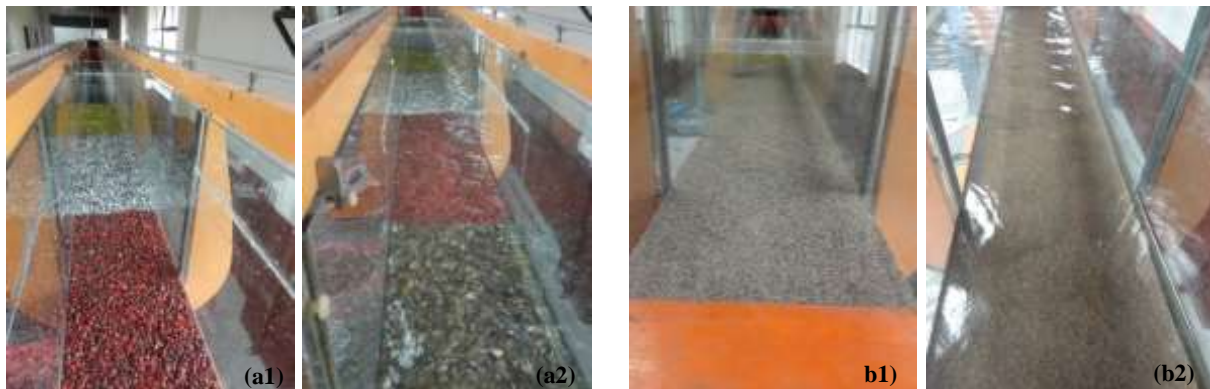


Figura 5. Conformación del lecho **(a)** con material $d_{50} = 92\text{mm}$ de la superficie, (a1) antes del ensayo y (a2) durante el ensayo; **(b)** con material $d_{35} = 0.75\text{ mm}$ de la subsuperficie, (b1) material colocado sobre la capa de gravas.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. TRANSPORTE DE CARGA DE LECHO EN MODELO DE LABORATORIO

5.1. Determinación de las tasas de transporte potenciales

Para la primera parte de la experimentación, en material grueso, una vez analizada la información hidrológica y en base de los resultados obtenidos de la modelización matemática en HEC-RAS, se ha establecido para el estudio una velocidad característica representativa de 2 m/s (escala de prototipo). Para la capa superficial se ha realizado un análisis para caudales en el rango de 41 a 210 m³/s (en prototipo), los cuales han permitido reconstruir las condiciones y los campos de flujo esperados en el río para diferentes calados. Los resultados obtenidos indican que para pendientes de 1 a 3 por mil, no se presentaría inicio de movimiento y por lo tanto no se han registrado tasas de transporte. Por otro lado, si bien para pendientes mayores a 7 por mil se pudo registrar valores en ciertas condiciones se indican que dichos valores se consideran despreciables.

Para la segunda parte de la experimentación con caudales superiores al caudal medio anual (41m³/s) y todas las pendientes ensayas (1, 3 y 5 por mil), se registra inicio al movimiento de carga de lecho como se puede apreciar en la Figura 6.

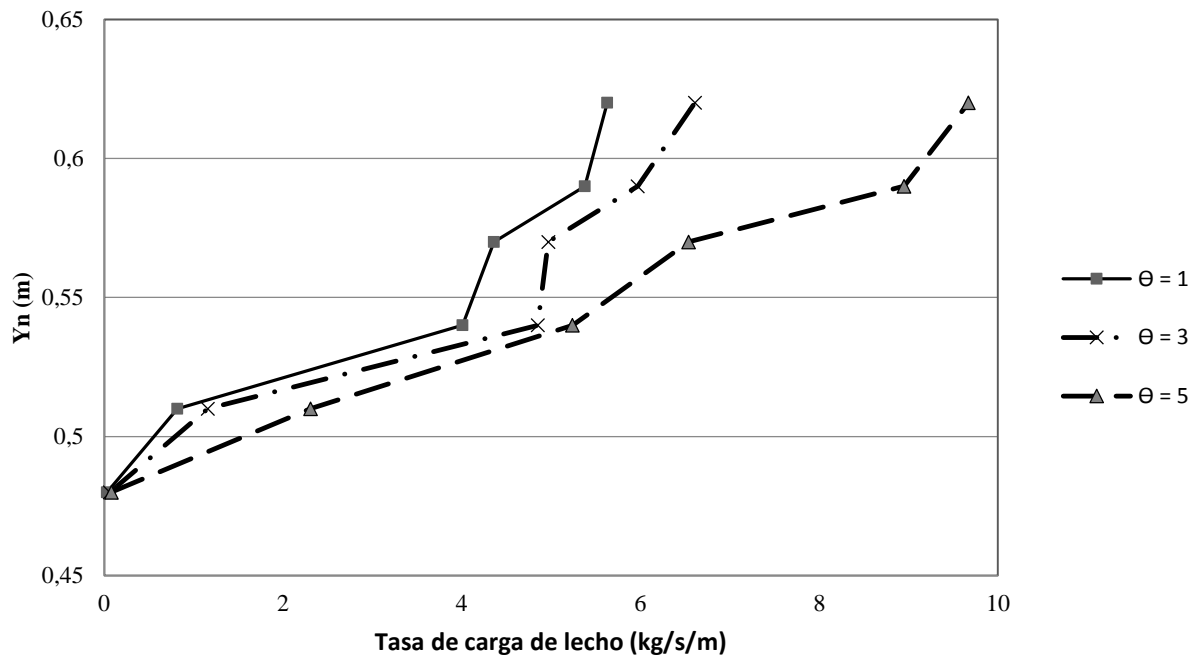


Figura 6. Tasas de arrastre de fondo medidas en laboratorio para diferentes calados y pendientes, escaladas a prototipo. Nota: Los resultados corresponden a los caudales comprendidos entre el medio anual y el formativo (41 y 61.7 m³/s); y calados de la sección 0+400 (Tabla 2) del río, en los que la velocidad se encuentra en el rango establecido como velocidad característica de los procesos de flujo y de acuerdo a la hidrología fluvial para el río de estudio.

Se ha realizado el cálculo teórico de tasas de carga de lecho con 12 relaciones empíricas y semiempíricas disponibles en la literatura técnica, mismos que se exponen en la Tabla 6.



Tabla 6. Tasas de carga de lecho (kg/s/m) calculadas para escala de prototipo para el material subsuperficial con diferentes pendientes.

Qp (m ³ /s)	y _n (m)	Vp (m/s)	Meyer-Peter and Müller (1948)	Meyer-Peter (1949-1951)	Einstein (1942)	Schoklitsch (1950)	Nielsen semiempírica (1992)	Nielsen simplificada (1992)	Wong and Parker (2006a)	Wong and Parker (2006)	Parker (1979)	Cheng (2002)	Hanes (1986)	Van Rijn simplificada (1984-1993)	
θ =1 por mil															
35	0.48	1.06	-	-	-	0.04	0.49	-	-	-	-	-	-	0.01	-
41	0.51	1.27	-	-	-	0.05	0.55	-	-	-	-	-	-	0.01	-
45	0.54	1.39	-	-	-	0.06	0.60	-	-	-	-	-	-	0.01	-
50	0.57	1.53	-	-	-	0.06	0.66	-	-	-	-	-	-	0.01	-
55	0.59	1.68	-	-	-	0.07	0.71	-	-	-	-	-	-	0.01	-
61.7	0.62	1.89	-	-	0.01	0.08	0.77	-	-	-	-	-	-	0.01	-
θ =3 por mil															
35	0.48	1.06	0.17	0.12	0.52	0.25	3.05	0.39	0.0002	0.05	0.04	0.09	0.08	0.09	0.02
41	0.51	1.27	0.26	0.21	0.63	0.29	3.36	0.54	0.01	0.08	0.07	0.13	0.12	0.11	0.03
45	0.54	1.39	0.37	0.31	0.75	0.32	3.67	0.69	0.03	0.13	0.12	0.19	0.17	0.12	0.05
50	0.57	1.53	0.49	0.43	0.88	0.35	4.00	0.86	0.06	0.18	0.17	0.25	0.23	0.14	0.07
55	0.59	1.68	0.58	0.51	0.97	0.39	4.22	0.97	0.08	0.21	0.21	0.30	0.29	0.15	0.08
61.7	0.62	1.89	0.71	0.64	1.10	0.44	4.56	1.15	0.12	0.27	0.27	0.39	0.38	0.17	0.10
θ =5 por mil															
35	0.48	1.06	1.71	1.62	1.98	0.53	6.78	2.34	0.40	0.73	0.74	1.12	1.28	0.33	0.28
41	0.51	1.27	2.04	1.94	2.23	0.63	7.44	2.71	0.50	0.88	0.89	1.39	1.63	0.38	0.34
45	0.54	1.39	2.38	2.27	2.48	0.69	8.13	3.10	0.60	1.05	1.05	1.69	2.04	0.44	0.41
50	0.57	1.53	2.74	2.63	2.73	0.77	8.83	3.50	0.71	1.23	1.23	2.02	2.49	0.50	0.48
55	0.59	1.68	2.99	2.88	2.89	0.84	9.32	3.77	0.79	1.35	1.35	2.25	2.81	0.55	0.53
61.7	0.62	1.89	3.38	3.26	3.13	0.95	10.05	4.19	0.91	1.54	1.53	2.62	3.32	0.62	0.62

Nota: Las condiciones para las cuales no se han generado valor de carga de lecho se indican mediante (-)

5.2. Medición experimental del transporte de fondo

Las tasas potenciales de carga de lecho obtenidas en canal de laboratorio se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 7. Tasa de transporte medidas en el modelo y proyectadas para el río en estudio.

Q p (m ³ /s)	Q m (L/s)	Tasa de Transporte (Kg/s/m)	
		Modelo	Prototipo
$\theta = 1$ por mil			
35.0	3.6	0.00005	0.03
41.0	4.3	0.001	0.82
45.0	4.7	0.007	4.01
50.0	5.2	0.008	4.36
55.0	5.7	0.010	5.38
61.7	6.4	0.010	5.63
$\theta = 3$ por mil			
35.0	3.6	0.00011	0.06
41.0	4.3	0.002	1.16
45.0	4.7	0.009	4.85
50.0	5.2	0.009	4.97
55.0	5.7	0.011	5.97
61.7	6.4	0.012	6.61
$\theta = 5$ por mil			
35.0	3.6	0.00014	0.08
41.0	4.3	0.004	2.31
45.0	4.7	0.009	5.24
50.0	5.2	0.012	6.54
55.0	5.7	0.016	8.95
61.7	6.4	0.017	9.67

Nota: Los valores de las tasas mostradas corresponden a las máximas obtenidas en laboratorio para los diferentes caudales ensayados.

CONCLUSIONES

Se ha ejecutado un estudio en modelo físico de lecho móvil en canal de laboratorio para caracterizar el proceso de arrastre de fondo en el lecho del río Calabí para el proyecto “Plan de Aprovechamiento y Control de Agua de la provincia de Los Ríos”.

La experimentación se llevó a cabo para caudales correspondientes a los mínimos, medios y máximos mensuales registrados durante el periodo 1965-2010 en la estación Calabí en Lechugal.

El estudio fue realizado para dos diámetros considerados representativos del material de lecho. Para el $d_{50} = 92$ mm (escala de prototipo) que representa el material superficial, se concluye que el lecho del río se clasifica como un lecho acorazado que no está sujeto a procesos de transporte de fondo para caudales ensayados en el rango de 41 a 210 m^3/s (escala de prototipo) y pendiente media de 3 por mil.

Para caracterizar el transporte de sedimento de menor tamaño, en el estudio experimental se adoptó el diámetro d_{35} como tamaño representativo para análisis de procesos de arrastre de fondo y saltación, estableciéndose tasas unitarias potenciales de 0.03 a 9.67 $kg/s/m$ (escala de prototipo).

Se ha realizado el cálculo teórico de tasas de carga de lecho con 12 relaciones empíricas y semiempíricas disponibles en la literatura técnica, las mismas que han sido seleccionadas en base a criterios de uso destacado y frecuente en estudios técnicos, desempeño, aplicabilidad y actualidad. El cálculo establece que la tasa de transporte de fondo para el río Calabí, se encuentra en el rango de 0.01 a 10.05 $kg/s/m$ para las pendientes de 1 a 5 por mil y caudales de 35 a 61.7 m^3/s . Las ecuaciones de Einstein, Hanes, Wong and Parker y Van Rijn (simplificada), predicen las menores tasas, mientras que la ecuación de Nielsen (semiempírica) arroja la máxima proyección.

Los valores de la tasa de arrastre de fondo obtenidas en laboratorio se asemejan a las arrojadas por las de Nielsen (semiempírica) cuando el caudal es mayor al medio anual (41 m^3/s) y la pendiente mayor o igual a 3 por mil. Para el caudal formativo (61.7 m^3/s) y la pendiente media del río (3 por mil), la tasa máxima proyectada (ecuación Nielsen semiempírica) es de 4.56 $kg/s/m$ siendo 0.7 veces menor que el valor medido en laboratorio.

Por otro lado, la ecuación de Van Rijn (simplificada) predice la menor tasa de arrastre con un valor de 0.1 kg/s/m. Este resultado es congruente con lo indicado por la literatura técnica ya que la ecuación de Van Rijn está recomendada para el cálculo de tasas de transporte en suspensión.

Para las condiciones de caudal formativo y pendiente de 3 por mil, la tasa de arrastre de fondo proyectada por el modelo de Nielsen semiempírica (4.56 kg/s/m) es comparable con la tasa correspondiente medida en laboratorio (6.61 kg/s/m).

BIBLIOGRAFÍA

- Bathurst, J., Graf, W., & Cao, H. (1987). Bed load discharge equations for steep mountain streams. In C. R. Thorne, J. C. Bathurst, Chichester, & J. W. Sons, *Sediment transport in gravel-bed rivers* (pp. 453-477).
- Carson, M. (1987). Bedload transport in gravel channels. *Journal of Hydrology*, vol. 26, 1-151.
- Chanson, H. (2002). *Hidráulica del flujo en canales abiertos*. (J. G. V., Trans.) Bogotá, Colombia: McGRAW HILL.
- Chen, C. L. (1990). Unified theory on power laws for flow resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 117, 371-389.
- Dedkov, A., & Gusarov, a. (2006). Suspended sediment yield from continents into the World Ocean: spatial and temporal changeability. *IAHS Publication 306, Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems*, 3-11.
- Einstein, H. A. (1942). Formulas for the transportation of bedload. *Trans., ASCE*, 561-577.
- García, M. H. (2000). Discussion of "The legend of A. F. Shields". *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, vol. 9(nº 126), 718-720.
- García, M. H. (2008). *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice NO 110. Sedimentation Engineering, Processes, Measurements, Modeling and Practice*. Reston, Virginia.
- Georgiev, B. (1990). Reliability of bed load measurements in mountain river. *Hydrology in mountainous regions I: Hydrological measurements; the water cycle*, IAHS, Vol. 193, 263-270.
- Gessler, J. (1964). Beginning and Ceasing of Sediment Motion Cap. 7. In H. W. Shen, *River mechanics*. Littleton, CO.: Water Resources Publications.
- Gomez, B., & Church, M. (1989). An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers. *Water Resources Research*, N° 25, 1161 - 1186.

- Guo, J. (2002). *Hunter Rouse and Shields diagram. Proceedings of the 13th IAHR-APD Congress. Singapore (1096-1098).*
- Kármán, T. v. (1934). Turbulence and Skin Friction. *J. aeronaut Sci.*, vol 1(nº1), 1.
- Nielsen, P. (1992). Coastal Bottom Boundary layers and sediment transport. *Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 4.*
- Pacheco, E. (2004). *Equilibrio del proceso de transporte de sedimentos en cárcavas y torrentes intervenidos en la cuenca hidrográfica del río Paute. Trabajo investigativo para obtención del grado de Magíster en manejo y conservación de los recursos Agua y Suelo MSc. Cuenca: Universidad de Cuenca.*
- Pacheco, E. A., & Carrillo, V. M. (2014). Transporte de Fondo Potencial mediante Estudio en Modelo Físico de Lecho Móvil. *I Congreso de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Cuenca.*
- Peter, E. M. (1951). Transport des matières Solides en Général et problémé Spéciaux. *Bull. Génie Civil d'Hydraulique Fluviale, Tome 5 (in French).*
- Petrie, J. E. (1998). *The Accuracy of River Bed Sediment Samples.* Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University. Retrieved from <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-011599-103221/unrestricted/Thesis.pdf>
- PROMAS - Universidad de Cuenca. (2014). *Plan de Aprovechamiento y Control del Agua en la provincia de Los Ríos. Tomo 3: Climatología-Hidrología-Sedimentología y Balance Hídrico.* Cuenca.
- PROMAS - Universidad de Cuenca. (2014). *Plan de Aprovechamiento y Control del Agua en la provincia de Los Ríos. Tomo 7: Diseños Básicos de Obras Civiles, Ingeniería Hidráulica y Sistemas de Riego.* Cuenca.
- Rijn, L. C. (1993). Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas.
- Rijn, L. C. (2007a). Unified view of sediment transport by currents and waves. III: Graded Beds. *J. Hydraulic Engineering, vol. 133, 761-775.*

- 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*, vol. 133(6), 649-667.
- Rocha F., A. (1998). *Introducción a la Hidráulica Fluvial* (Primera ed.). Perú: Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rouse, H. (1939). An analyses of sediment transportation in the lighth of fluid turbulence. *U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, SCS-TR 25*.
- Schlichting, H. (1979). *Boundary Layer Theory*. Prentice Hall.
- Schoklitsch, A. (1962). *Handbuch des Wasserbaus*. Springer-Verlag , Viena.
- Senagua. (2014). *Secretaria Nacional de Agua*. Retrieved from <http://www.agua.gob.ec/>
- Shields, A. (1936). Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenz Forschung auf die Geschiebebewegung. *Mitt. der Preussische Versuchanstalt fur Wasserbau und Schiffbau*(nº 26).
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidraulica de canales. División de Ingenieria Civil, Topográfica y Geodésica. Departamento de Hidráulica*. México.
- U.S. Army Corps of Engineers, U. (2010).
- Vanoni, V. A. (1941). Velocity distribution in open channels. *Civil Engineering*, vol. 11 (nº 11), 356-357.
- Vanoni, V. A. (2006). *Sedimentation Enginnering. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice NO. 54*. Reston, Virginia, USA.
- Wohl. (2000). *Mountain Rivers*. Washington D.C, USA: American Geophysical Union AGU, resources monograph.
- Zanke, U. C. (2003). On influence of turbulence on the initiation of sediment motion. *Int. J. Sediment Research*, vol.18(1), 1-15.