

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Validación de una relación predictiva de laboratorio para la tasa de transporte de carga de lecho mediante experimentación en el canal multipropósito del campus Balzay

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Autores:

Jean Carlos Aguilar Aguilar

Daniel Stalin Bustamante Campoverde

Director:

Esteban Alonso Pacheco Tobar

ORCID:  0000-0001-9292-7193

Cuenca, Ecuador

2023-08-04

Resumen

El principal enfoque del presente estudio es la validación de relaciones predictivas de laboratorio para la determinación de la tasa de transporte de carga fondo en ríos de montaña, con lo cual se llevó a cabo pruebas a gran escala en un canal multipropósitos mediante la conformación de una capa de lecho inmóvil y una capa de lecho móvil.

Durante las pruebas, se introdujeron partículas granulares de mayor tamaño que fueron depositadas sobre la capa de lecho inmóvil previamente establecido. Finalmente, se estableció un periodo de observación de 45 minutos para determinar el transporte de carga de lecho, sin embargo, se podía finalizar el ensayo una vez las partículas ya no tengan movimiento.

El material transportado por la corriente fue retenido en trampas equipadas con mallas para posteriormente escurrirlo y pesarlo. Los datos recopilados fueron procesados y posteriormente analizados tanto cualitativamente como cuantitativamente. La mayoría de datos obtenidos se encuentran dentro de un rango de aceptabilidad (medio orden de magnitud). Las formulaciones d_{16} (2 mm) y d_{50} (9 mm) con sus respectivos diámetros mantuvieron un rendimiento ligeramente mejor respecto a formulaciones d_{84} (21 mm) y d_{90} (30 mm). La formulación d_{50} (9 mm) independiente del diámetro, mantiene el mejor rendimiento ya que solo el 22% de datos están presentes fuera del rango establecido. Los diámetros destacados en esta formulación fue el d_{90} (30 mm) para la pendiente alta y para la otra pendiente el diámetro destacado fue el menor (d_{16} (2 mm)). Las formulaciones d_{84} (21 mm) y d_{90} (30 mm) mostraron un buen rendimiento en pendientes altas (5%) con el diámetro medio (d_{50})(9 mm).

Palabras clave: transporte de carga, ríos de montaña, relación predictiva, experimentación



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

The main focus of this study is the validation of a laboratory predictive models for determining the bedload transport rate in mountain rivers. Large-scale tests were conducted in a multipurpose channel by creating an immobile bed layer and a mobile bed layer.

During the tests, larger granular particles were introduced and deposited onto the previously established immobile bed layer. Finally, a 45-minute observation period was established to determine the bedload transport, but the test could be concluded once the particles were no longer in motion.

The material transported by the current was collected in traps equipped with net meshes, drained, and weighed. The collected data were processed and subsequently analyzed both qualitatively and quantitatively.

Most of the obtained data fell within an acceptable range (1/2 order of magnitude). The formulations d_{16} (2 mm) and d_{50} (9 mm), with their respective diameters, maintained a slightly better performance compared to the formulations d_{84} (21 mm) and d_{90} (30 mm). The d_{50} (9 mm) formulation, regardless of the diameter used, maintains the best performance, as only 22% of the data falls outside the established range. The highlighted diameters in this formulation were d_{90} (30 mm) for the steeper slope, and for the other slope, the highlighted diameter was the smallest (d_{16})(2 mm). The d_{84} (21 mm) and d_{90} (30 mm) formulations showed good performance on steep slopes (5%) with the mean diameter (d_{50})(9 mm).

Keywords: bedload transport, mountain rivers, best predictors, experimentation



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

Capítulo 1. Introducción y Objetivos.....	11
1.1 Antecedentes, Problemática y Justificación	11
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo general	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
Capítulo 2. Marco Teórico	15
2.1 Procesos de transporte de carga de lecho.....	15
2.2 Principales modelos y relaciones para predicción de tasas de transporte de fondo	19
2.2.1 Relación predictiva de laboratorio realizada en laboratorio de hidráulica de la	
Universidad de Cuenca	21
Capítulo 3. Materiales y Métodos	26
3.1 Metodología de ensayo para recolección de datos.....	26
3.2 Caracterización de material para la conformación del lecho en el canal	26
3.2.1 Procedencia del material	26
3.2.2 Forma de las partículas	27
3.3 Diseño de la experimentación	30
3.3.1 Zona de estudio.....	31
3.3.2 Modelo Físico	32
3.3.2.1 Configuración de lecho inmóvil	32
3.3.2.2 Relación entre el área de partículas grandes y el área total	33
3.3.2.3 Configuración de lecho móvil	35
3.3.2.4 Control de flujo.....	36
3.3.2.5 Obtención de material transportado	37
Capítulo 4. Resultados y Discusión.....	41
4.1 Procesamiento de información y datos experimentales	41
4.2 Análisis de resultados para variables de estudio	42
4.2.1 Validación cualitativa.....	42
4.2.2 Validación cuantitativa.....	44
4.2.3 Determinación de exponentes para la relación predictiva.....	52
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones.....	55
5.1 Conclusiones.....	55
5.2 Recomendaciones	57
Referencias Bibliográficas	58
Anexos.....	61
Anexo A. Tabulación de resultados medidos en campo	61

Anexo B. Parámetros linealizados por cada modelo potencial de cada diámetro característico.....	70
Anexo C. Anexos fotográficos.....	72

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de cuerpo libre de una partícula sobre el lecho	15
Figura 2. Diagrama de Shields (1936). Tomado de Allen (1997). Fuente: (Vásquez, 2008) 18	
Figura 3. Masa mínima de la muestra de ensayo. Fuente: (NTE INEN 696, 2011).....	27
Figura 4. Formas típicas de partículas de grano grueso.	27
Figura 5. Sedimentos del río Tomebamba con (a) material húmedo y (b) material seco para obtención de humedad	28
Figura 6. Curva granulométrica del material granular recolectado del canal multipropósitos	29
Figura 7. Distribución del tamaño del grano para prototipo y modelo. Fuente: Carrillo et al., 2022	30
Figura 8. Vista en plata de emplazamiento general de canal multipropósitos de Balzay. Fuente: Pacheco, 2016. Tomado de: Delgado & Orellana, 2023.....	31
Figura 9. Formación de capa de lecho inmóvil para experimentación en el canal multipropósitos del campus Balzay	32
Figura 10. Capa de lecho móvil conformada.....	33
Figura 11. Relación del área de partículas grandes respecto al área total de lecho inmóvil.	34
Figura 12. Obtención de área de roca a ser colocada con referencia al área de una porción de madera	34
Figura 13. Conformación de capa de lecho móvil para experimentación en el canal multipropósitos del campus Balzay	35
Figura 14. Capa de lecho móvil conformada.....	36
Figura 15. Dimensiones del vertedero triangular. Fuente: Delgado & Orellana, 2023.....	37
Figura 16. Colocación de trampas al final del tramo experimental para recolección de material transportado.....	38
Figura 17. Trampas con material recolectado para posteriormente ser escurrido y pesado	39
Figura 18. Balanza digital CAMRY EP 120	40
Figura 19. Comparación entre las tasas de transporte de carga de fondo adimensionales entre datos experimentales y sus valores correspondientes calculados con modelos potenciales para diámetros característicos d_{15} , d_{50} , d_{84} y d_{90} en (a) pendiente de 3% y (b) pendiente de 5%	43
Figura 20. Comparación entre tasas de transporte adimensionales medidas y calculadas con parámetros de los diámetros característicos d_{16} , d_{50} , d_{84} y d_{90} mediante (a) fórmula de modelo potencial d_{16} , (b) fórmula de modelo potencial d_{50} , (c) fórmula de modelo potencial (d_{84}), (d) fórmula de modelo potencial d_{90}	48
Figura 21. Comparación entre las tasas de transporte adimensionales medidas y calculadas con fórmulas halladas mediante regresión lineal y utilizado los parámetros de los diámetros característicos d_{16} , d_{50} , d_{84} y d_{90} para (a) formula nueva d_{16} para modelo potencial, (b) formula nueva d_{50} para modelo potencial, (c) formula nueva d_{84} para modelo potencial y (d) formula d_{90} para modelo potencial.....	51
Figura 22. Resultados para la tasa de transporte de carga de fondo adimensional con las nuevas formulaciones utilizado un análisis de regresión lineal para el diámetro d_{16} , d_{50} , d_{84} y d_{90}	54
Figura 23. Desbroce de vegetación en los alrededores del canal.....	72
Figura 24. Conformación de capa de lecho móvil.....	73
Figura 25. Ejecución de experimento	73

Figura 26. Finalización de experimento.....74

Índice de tablas

Tabla 1. Ecuaciones para calcular la tasa de transporte de carga de fondo en ríos con lecho de grava	20
Tabla 2. Resumen de resultados experimentales	41
Tabla 3. Parámetros linealizados con resultados obtenidos a partir del diámetro característico d ₁₆	52
Tabla 4. Coeficientes y exponentes obtenidos para cada diámetro característico.....	53
Tabla 5. Parámetros estadísticos para cada modelo de regresión por cada diámetro característico.....	53
Tabla 6. Datos obtenidos con pendiente del 3% y caudal aproximado de 65 l/s	61
Tabla 7. Datos obtenidos con pendiente del 3% y caudal aproximado de 85 l/s	61
Tabla 8. Datos obtenidos con pendiente del 3% y caudal aproximado de 105 l/s	62
Tabla 9. Datos obtenidos con pendiente del 3% y caudal aproximado de 125 l/s	63
Tabla 10. Datos obtenidos con pendiente del 3% y caudal aproximado de 145 l/s	63
Tabla 11. Datos con pendiente del 3% y caudal aproximado de 165 l/s	64
Tabla 12. Datos obtenidos con pendiente del 3% y caudal aproximado de 165 l/s (prueba repetida)	64
Tabla 13. Datos obtenidos con pendiente de 3% y caudal aproximado de 185 l/s	65
Tabla 14. Datos obtenidos con pendiente del 3% y caudal aproximado de 207 l/s	65
Tabla 15. Datos obtenidos con pendiente de 5% y caudal aproximado de 65 l/s	66
Tabla 16. Datos obtenidos con pendiente del 5% y caudal aproximado de 85 l/s	66
Tabla 17. Datos obtenidos con pendiente del 5% y caudal aproximado de 105 l/s	67
Tabla 18. Datos obtenidos con pendiente de 5% y caudal aproximado de 125 l/s	67
Tabla 19. Datos obtenidos con pendiente del 5% y caudal aproximado de 145 l/s	67
Tabla 20. Datos obtenidos con pendiente del 5% y caudal aproximado de 165 l/s	68
Tabla 21. Datos obtenidos con pendiente del 5% y caudal aproximado de 186 l/s	69
Tabla 22. Datos obtenidos con pendiente del 5% y caudal aproximado de 200 l/s	69
Tabla 23. Parámetros linealizados con d ₅₀	70
Tabla 24. Parámetros linealizados con d ₈₄	70
Tabla 25. Parámetros linealizados con d ₉₀	71

Dedicatoria

A mis padres, Wilson y Marlene, quienes siempre estuvieron apoyándome y guiándome en este camino académico y en la vida misma.

A mis amigos, Marco, David, Kevin, Juanpi, Cristo y Gerardo, por los momentos compartidos inolvidables y únicos.

A todos quienes formaron parte de este hermoso camino de formación.

Daniel Stalin Bustamante Campoverde

A mis amados padres, Carlos y María del Carmen, cuya guía y aliento han sido fundamentales para poder alcanzar este logro significativo en mi vida.

A mis hermanas Karen, Samantha y hermano Emiliano, quienes han compartido tanto alegrías como desafíos en este trayecto hacia la titulación, su compañía ha sido impulso para seguir adelante.

A mi abuelita Maura y toda mi familia quienes han estado siempre pendientes de mí persona y me han brindado su apoyo incondicional con palabras de aliento.

A todos mis amigos que me han acompañado en este proceso de formación y han compartido inolvidables momentos que han dejado huellas imborrables.

Jean Carlos Aguilar Aguilar

Agradecimientos

A nuestro tutor de tesis, Ing. Esteban Pacheco, que con su apoyo y esfuerzo nos acompañó durante el desarrollo de este trabajo de titulación.

De manera especial, a la Ing. Verónica Carrillo, por ser una excelente mentora que siempre nos brindó ayuda y soporte en la realización del trabajo de titulación.

A todos los docentes que a lo largo de esta formación han aportado su valioso conocimiento, apoyo y orientación para nuestro crecimiento personal, intelectual y profesional.

Agradecimiento especial a los trabajadores de áreas verdes del campus Balzay, que siempre estuvieron prestos a colaborar en el desarrollo del trabajo de titulación.

Agradecer también a Diego B., Bernardo A., Cristóbal T., Karen E., por su esfuerzo y compromiso que ha sido fundamental para llevar con éxito las simulaciones realizadas en el canal multipropósitos.

De manera general a la Universidad de Cuenca que a lo largo de estos años nos enseñó que con la exigencia se consigue la excelencia.

Jean Carlos Aguilar Aguilar

Daniel Stalin Bustamante Campoverde

Capítulo 1. Introducción y Objetivos

1.1 Antecedentes, Problemática y Justificación

El fenómeno de transporte de sedimentos o arrastre de partículas se producen debido a las fuerzas de arrastre que son generadas por el flujo del fluido sobre las partículas, lo que lo convierte en un tema de fundamental importancia para su comprensión y estudio, ya que no solo tiene una gran relevancia en procesos hidráulicos, sino que también interviene en otras disciplinas como la geomorfología y la ingeniería ambiental (Niño, 2004). Un análisis detallado o profundo sobre este fenómeno en los cursos de agua es de vital importancia para determinar parámetros de diseño y las condiciones a las que estará sometida cualquier obra de aprovechamiento hidráulico. La comprensión profunda del proceso de arrastre de sedimentos nos permite anticipar y abordar de manera “efectiva” los desafíos asociados con la construcción y operación de proyectos hidráulicos, así como también garantizar su eficiencia y sostenibilidad en el tiempo. Como un ejemplo asociado a la magnitud de importancia que tiene este fenómeno en obras hidráulicas, se menciona el complejo de hidroeléctrico Paute, proyecto el cual a cuyos embalses se estima que estarían llegando anualmente un volumen de sedimento en el orden de 2.4 millones de metros cúbicos (Pacheco & Carrillo, 2014).

Los modelos matemáticos o expresiones desarrolladas para predecir el umbral de movimiento de partículas consideran aspectos como la variación vertical de las velocidades de flujo, el esfuerzo de corte que el agua ejerce sobre el lecho de cause y las propiedades de las partículas del sedimento, dicho de otra manera, los modelos toman en cuenta la interacción entre la hidrodinámica del flujo y las características del sedimento para determinar cuándo comenzaran a moverse (Rijn, 1984) en suelos granulares, el inicio del movimiento del lecho se produce cuando la fuerza del flujo del fluido es lo suficientemente grande para vencer la resistencia combinada generado por el peso de la partícula y los efectos friccionantes del mismo, pero si el fondo contiene cantidades importantes de limos o arcillas, adicionalmente a lo expuesto se debe adicionar la influencia que tiene los efectos de cohesión. En la literatura técnica, existen diversas ecuaciones asociadas al fenómeno del movimiento incipiente y transporte de carga de lecho, pero de acuerdo a un análisis de comparación entre las distintas ecuaciones se ha logrado registrar diferencias de varias órdenes de magnitud para los mismos datos de entrada, dado que las ecuaciones son válidas y útiles en los diferentes contextos y condiciones especifican que han sido desarrolladas como pueden ser: escenarios particulares de laboratorios, cauces anchos y de llanura, rangos limitados de pendientes o caudal, entre otras (Pacheco & Carrillo, 2014). Entre las ecuaciones que consideran la descarga específica de flujo, se destaca principalmente la de Schoklitsch (1962). Estudios

comparativos (Georgiev, 1990), usando información de ríos de montaña han demostrado que para esa ecuación la predicción de tasas de sedimentos es adecuada para ríos con pendientes menores al 3%. Diversas expresiones han sido desarrolladas considerando el esfuerzo cortante del material de lecho, como por ejemplo las propuestas por (Einstein, 1942), que no considera el esfuerzo cortante crítico y asume una distribución uniforme de partículas en un lecho plano. La ecuación de (Meyer-Peter & Muller, 1948), validada con datos de ríos de lecho de arena y grava. Sin embargo, (Carson, 1987) esta ecuación tiende a subestimar la tasa de transporte cuando se lo calcula basándose en el d_{50} del lecho superficial y por otro lado cuando se trabaja con el d_{50} de la capa de lecho subsuperficial la ecuación tiende a sobreestimar dicha tasa. Como vemos no existe una única relación que permita establecer tasas de transporte para situaciones específicas en ríos de zonas montañosas, como podría ser pendientes elevadas, transiciones entre montaña y llanura, entre otros aspectos complejos de la morfología fluvial. Debido a esto, se requiere llevar a cabo más estudios que aborden de manera adecuada estos escenarios.

Sin embargo, la determinación de la tasa de carga de lecho en ríos de montaña es un desafío debido a las diferentes condiciones ambientales complejas que se pueden presentar y las variables que caracterizan a los ecosistemas, de igual manera las mediciones in situ pueden resultar ser muy costosas, peligrosas y requerir mucho tiempo. Por lo tanto, es fundamental contar con relaciones predictivas basadas en pruebas de laboratorio para estimar de manera precisa la tasa de carga de lecho en ríos de montaña.

En los últimos años, se han formulado diversas relaciones para representar el transporte de carga de fondo, basándose en las propiedades y características de la capa 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 del sedimento, C_s corresponde a la concentración media del sedimento y δ_s representa la altura de la capa de carga de lecho. En este tipo de ecuaciones podemos nombrar entre los más importante la del modelo simplificado propuesto por Nielsen (1992) y la formulación propuesta por Van Rijn (1984).

De la misma manera (Carrillo et al, 2022) se ha establecido una relación adimensional para lechos de grava en diferentes pendientes usando modelos físicos de pequeña escala que simulan las típicas características de cauces de montañas. Estos estudios mediante técnicas de regresión por pasos han identificado parámetros predictores a partir de un amplio conjunto de variables independientes (pendiente del canal S_o , porcentaje de área ocupada por partícula grandes e inmóviles al área total LP , caudal Q , profundidad de flujo Y , velocidad media V_m , velocidad superficial V_{ws} , esfuerzo cortante τ , velocidad cortante V_*). El estudio

estableció modelos lineales y potenciales para diferentes diámetros y parámetros representativos, concluyendo que el modelo potencial se ajusta de mejor manera a los datos obtenidos en el modelo físico. Las relaciones tienen la forma de:

$$q = C + aS_o + b\%LP + cQ + dY + eV_m + fV_{ws} + g\tau + hV_* \quad (1)$$

$$q = C * S_o^a * \%LP^b * Q^c * Y^d * V_m^e * V_{ws}^f * \tau^g * V_*^h \quad (2)$$

En este contexto, se reconoce la necesidad de llevar a cabo estudios complementarios que validen y/o adopten ecuaciones para predecir la tasa de transporte en ríos de montaña, y considerando que se dispone de una relación potencial para la región, lo que se plantea es realizar un análisis experimental que permita validar los exponentes experimentales de dicha ecuación bajo condiciones mejoradas de escala y para una caracterización específica del material de fondo. El estudio propuesto tendrá como objetivo la validación experimental de la relación potencial existente, permitiendo mejorar su precisión y aplicabilidad bajo condiciones locales y contribuir así al avance del conocimiento en el campo de transporte de sedimentos en ríos de montaña.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Aportar el entendimiento de proceso de transporte de carga de lecho mediante la validación de relaciones predictivas de laboratorio para ríos de montaña.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar de manera detallada el material representativo de procesos de transporte para experimentación.
2. Definir escenarios de experimentación considerando las variables significativas de la relación predictiva de laboratorio.
3. Realizar experimentación a gran escala para validación de relaciones predictivas de laboratorio.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Procesos de transporte de carga de lecho

El movimiento de flujos en ríos, canales y zonas costeras está acompañado por la carga de sedimentos, que se divide en dos categorías principales: el transporte de sedimentos en suspensión y el transporte de sedimentos arrastrados y depositados por la corriente.

El transporte de sedimentos se define como un proceso geomorfológico el cual es fundamental y está presente en la configuración del paisaje terrestre y fluvial del planeta. Los sedimentos se definen como partículas de diferentes tamaños los cuales pueden ser arrastrados por agua, viento o hielo desde su lugar de origen hasta su lugar de deposición.

El transporte de sedimentos ocurre debido a la acción mecánica de la corriente de agua sobre el lecho. En otras palabras, la energía cinética de la masa de agua se transfiere al sedimento, lo que provoca el movimiento de las partículas sólidas (Vázquez, 2008). El transporte de sedimentos se puede definir como el proceso a través del cual se transportan arroyos, ríos o material de lecho de canales artificiales (García, 2008). Sin embargo, para (Bagnold, 1956) el transporte de carga de lecho se define como aquel que ocurre en contacto continuo con la superficie del lecho y es impulsado únicamente por la gravedad. Por otro lado, para (Einstein, 1950) el transporte de carga de fondo es aquel que ocurre al deslizarse, rodar y saltar sobre la superficie de fondo, estos procesos ocurren en una capa delgada que se aproxima a dos veces el diámetro del sedimento denominada capa de carga de fondo.

El transporte de sedimentos comienza cuando se reúnen las condiciones necesarias para lograr que una partícula estática en el lecho se mueva, este movimiento se conoce como movimiento incipiente (Yang, 1996). Para que el movimiento de una partícula inicie con el movimiento se necesita alcanzar las condiciones críticas las cuales estarían en función de las fuerzas que actúan sobre una partícula deposita en el fondo de un cuerpo de agua.

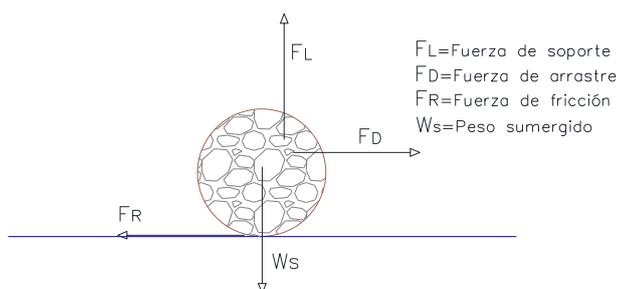


Figura 1. Diagrama de cuerpo libre de una partícula sobre el lecho

El movimiento incipiente entonces se podría definir como el equilibrio entre las fuerzas actuantes (fuerzas de arrastre y empuje) y fuerzas resistentes (fuerza del peso sumergido y fuerza de resistencia). Por lo tanto, el movimiento incipiente se tendrá cuando se cumpla unas de las siguientes condiciones mostradas en la ecuación 1 (Yang, 1996):

$$F_L = W_s \quad (3)$$

$$F_R = F_D \quad (4)$$

Para que el balance de fuerzas se proporcione se puede tener diferentes aproximaciones, tales como el esfuerzo cortante crítico, la velocidad de flujo en el fondo, entre otros que permitan mantener una igualdad entre el momento generado por la sumatoria de las fuerzas horizontales y el momento generado por la sumatoria de las fuerzas verticales.

Los modelos matemáticos utilizados para predecir el inicio del movimiento de la carga de fondo en un flujo bidimensional consideran factores como la variación vertical de las velocidades, el esfuerzo de corte ejercido por el agua sobre el lecho del cauce y las características de las partículas que componen el material sedimentario (Pacheco T. & Carrillo S., 2014).

Para la distribución de velocidades se establece un perfil logarítmico en la zona turbulenta (Schlichting, 1979; von Kármán, 1934; Vanoni, 1941; Schetz, 1993), pudiendo aproximarse para el caso de flujo laminar uniforme (Chen, 1990). Para un flujo uniforme estacionario, el esfuerzo cortante está representado mediante:

$$\tau_0 = \rho g y_n \text{sen}(\theta) \quad (5)$$

Donde:

ρ = la densidad del fluido

g = aceleración de la gravedad

y_n = la altura media del flujo

$\text{sen}(\theta)$ = pendiente del lecho

Obtenido el esfuerzo cortante del lecho se permite definir la velocidad de corte V_* como:

$$V_* = \left(\frac{\tau_0}{\rho} \right)^{0.5} \quad (6)$$

Los dos parámetros obtenidos (esfuerzo de corte y velocidad cortante), proporcionan una manera directa de caracterizar el potencial de flujo para transportar el sedimento. Por otro lado, un factor importante de la modelación de transporte de sedimentos en ríos, es la forma y tamaño de la partícula del sedimento que condicionan la rugosidad y afectan la distribución de las velocidades. En cuanto a la rugosidad, este factor no es constante en términos de distancia y tiempo debido a que los ríos sufren procesos constantes de erosión y deposición de material, por lo que se mantendrá un lecho en constante movimiento que provoca cambios en la rugosidad.

Volviendo a la ecuación (3) y (4), el inicio del movimiento de carga de fondo se produce cuando las fuerzas efectivas del fluido, es decir, las fuerzas que actúan sobre las partículas sólidas, superan la resistencia combinada generada por el peso de las partículas y los efectos friccionantes. Esta condición final puede expresarse en función del ángulo de reposo de las partículas, lo que determina la capacidad de una partícula para permanecer en reposo sobre el lecho o ser movilizada por la corriente (Van Rijn, 1993).

Una de las relaciones que más destaca en el ámbito de transporte de carga de lecho, de acuerdo a Shields (1936), donde el parámetro de estabilidad está definido en:

$$\tau_x = \frac{\tau_0}{[\rho(s-1)gd_s]} \quad (7)$$

Donde:

s = peso específico relativo de las partículas

d_s = diámetro característico de las partículas

Esta establecido experimentalmente que el movimiento inicial de la partícula en el lecho de un cuerpo de un cuerpo de agua ocurre a partir de un valor crítico τ_{x_c} del parámetro de estabilidad (Shields, 1936; Rouse, 1939; Vanoni, 1964). El valor crítico del parámetro de

estabilidad permite definir la condición de movimiento $\tau_x > \tau_{xc}$ como función del número de Reynolds de corte expresando en:

$$Re_* = \frac{V_* d_s}{\nu} \tag{8}$$

Donde:

ν = viscosidad cinemática del agua.

Para el material granular, algunos autores reportan valores para τ_{xc} menores a los propuestos por Shields (1936). De manera precisa 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.

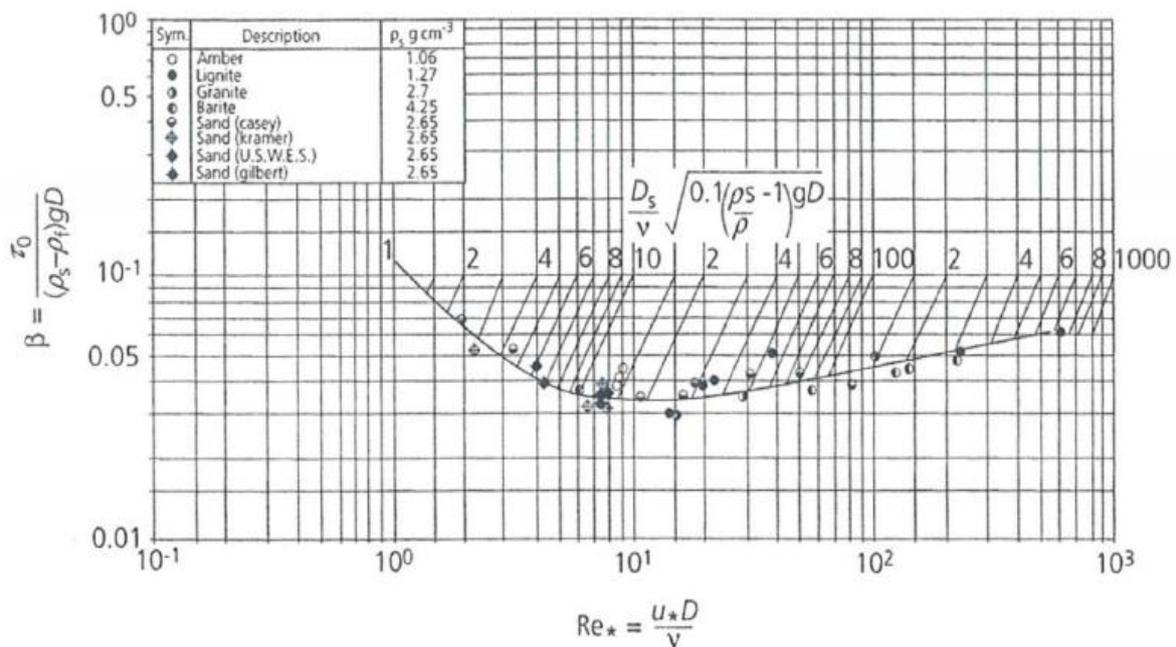


Figura 2. Diagrama de Shields (1936). Tomado de Allen (1997). Fuente: (Vásquez, 2008)

2.2 Principales modelos y relaciones para predicción de tasas de transporte de fondo

Tal y como se ha mencionado, el transporte de fondo en ríos se presenta mediante tres formas distintas:

- Rodadura
- Saltación
- Arrastre

Estas formas son las responsables del desplazamiento longitudinal de los materiales granulares que se encuentran en un lecho de río. El transporte de fondo ha sido objeto de estudio por diversos autores a lo largo de los tiempos, quienes han desarrollado diferentes formulaciones para poder determinar el caudal sólido circundante asociado a esta tipología de transporte.

Se han recopilado diversas formulaciones propuestas por investigadores que han dedicado sus esfuerzos a estudiar este fenómeno. Estas formulaciones, basadas en observaciones y datos experimentales buscan cuantificar la cantidad de sólidos que se desplazan a lo largo del río.

Diversos enfoques y formulaciones han sido desarrollados para abordar la predicción de tasas de sedimentos en el transporte de carga de lecho. Estas formulaciones han sido propuestas por distintos investigadores y se basan en diversas características de los sedimentos, tales como su uniformidad o no uniformidad, así como en las condiciones específicas de pendiente y la granulometría de los ríos estudiados.

El análisis de las ecuaciones existentes revela que los autores han empleado distintos enfoques para establecer la precisión y confiabilidad de sus predicciones. Algunos han definido rangos de tamaño de partículas para los cuales las estimaciones son más precisas y confiables, mientras que otros se han basado en propiedades físicas como el peso específico del material.

La diversidad de ecuaciones y enfoques demuestra la complejidad inherente en el proceso de predicción de tasas de sedimentos. La variabilidad en las características de los sedimentos y en las condiciones hidráulicas hace que el desarrollo de formulaciones precisas y confiables sea un desafío. A continuación, se presenta un extracto de las diversas ecuaciones que nos podemos encontrar de transporte de carga de lecho.

Tabla 1. Ecuaciones para calcular la tasa de transporte de carga de fondo en ríos con lecho de grava

Autor	Ecuación
Meyer-Peter & Müller (1932 - 1948)	$\left(\frac{KB}{KG}\right)^{3/2} * \frac{RS}{\left(\frac{\gamma s - \gamma}{\gamma}\right) D} = 0.047 + 0.25 * \frac{qs^{2/3}}{\left(\frac{\gamma s - \gamma}{\gamma}\right)^{1/3} * D * g^{1/3}}$ $KB = \frac{u}{\gamma^{2/3} \sigma^{0.5}}$ $KG = \frac{26}{D90^{1/6}}$
Einstein-Brown (1950)	$qs = \sqrt[2]{g * \left(\frac{\gamma s - \gamma}{\gamma}\right) * D50^3 * 40 * \frac{\gamma * Rh * Sf}{(\gamma s - \gamma) * D50}}$
Nielsen simplificado (1992)	$qs = Cs * \delta s * Vs$ $Cs = 0.65$ $\frac{\delta s}{ds} = 2.5(\tau * -\tau c)$ $\frac{Vs}{V*} = 4.8$ $ds = d50$ $V* = (g * \gamma n * \text{sen}(\theta))^{0.5}$
Schoklitsch (1943)	$qs = 2500 * sf^{\frac{3}{2}} * (ql - qc)$ $qc = 0.26 * \left(\left(\frac{\gamma s}{\gamma w}\right) - 1\right)^{\frac{5}{3}} * D40^{\frac{3}{2}} * S^{-1.17}$
Ecuación de Wright & Parker (2004)	$qw = U * H$ $U = 8.32 * \sqrt{g * H * sf} * \left(\frac{H}{ks}\right), ks = 3 * D90$ $H = \left(\Delta * \frac{R * D50}{sf} * \left(\frac{g^{0.5}}{U}\right)^{0.7}\right)^{20/13}$

$$\Delta = \left(\frac{\tau_s * -0.05}{0.7} \right)^{5/4}$$

$$q_b = u_b * \delta_b * C_b = 0.053(\Delta g)^{0.5} * d_{50}^{1.5} * D *^{-0.3} * T^{2.1}$$

$$D * = d_{50} \left(\frac{\Delta g}{v^2} \right)^{1/3}$$

Van Rijn (1993)

$$T = \frac{(u *')^2 - (u * \text{crit})^2}{(u * \text{crit})^2}$$

$$u *' = \frac{\sqrt{g}}{C'} U$$

$$C' = 18 \log \left(\frac{12h}{3d_{90}} \right)$$

Método de Duboys, formulación de Straub (1879,1935)

$$q_s = \frac{0.01003}{D_{50}^{3/4}} * \tau_o * (\tau_o - \tau_c)$$

$$\tau_c = 41.8 * D_{50}^{0.82} - 0.017 * \ln(454 * D_{50})$$

2.2.1 Relación predictiva de laboratorio realizada en laboratorio de hidráulica de la Universidad de Cuenca

El transporte de carga de lecho en ríos de montaña o en cuerpos de agua es un proceso hidrosedimentario de gran relevancia para la gestión de recursos hídricos y comprensión de los procesos fluviales, así mismo mantiene importancia en el aprovechamiento hidráulico en proyección de obras para la región.

Los canales empinados de lecho rugoso constituyen el componente principal de los sistemas de drenaje montañosos. Por lo tanto, el transporte de sedimentos en canales empinados influye en procesos como la morfología del paisaje, el enrutamiento de sedimentos durante eventos hidrológicos y la hidráulica de flujo en sistemas fluviales (Carrillo et al., 2021)

En laboratorios, se han llevado a cabo numerosos estudios para examinar las relaciones predictivas y establecer su aplicabilidad en diferentes condiciones, el objetivo principal de esta investigación es proporcionar una revisión exhaustiva y crítica de las relaciones predictivas de laboratorio existente para la región, destacando sus ventajas, limitaciones y áreas de mejora.

A través de un modelo físico que replica características de ríos con lecho de grava de alto gradiente se ha estudiado las tasas de transporte de carga de fondo. Para poder obtener los mejores predictores se realizó una regresión por pasos donde se consideraron variables independientes (pendiente del canal, relación entre el área ocupada por partículas grandes y la superficie del agua, el esfuerzo cortante límite y la velocidad cortante). Así mismo, se utilizaron los diferentes diámetros característicos (d_{16} , d_{50} , d_{84} y d_{90}) para no dimensionar las variables, y probar la influencia del tamaño de la partícula (Carrillo et al, 2022).

El estudio realizado en el laboratorio comprende de un desarrollo de análisis experimental que incluyó la simulación del transporte de carga de fondo con partículas de sedimento de forma natural con una distribución del tamaño del grano. Las características del material corresponden a la granulometría del río Tabacay debido a que su perfil presenta un alto gradiente y transporte de sedimentos, así como también la pendiente, el tamaño del material del lecho y la capacidad de transporte (Carrillo et al, 2022).

El análisis de transporte de carga de fondo es un proceso complejo que no solo depende de muchos parámetros hidráulicos, geométricos y propiedades físicas, sino también la interacción entre ellos, la cual a su vez contribuye a las altas incertidumbres reportadas para las tasas de transporte de carga de fondo. Con el fin de integrar las variables más relevantes involucradas en la mecánica del transporte de sedimentos, se utilizan parámetros adimensionales, los cuales permitirán desarrollar formulaciones empíricas o teóricas para la estimación de la tasa de transporte de sedimento (Carrillo et al, 2022). Las relaciones utilizadas para obtener parámetros hidráulicos adimensionales fueron propuestas por Parker (1979):

$$q = \frac{q_s}{R^{1/2} g^{1/2} d_s^{3/2}} \quad (9)$$

Donde:

q_s = tasa de transporte de carga de fondo volumétrica por unidad ($m^3/s/m$ o m^2/s)

R = gravedad específica del sedimento sumergido, el mismo se obtiene de $R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$, siendo ρ densidad del agua (kg/m^3) y ρ_s densidad del sedimento.

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

d_s = diámetro característico (m)

$$\tau = \frac{\tau_o}{\rho R g d_s} \quad (10)$$

Donde:

τ_o = esfuerzo cortante limite (N/m²), el mismo se obtiene de $\tau_o = \gamma Y S_o$, siendo γ peso específico del agua (N/m³), Y profundidad de flujo y S_o = pendiente del lecho (m/m).

$$q = \frac{q_s}{R^{1/2} g^{1/2} d_s^{3/2}} \quad (11)$$

Donde:

Q' = descarga de flujo (m³/s)

$$\tau = \frac{\tau_o}{\rho R g d_s} \quad (12)$$

Donde:

Y' = profundidad de flujo (m)

$$V = \frac{V'}{R^{1/2} g^{1/2} d_s^{1/2}} \quad (13)$$

Donde:

V' = velocidad de flujo (m/s)

Además, se ha demostrado que la presencia de partículas grandes en el lecho del río afectan la capacidad de transporte del lecho móvil disminuyendo la fuerza de tracción (a través de la tensión de corte) disponible para transportar sedimentos (Ghilardi, Franca & Schleiss, 2014).

Por lo tanto, con el fin de incluir la mayoría de variables independientes y procesos que definen el transporte de carga de lecho se ha incorporado a las variables adimensionales

anteriormente expuestas, el parámetro que representa la influencia de partículas grandes en el lecho de un río %LP.

Un parámetro importante para el proceso de transporte de fondo es el diámetro característico, el cual varios autores han utilizado los diámetros d_{16} , d_{50} , d_{84} y d_{90} como los diámetros característicos que representan de la mejor manera la distribución del tamaño del grano. Así el diámetro característico también se usó como variable independiente.

En el estudio realizado (Carrillo et al, 2022), se utilizaron modelos lineales y potenciales (mediante transformación logarítmica) para investigar el conjunto de configuración variables que describan eficientemente el fenómeno de transporte. A través, de una serie de combinaciones de variables, mediante un modelo descrito por una sola constante hasta un modelo que incluya todas las variables, se pudieron obtener predictores que mediante criterios de estadística se pudieron discernir los casos en el conjunto de parámetros identificados en donde las metodologías hacia adelante, hacia atrás y bidireccional diferente significativamente entre los tres procedimientos.

Finalmente, el análisis se realizó considerando la forma lineal y potencial mediante las ecuaciones (1) y (2).

Luego considerando cada diámetro representativo elegido se construyeron variables adimensionales para el modelado. Para cada diámetro característico se obtuvo un modelo lineal y potencial a través de una regresión lineal por pasos donde se obtuvo los parámetros resultantes que se muestran a continuación (Carrillo et al, 2022):

Para d_{16} :

$$q = -2.9723 + 11.4304S_o + 0.0002Q + 0.0521V_m + 0.3073V_{ws} + 2.9343V_* \quad (14)$$

$$q = 25.2041S_o^{1.7725} * V_m^{1.6447} * V_*^{1.1863} \quad (15)$$

Para d_{50} :

$$q = -1.1417 + 3.4858S_o - 0.2188\%LP + 0.0002Q + 0.0717V_m + 0.128V_{ws} + 1.9086V_* \quad (16)$$

$$q = 22.8516S_o^{1.7401} * V_m^{1.6447} * V_*^{1.2441} \quad (17)$$

Para d_{84} :

$$q = -0.6420 + 0.4472S_o - 0.0816\%LP + 0.0632V_m + 0.0832V_{ws} + 1.7111V_* \quad (18)$$

$$q = 0.6706S_o^{2.1940} * Q^{0.8201} * V_m^{0.7001} \quad (19)$$

Para d_{90} :

$$q = -0.5587 + 0.4985S_o - 0.0814\%LP + 0.0623V_m + 0.0641V_{ws} + 1.5789V_* \quad (20)$$

$$q = 0.9721S_o^{2.2791} * Q^{0.8048} * V_m^{0.7171} \quad (21)$$

Los parámetros que más influyen en el transporte de carga de fondo final son la pendiente (S_o) y la velocidad de flujo media adimensional (V_m), ya que se encuentran en todas las ecuaciones independiente de la forma de las ecuaciones y diámetro característico.

Capítulo 3. Materiales y Métodos

3.1 Metodología de ensayo para recolección de datos

En el presente estudio, se realizaron un total de 17 simulaciones en un canal a gran escala para investigar los efectos de dos pendientes diferentes, 5% y 3%, en el flujo de agua donde el rango del caudal establecido fue de 60 a 200 litros por segundo. De estas simulaciones, 8 correspondieron a la pendiente del 5%, mientras que 9 se enfocaron en la pendiente del 3%. Durante las pruebas, se midieron diversos parámetros para evaluar el comportamiento del flujo. Se tomaron mediciones de los calados de agua en tres secciones distintas a lo largo del ancho del canal: izquierda, medio y derecha. Además, se determinó las alturas a 1.6 metros aguas atrás en el vertedero en diferentes tiempos con el fin de asegurar un caudal constante o por lo menos no tan fluctuante para posteriormente poder calcular la velocidad media del flujo. La recopilación exhaustiva de mediciones realizadas en diversas secciones y en distintos momentos tuvo como objetivo obtener un conjunto completo de parámetros de flujo. Estos parámetros fueron promediados para obtener valores representativos y precisos. Además, la obtención de estos datos permitió una estimación más precisa de otros parámetros relacionados, como el esfuerzo cortante y la velocidad de corte. Se exploraron las correlaciones y discrepancias entre los valores reales de la tasa de transporte y aquellos estimados por cada ecuación con el objetivo de determinar cuál de ellas predice de manera más precisa la tasa de transporte en diferentes condiciones.

Para la simulación se conformó una capa de lecho inmóvil con partículas de gran tamaño simulando el lecho de un río de montaña y sobre esta una capa de lecho móvil de 10 cm con el material granular del río donde se encuentra la obra de toma (río Tomebamba). Cada prueba se estableció un rango de 45 minutos para determinar la tasa de transporte de carga de fondo, sin embargo, si antes de que se cumpla el tiempo establecido se determinaba que el material era completamente lavado o ya no había arrastre de partículas en la capa de lecho móvil se tendría que inmediatamente finalizar la prueba y tomar el tiempo en que se finalizó la prueba. Todo el material transportado fue depositado en trampas equipadas con mallas. Una vez finalizada cada prueba, se procedió con el escurrimiento y obtención del peso del material recolectado mediante una balanza colgante.

3.2 Caracterización de material para la conformación del lecho en el canal

3.2.1 Procedencia del material

En el proceso de simulación del transporte de sedimento, se consideró el material sedimentado presente en el propio canal de experimentación, el cual corresponde al material natural del lecho del río Tomebamba que fue arrastrado hacia el canal cuando se puso en

funcionamiento mediante la apertura de sus compuertas. Inicialmente, se recopilaron muestras de diferentes secciones del canal, centrándose principalmente en los primeros metros debido a la mayor concentración de material granular en esa zona.

Estas muestras de material fueron llevadas al laboratorio, donde se procedió a realizar el cuarteo y cribado inicial en estado húmedo. Este proceso permitió determinar el tamaño máximo nominal (TMN) de la muestra, lo que resultó en un valor de 19 mm. Con esta información, se consultó la tabla de la norma **NTE INEN 696** (Figura 3) para obtener la cantidad mínima recomendada de sedimento que se requería para realizar un análisis granulométrico en seco.

Tamaño nominal máximo, Aberturas cuadradas, en mm (pulgadas).	Tamaño de la muestra del ensayo Mínimo (kg)
9,5	1
12,5	2
19,0	5
25,0	10
37,5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300

Figura 3. Masa mínima de la muestra de ensayo. Fuente: (NTE INEN 696, 2011)

3.2.2 Forma de las partículas

Antes de comparar la granulometría presente en el canal con la granulometría promedio del material utilizado en las experimentaciones del laboratorio, se llevó a cabo una identificación visual de la forma de los sedimentos. El objetivo de esta observación cualitativa era asegurarse de que los sedimentos no tuvieran una forma angulosa que pudiera dificultar su arrastre o causar otros efectos no deseados durante el proceso de experimentación.

Como se puede apreciar en la figura 5, se encontró que los sedimentos presentaban una variación en su forma, desde subangular hasta well-rounded (forma redondeada), según se muestra en la figura 4.

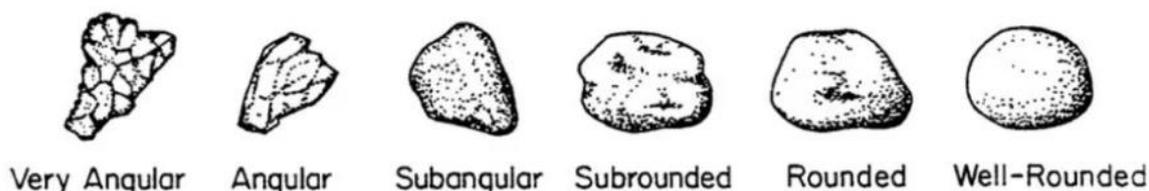


Figura 4. Formas típicas de partículas de grano grueso.



(22)



(23)

Figura 5. Sedimentos del río Tomebamba con (a) material húmedo y (b) material seco para obtención de humedad

3.2.3 Granulometría

Después de obtener el peso mínimo recomendado de muestra para el ensayo, se procedió a realizar la granulometría en seco mediante el cuarteo y cribado del material sedimentado del canal, que corresponde al material del río Tomebamba. La razón detrás de llevar a cabo esta granulometría completa y al ser una experimentación a gran escala era la de verificar si se estaba trabajando con un rango de tamaños de partículas similar al que tiene el río Tabacay.

En la figura 6 se muestra en detalle la granulometría obtenida del material del canal, y se pudo observar que era muy similar a la granulometría promedio del río Tabacay (figura 7).

Tanto para la granulometría del canal como para la del río Tabacay, se encontraron tamaños máximos de partículas alrededor de los 50 mm y diámetros medios cercanos a los 10 mm. Además, se verificó el diámetro mínimo utilizado en las expresiones (d_{16}), y se encontró que para ambos materiales era muy similar, con valores de aproximadamente 1.5 mm y 2 mm para el río Tabacay y el material del canal, respectivamente.

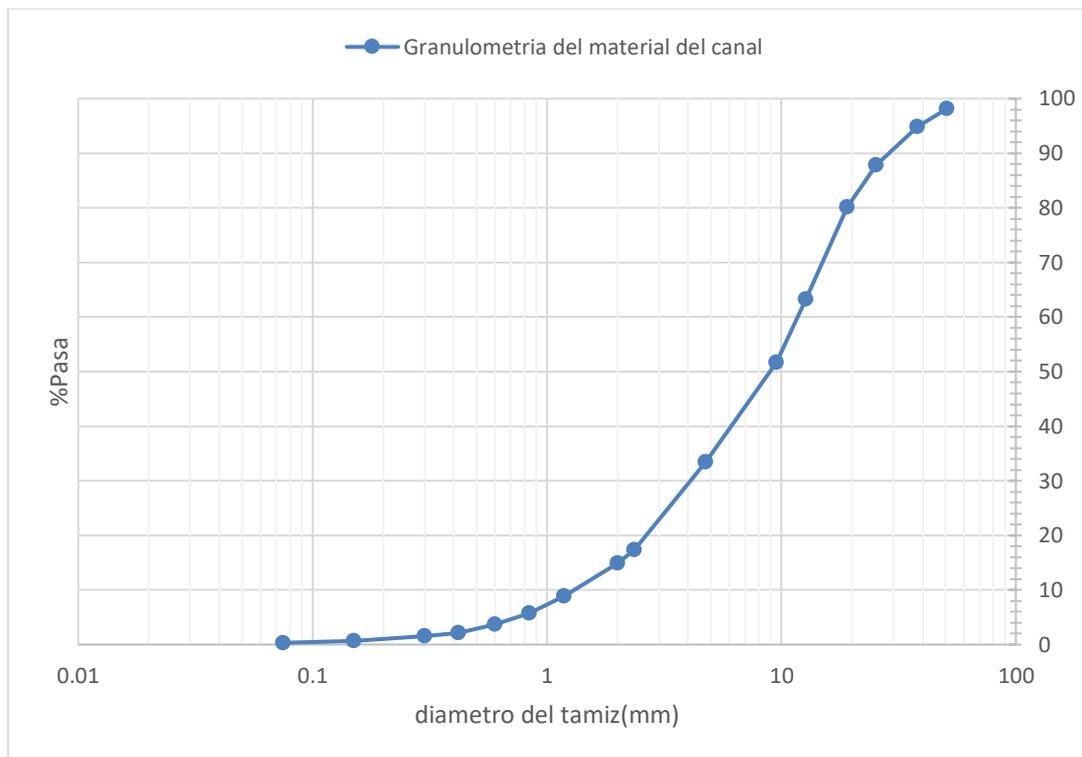


Figura 6. Curva granulométrica del material granular recolectado del canal multipropósitos

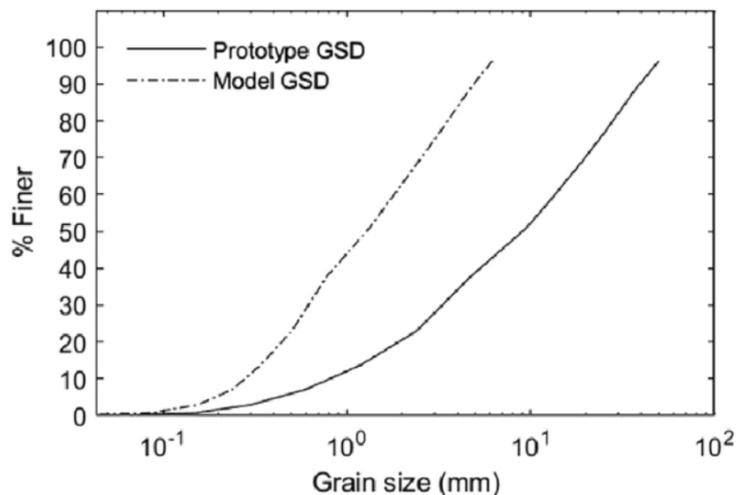


Figura 7. Distribución del tamaño del grano para prototipo y modelo. Fuente: Carrillo et al., 2022

3.2.4 Humedad

Como la experimentación se llevó a cabo en un canal de grandes dimensiones cerca de las orillas del río, una característica esencial fue la obtención de la humedad del material sedimentado, debido a la dificultad de transportar el material atrapado en las canastillas hacia el laboratorio para su posterior secado y pesado. Se optó por obtener muestras del material en cada canastilla correspondiente a cada pendiente de experimentación (3% y 5%) para determinar su contenido de humedad y permitir así la corrección de los pesos en la obtención de cada tasa de transporte.

3.2.5 Densidad y peso específico

Un parámetro crucial que se tomó en cuenta fue la determinación de la densidad de la muestra, ya que esta es un factor fundamental en cada una de las expresiones utilizadas en el laboratorio. Para obtener este dato, se siguió la norma técnica ecuatoriana **NTE INEN 857**, que proporcionó un valor de densidad de 2258 kg/m³.

3.3 Diseño de la experimentación

En el siguiente estudio se aborda el diseño de experimentación aplicado a la medición de la tasa de transporte de carga de fondo en ríos. El diseño de experimentación en campo para acondicionar un canal se presenta como un enfoque para investigar y estudiar de manera realista y acercándose a la realidad sobre el comportamiento hidráulico y sedimentario,

permitiendo la recolección de datos valiosos que podrían ser relevantes en investigaciones futuras.

3.3.1 Zona de estudio

Los ensayos fueron llevados a cabo en el canal multipropósito ubicado en la parroquia San Joaquín al noroeste de la ciudad de Cuenca en los predios de la Quinta de Balzay de la Universidad de Cuenca.

El canal mantiene una longitud de 70 metros desde el vertedero triangular hasta la compuerta que da paso al flujo hacia el canchón para modelos físicos y mantiene un ancho de 1.3 metros con una profundidad de 1.5 metros. Para el acondicionamiento de los ensayos se determinó un sector de 5 metros desde la abscisa 0+060 hasta la abscisa 0+065 del canal como se puede observar en la figura 8.



Figura 8. Vista en plata de emplazamiento general de canal multipropósitos de Balzay. Fuente: Pacheco, 2016.

Tomado de: Delgado & Orellana, 2023

3.3.2 Modelo Físico

3.3.2.1 Configuración de lecho inmóvil

Para las simulaciones a gran escala se formó una capa de lecho duro en el fondo del canal de tal manera que la máxima descarga con la que se iba a ensayar sea incapaz de mover el lecho.

Para alcanzar las pendientes (3% y 5%) con las que se realizaron las simulaciones se utilizaron rocas de gran tamaño y peso con una forma aplanada de tal manera que se pudiera formar un lecho uniforme que mantuviera la pendiente deseada, el proceso se puede observar en las figuras 9 y 10, el mismo proceso se llevo a cabo en la formación de las dos pendientes.

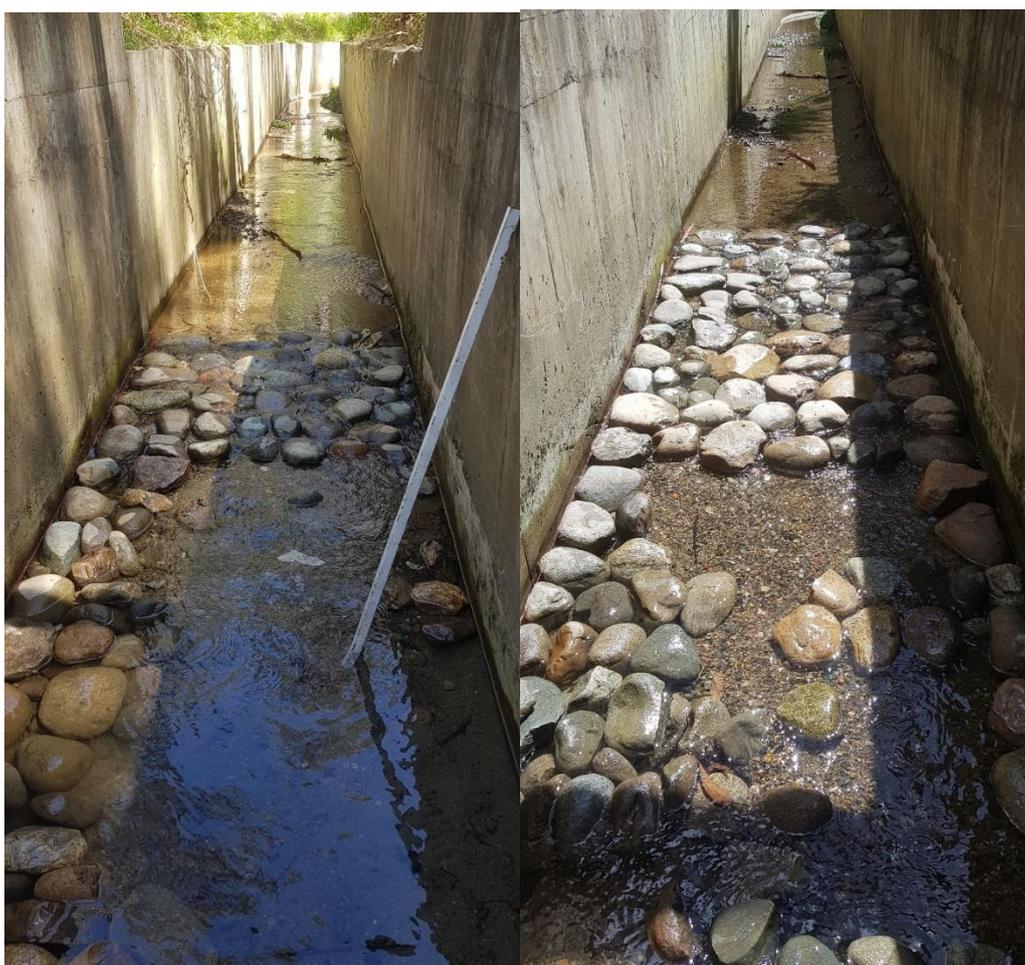


Figura 9. Formación de capa de lecho inmóvil para experimentación en el canal multipropósitos del campus Balzay



Figura 10. Capa de lecho móvil conformada

3.3.2.2 Relación entre el área de partículas grandes y el área total

Para que las simulaciones a gran escala se asemejaran más a las condiciones de campo de un río de alto gradiente dentro de la región, se distribuyeron partículas de gran tamaño aleatoriamente en el espacio sobre el lecho inmóvil tal y como se puede observar en la figura 11. El porcentaje de relación de entre el área de partícula grandes y el área total trabajo fue desde el 3% hasta 15%, por cada ensayo a realizar se sumaban aproximadamente el 1.5% de área para ello se determinaba el área de la partícula (piedra) a ser colocada y se colocaba aleatoriamente sobre la capa de lecho inmóvil.



Figura 11.Relación del área de partículas grandes respecto al área total de lecho inmóvil

Una de las condiciones que cumplen las partículas grandes colocadas es la capacidad de quedar inmóviles al flujo de agua al momento de realizar la ejecución de los ensayos. Se puede observar que la mayoría de piedras sobresalen sobre el lecho inmóvil asemejándose así a las partículas grandes existentes en los ríos de Montaña.

Por cada piedra colocada se determinaba el área de la misma mediante una aproximación con un área conocida en este caso, el área conocida es una porción de madera de 40x27 cm, como se observa en la figura 12.

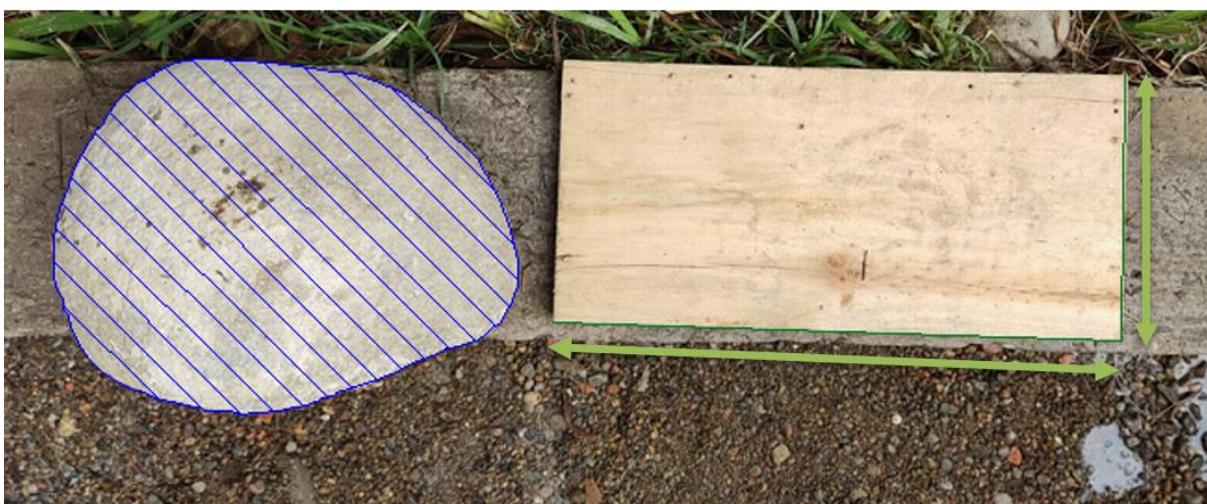


Figura 12. Obtención de área de roca a ser colocada con referencia al área de una porción de madera

3.3.2.3 Configuración de lecho móvil

Para la conformación del lecho móvil se utilizó la granulometría del lecho del río Tomebamba presentada en el apartado 3.2. Se definió entonces una capa de lecho móvil de 10 centímetros por encima de la capa de lecho inmóvil obteniendo un volumen de 0.6 metros cúbicos de material granular como se muestra en la figura 13 y 14.



Figura 13. Conformación de capa de lecho móvil para experimentación en el canal multipropósitos del campus Balzay



Figura 14. Capa de lecho móvil conformada

3.3.2.4 Control de flujo

En la obra de toma, luego de la zona de transición, el flujo de agua pasa a través de un vertedero triangular de pared delgada. El vertedero triangular mantiene un ángulo recto, de

esta manera se permite mantener controlado el flujo de agua que se dirige hacia el canal conformado por una base y paredes de hormigón. Las dimensiones del vertedero ubicado en la obra de captación se visualizan en la figura 15.

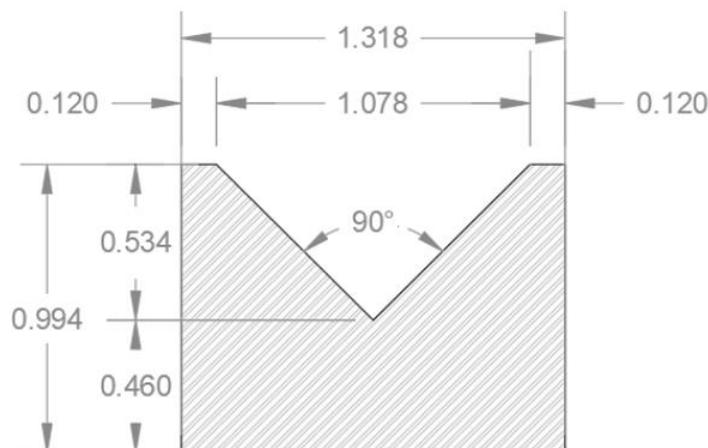


Figura 15. Dimensiones del vertedero triangular. Fuente: Delgado & Orellana, 2023

La calibración del vertedero se llevó a cabo por (Delgado & Orellana, 2023), donde mediante simulación y mediciones en campo se obtuvieron un base de datos en base a caudales ensayados, para luego mediante un análisis de regresión línea se pudo ajustar el rango de caudales analizados y obtener un coeficiente de descarga que permitió definir una ecuación para la descarga de flujo sobre el vertedero en función de la altura de agua (h) medida a 1.6 metros aguas atrás del mismo. La expresión se define:

$$Q = 1.391 \times h^{2.508} \quad (22)$$

Mediante la ecuación y controlando la altura de agua sobre el vertedero a 1.6 metros agua atrás los ensayos se llevaron a cabo mediante unas 8 simulaciones con un rango de caudales de 60 a 200 litros por segundo, donde cada simulación se aumentaba 20 litro por segundo hasta llegar al límite establecido.

3.3.2.5 Obtención de material transportado

Por cada ejecución experimental, el material arrastrado por el flujo de agua fue recogido por 2 trampas ubicadas al final del tramo experimental, las trampas mantenían dimensiones de 50x40 cm y a cada de estas fue colocada una malla de que mantenía aberturas de 3 mm. A

cada trampa fueron colocadas piedras de gran tamaño para evitar que por el peso del material recogido estas fueran volteadas antes de poder terminar las simulaciones.



Figura 16. Colocación de trampas al final del tramo experimental para recolección de material transportado

Por cada ensayo realizado las trampas eran volteadas al finalizar la prueba (figura 17) con el fin de evitar el ingreso de material mientras la compuerta en la derivación lateral de la captación era cerrada, para los primeros 8 ensayos realizados con una pendiente del 3% el tiempo de cada ensayo fue de 45 minutos para cada uno ya que el transporte de carga de fondo es lento y tiende a no ser arrastrado todo el material ubicado sobre el lecho inmóvil. Por otra parte, para los posteriores ensayos realizados con una pendiente del 5% el tiempo de ejecución de cada ensayo fue variable ya que todo el material era transportado en un lapso de tiempo menor cada vez que el caudal por cada ensayo aumentaba.

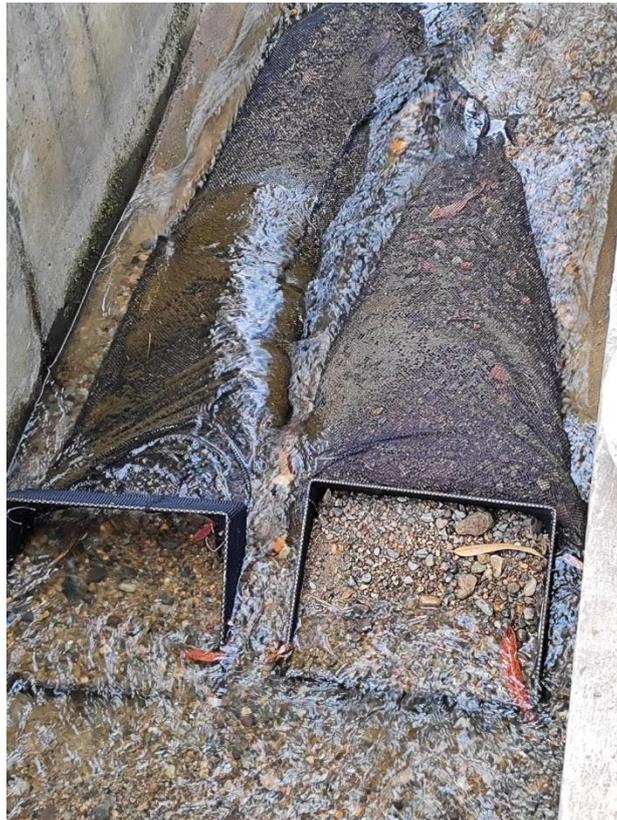


Figura 17. Trampas con material recolectado para posteriormente ser escurrido y pesado

Una vez cerrada la compuerta de la obra de toma, se procedía a la extracción de material de las trampas mediante baldes, el material de cada balde fue regado sobre saquillos extendidos en el suelo de manera que se pueda escurrir el exceso de agua para posteriormente el material ser colocado en saquillos de aproximadamente 12 kg y pesados mediante una balanza digital colgante CMRY EP120 (figura 18) cuya capacidad máxima es de 20 kg y mantiene una precisión de 0.1 kg. El peso obtenido se tuvo que corregir por humedad ya que las simulaciones realizadas en el laboratorio de la Universidad de Cuenca el material fue secado.



Figura 18. Balanza digital CAMRY EP 120

Para cálculos posteriores se utilizó la siguiente expresión tomada de (Bunte, Swingle & Abt, 2007), esto debido a que las trampas ubicadas no ocupan el ancho completo del canal por lo tanto habrá que realizar una aproximación del material que no fue recogido mediante:

$$Q_b = \frac{m_{s1} * w_1}{w_s * t_{s1}} + \frac{m_{s2} * w_2}{w_s * t_{s2}} \quad (23)$$

Donde:

m_s = masa de carga de fondo muestreada

w = ancho de representado por cada trampa

w_s = ancho de trampa

t_s = duración del tiempo de muestreo (las trampas fueron colocadas simultáneamente por lo tanto el tiempo de muestreo será el mismo para las dos trampas)

Capítulo 4. Resultados y Discusión

4.1 Procesamiento de información y datos experimentales

Dentro del anexo 1 se detalla los parámetros medidos en el canal a gran escala de cada una de las pruebas. A continuación, en la tabla 2 se muestra los resultados de las simulaciones realizadas, detallando los valores de cada variable dependiente como independiente.

Tabla 2. Resumen de resultados experimentales

Con tres canastillas											
Prueba	Pendiente (%)	%LP	Caudal (m3/s)	Velocidad media (m/s)	Calado (m)	Tiempo (s)	Peso retenido en canastas (kg)	Peso retenido estimado total (kg)	Peso seco total (kg)	Humedad (%)	Tasa (kg/s)
1	3	0.00	0.061	0.162	0.308	2700	88.15	114.47	106.59	7.4	0.0395
2	3	0.00	0.085	0.210	0.330	2700	183.21	237.93	221.53	7.4	0.0820
3	3	3.65	0.105	0.249	0.344	2700	189.76	246.44	229.46	7.4	0.0850
4	3	6.82	0.125	0.277	0.367	2700	254.34	330.31	307.55	7.4	0.1139
5	3	8.62	0.145	0.306	0.384	2700	269.71	350.27	326.14	7.4	0.1208
6	3	10.42	0.165	0.326	0.411	2700	262.25	340.59	317.12	7.4	0.1175
6*	3	10.42	0.165	0.329	0.406	2700	398.53	517.56	481.90	7.4	0.1785
7	3	13.18	0.186	0.356	0.423	2700	379.90	493.38	459.38	7.4	0.1701
8	3	15.53	0.208	0.382	0.439	2700	384.92	499.89	465.45	7.4	0.1724
Con dos canastillas											
Prueba	Pendiente (%)	%LP	Caudal (m3/s)	Velocidad media (m/s)	Calado (m)	Tiempo (s)	Peso retenido en canastas (kg)	Peso retenido estimado total (kg)	Peso seco total (kg)	Humedad (%)	Tasa (kg/s)
9	5	2.94	0.063	0.123	0.413	930	507.0	855.92	786.89	8.8	0.8461
10	5	5.47	0.084	0.159	0.426	830	431.7	728.88	670.09	8.8	0.8073
11	5	7.40	0.103	0.186	0.448	735	443.7	749.15	688.73	8.8	0.9370
12	5	9.48	0.125	0.216	0.467	612	408.5	689.60	633.98	8.8	1.0359
13	5	11.14	0.145	0.242	0.482	499	509.1	859.54	790.22	8.8	1.5836
14	5	11.87	0.165	0.268	0.494	400	459.2	775.26	712.73	8.8	1.7818
15	5	13.12	0.187	0.293	0.511	373	546.1	921.93	847.57	8.8	2.2723
16	5	14.41	0.198	0.306	0.518	342	501.8	847.11	778.79	8.8	2.2772

Nota: 6* prueba repetida

Los resultados experimentales revelan que al aumentar la pendiente del canal con un rango constante de caudales (60-200L/s), la tasa de transporte de sedimentos aumentó de manera significativa. Esto se debe a que en las pruebas preliminares los caudales se establecieron para una pendiente del 3% donde aún se observaba una acumulación de sedimentos hacia las canastas durante un período de 45 minutos. Sin embargo, para la pendiente más pronunciada, el transporte del material fue tan rápido que prácticamente la totalidad del material granular se movilizó en menos de 15 minutos.

Además, se observó otra particularidad durante las pruebas. A medida que aumentaba el porcentaje de partículas granulares grandes, especialmente en la pendiente menor, la tasa de transporte se vio afectada negativamente. Los valores obtenidos fueron similares o incluso menores a medida que se incrementaba el caudal, debido a la generación de olas que impedían que el flujo moviera los sedimentos, lo que provocaba la formación de cúmulos de sedimentos aguas abajo de las piedras. Este fenómeno representa uno de los principales

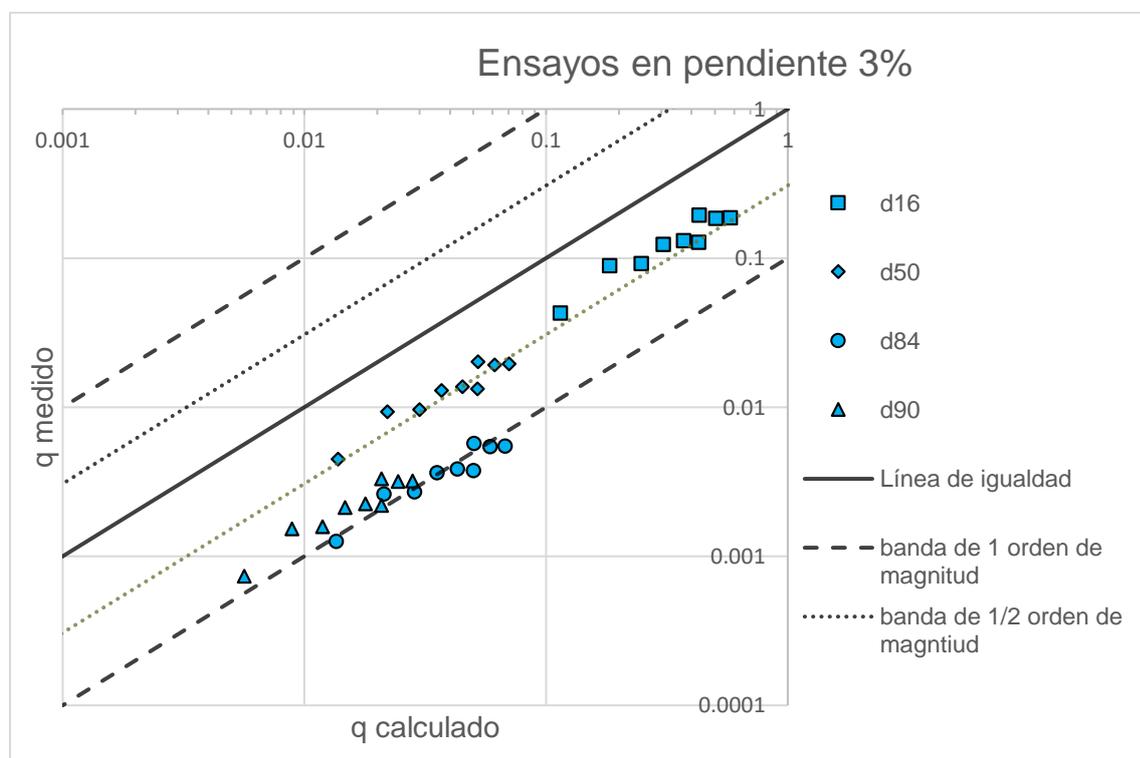
desafíos al intentar predecir la cantidad de sedimentos que se arrastran en un río donde hay numerosos clastos inmóviles.

4.2 Análisis de resultados para variables de estudio

4.2.1 Validación cualitativa

La validación cualitativa en el proceso de transporte de carga de lecho en ríos de montaña busca confirmar la relación predictiva es adecuada y representa de manera precisa el comportamiento del transporte de carga de lecho en condiciones reales.

Para poder observar el comportamiento se ha realizado en un gráfico en general donde se presentan la tasa de transporte de carga adimensional calculada vs la medida en campo, para los ensayos realizados en la pendiente del 3% y 5% observados en la figura 19 (a y b, respectivamente), los datos serán divididos acorde a su diámetro característico, la cual representa una variable independiente que tiene gran influencia en la tasa de transporte de carga de fondo.



(a)

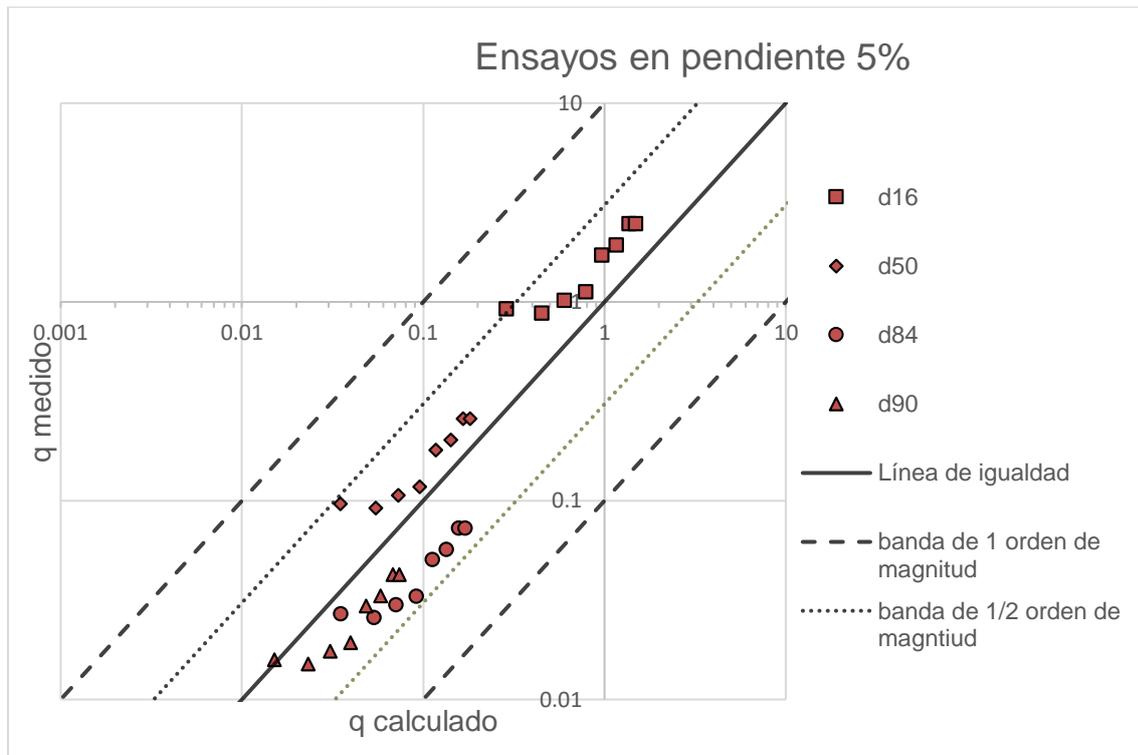


Figura 19. Comparación entre las tasas de transporte de carga de fondo adimensionales entre datos experimentales y sus valores correspondientes calculados con modelos potenciales para diámetros característicos d_{15} , d_{50} , d_{84} y d_{90} en (a) pendiente de 3% y (b) pendiente de 5%

A priori se puede observar que el comportamiento por cada tamaño de partícula se mantiene en ambos casos, es decir el transporte de carga de lecho es directamente proporcional al caudal, sin embargo, debido al tamaño de la partícula se puede observar que a medida que el tamaño de la partícula aumenta el transporte de carga de lecho disminuye, es decir el diámetro característico es un parámetro inversamente proporcional al transporte de carga de fondo.

Respecto a los datos esperados se puede visualizar en la gráfica de pendiente de 3%, los diámetros característicos d_{16} y d_{50} mantienen una mejor predicción ya que mantienen una alta aproximación con los datos esperados. Así mismo, se puede observar que los diámetros d_{16} y d_{50} en los ensayos de la pendiente del 5% también mantienen gran aproximación con los resultados esperados respecto a la fórmula, sin embargo, los diámetros d_{84} y d_{90} también se mantienen dentro del rango $\frac{1}{2}$ en orden de magnitud lo que es una aproximación bastante precisa para el estudio de transporte de carga de fondo.

La relación predictiva se obtuvo en laboratorio de hidráulica de la Universidad de Cuenca a partir de 140 ensayos manteniendo un rango de pendiente del 4% al 10%, debido a que los ensayos realizados en campo se realizaron a partir de una pendiente del 3%, se puede observar que las ecuaciones de los diámetros d_{16} y d_{50} predicen de manera adecuada con respecto a las ecuaciones establecidas el transporte de carga de lecho, por otra parte los diámetros d_{84} y d_{90} se mantienen alejados y salen del orden $\frac{1}{2}$ de magnitud por lo tanto el error sería más considerable y la aplicabilidad de las ecuaciones para d_{84} y d_{90} podrían verse poco confiables. Por lo tanto, podría establecerse que para diámetros mayores se podría realizar un ajuste mediante una regresión lineal para poder establecer nuevos coeficientes que establezcan una mejor relación predictiva para el caso de una pendiente del 3% en cuanto a diámetros característicos d_{84} y d_{90} .

La relación de partículas grandes tiene más relevancia en la pendiente del 3%, la obstrucción de las mismas hizo que el transporte de carga de fondo en comparación con el la pendiente del 5% el material fuera arrastrado lentamente, debido a que estas absorben una porción del esfuerzo cortante dejando menos esfuerzo cortante disponible para transportar sedimentos más pequeños (Carrillo et al, 2022). Para las pruebas en pendiente del 5% la relación de partículas grandes respecto al área total no tomo gran significancia ya que el material era transportado en su totalidad hacia las trampas, por lo tanto, el factor influyente en esta prueba fue el tiempo en el que se demora en lavarse el material en su totalidad o que las partículas sobre el lecho móvil no tengan movimiento.

Los resultados obtenidos en campo para las pruebas realizadas en una pendiente del 3% presentan una subestimación notable. Esta discrepancia puede atribuirse, en gran medida, a la acumulación de sedimentos justo antes de ingresar a las trampas, lo cual afectó el flujo y ocasionó pérdidas de material durante el proceso de muestreo. Esta situación influyó en la entrada de sedimentos a las trampas y, por consiguiente, generó un sesgo en las mediciones realizadas en campo. En contraste, las pruebas de laboratorio proporcionan resultados más precisos y controlados, ya que se llevan a cabo en condiciones experimentales más rigurosas y sin la interferencia de factores externos que afecten el proceso de captura de sedimentos.

4.2.2 Validación cuantitativa

La figura 19 presenta un resumen de los datos adimensionales obtenidos mediante la formulación predictiva del laboratorio, junto con sus correspondientes diámetros característicos, para pendientes del 5% y 3%. De manera general, se observa que las cuatro formulaciones exhibieron un buen comportamiento, ya que la mayoría de los datos se ubicaron dentro del mismo orden de magnitud. Además, no se apreció una dispersión brusca

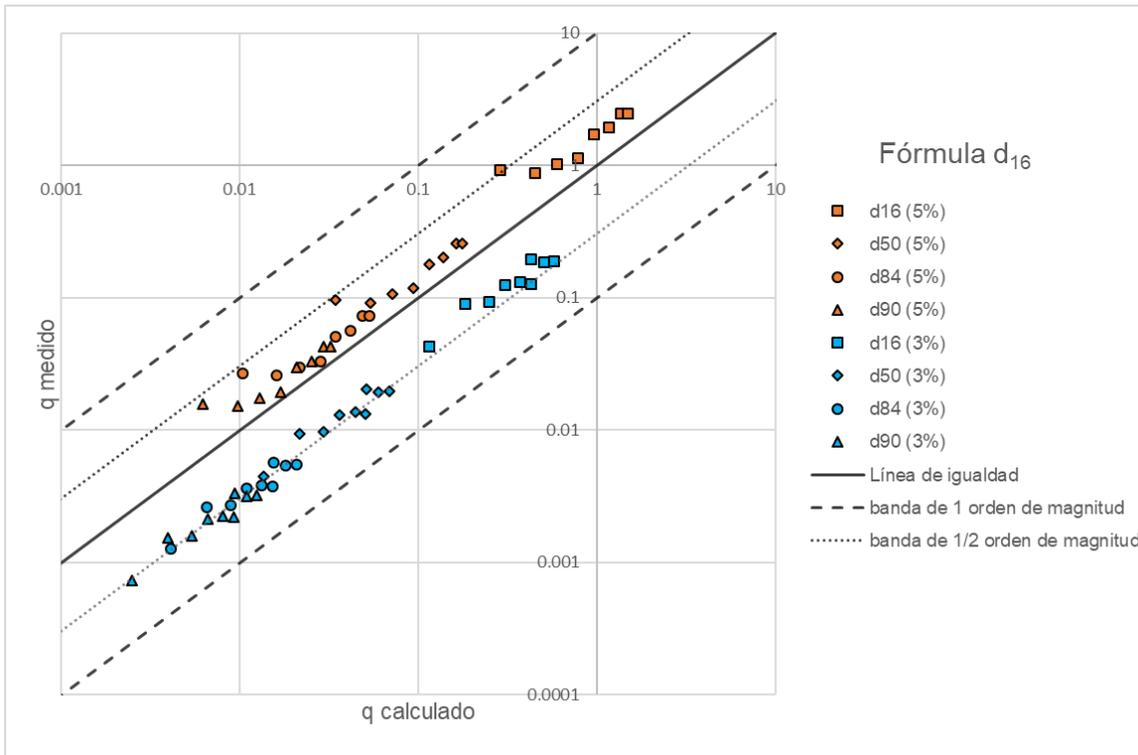
de los datos para ambas pendientes, sino una cierta armonización a lo largo del rango de tasas de transporte.

Para delimitar aún más el rango se trazó las bandas de media orden de magnitud, se observó que las tasas de predicción tanto para el diámetro d_{16} como para d_{50} mostraron el mejor desempeño dentro de este rango, con porcentajes de 88% y 82% de datos ubicados dentro del medio orden de magnitud, respectivamente. Es importante destacar que estos porcentajes eran esperables debido a la gran similitud de coeficientes y exponentes presentes en ambos modelos. El coeficiente r^2 fue prácticamente igual para ambos diámetros ($r^2=0.86$), pero el error cuadrático más bajo se obtuvo para el d_{50} , con un valor de 0.002.

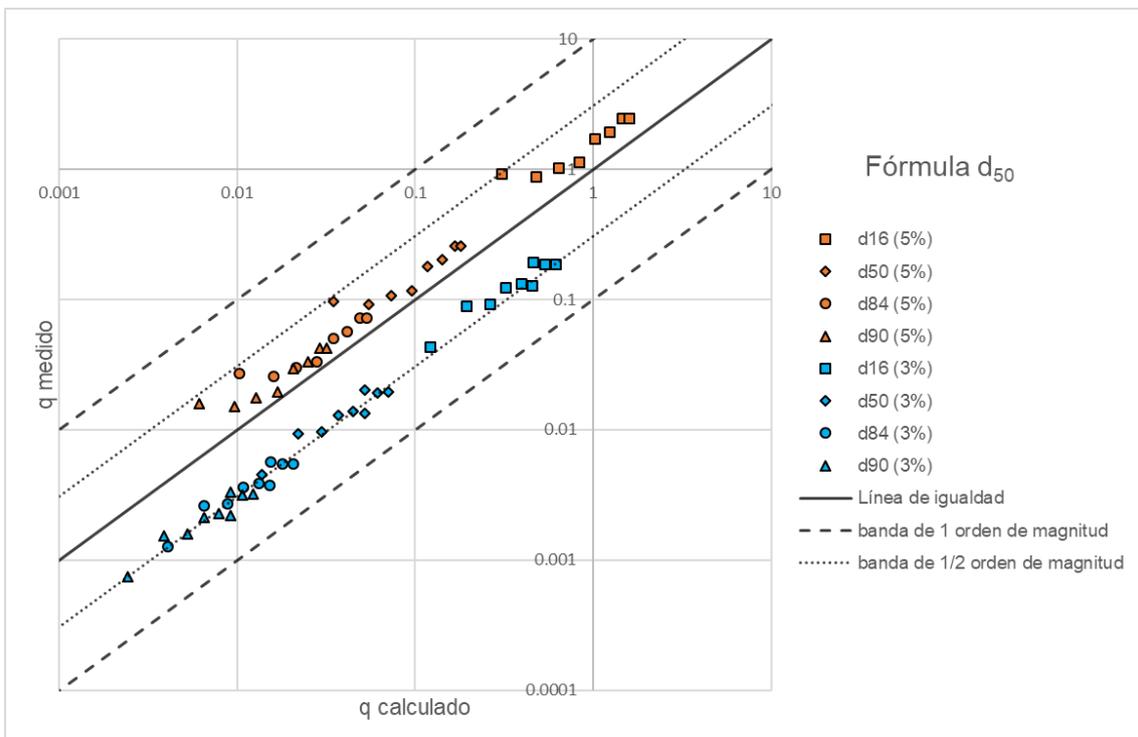
En cuanto a las pendientes que mejor trabajan, en el modelo d_{16} con pendiente del 5%, solo un valor se encontró fuera del rango de medio orden de magnitud, mientras que, para el d_{50} , todos los valores estuvieron dentro de ese rango. En términos del coeficiente r^2 , se obtuvo un valor de 0.937 para ambos diámetros, pero con un error cuadrático menor ($MSE=0.003$) para el d_{50} .

En el caso de pendientes bajas (3%), el diámetro d_{16} también fue el ganador, con solo un valor fuera del medio orden de magnitud, mientras que, para el d_{50} , tres valores se encontraron fuera del rango. El coeficiente r^2 no mostró diferencia significativa, manteniéndose en 0.86 para ambos diámetros, con el d_{50} nuevamente presentando un menor error de 0.001.

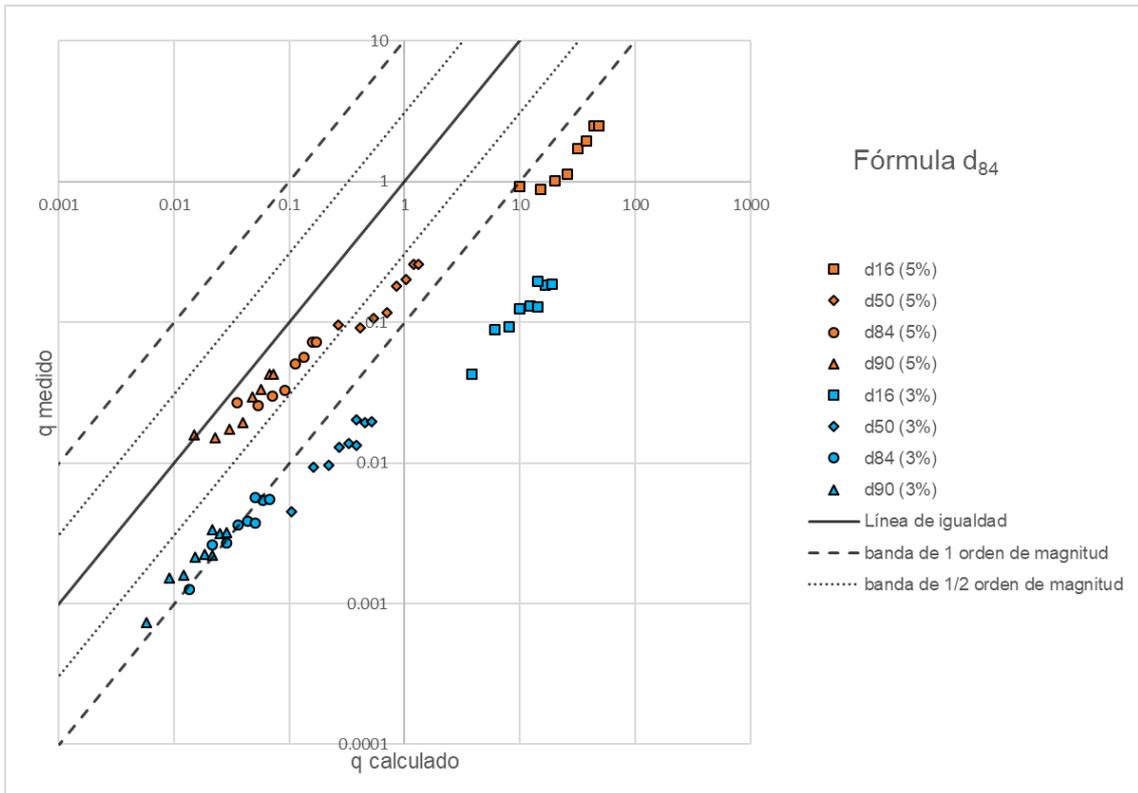
Por último, se observó que ambos modelos tendieron a sobreestimar las tasas predichas para pendientes bajas (3%), mientras que, para pendientes altas, hubo una subestimación en comparación con los datos medidos en campo. Además, el diámetro d_{84} fue descartado como predictor para pendientes pequeñas, ya que seis de sus valores se ubicaron fuera del orden de magnitud. En cambio, todos los datos del diámetro d_{90} se encontraron fuera del rango de medio orden de magnitud, pero dentro del orden de magnitud. Para la pendiente alta, tanto el d_{90} como el d_{84} mostraron todos sus valores dentro del medio orden de magnitud, aunque el diámetro d_{90} presentó un menor error cuadrático ($MSE=0.0004$) con un $r^2=0.93$, valor que fue igual para ambos diámetros.



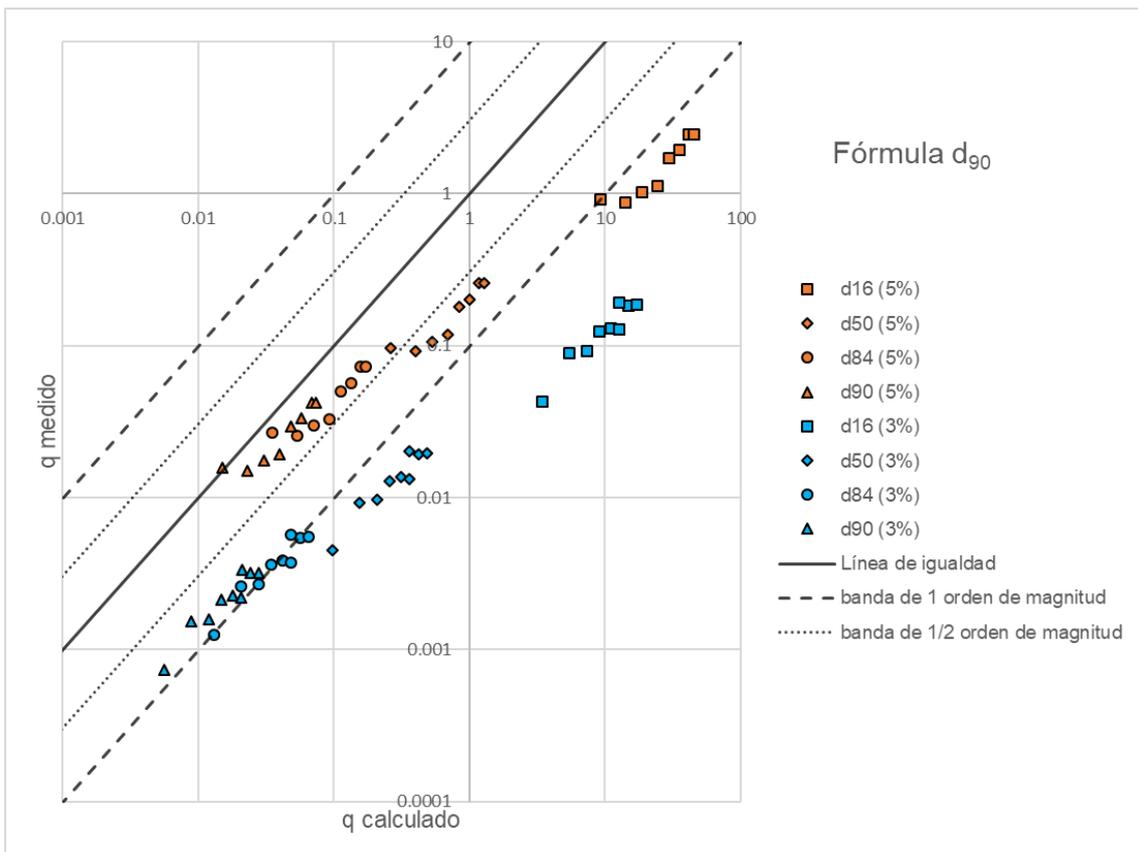
(a)



(b)



(c)



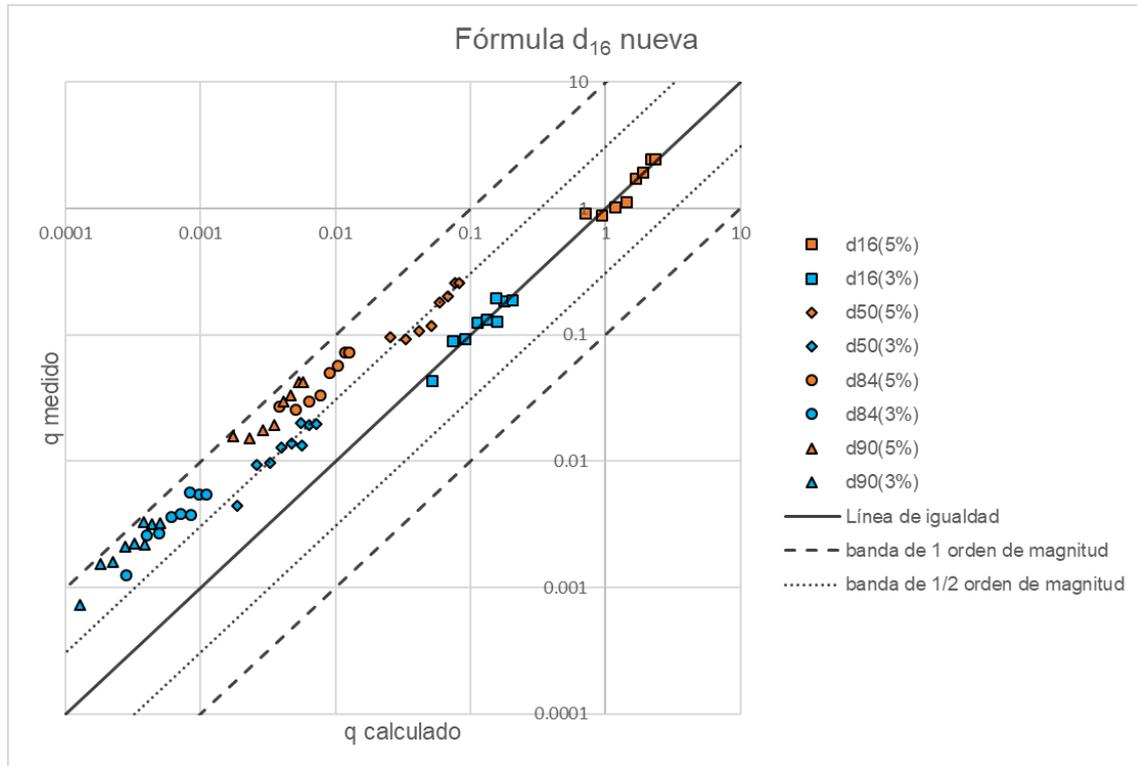
(d)

Figura 20. Comparación entre tasas de transporte adimensionales medidas y calculadas con parámetros de los diámetros característicos d_{16} , d_{50} , d_{84} y d_{90} mediante (a) fórmula de modelo potencial d_{16} , (b) fórmula de modelo potencial d_{50} , (c) fórmula de modelo potencial (d_{84}), (d) fórmula de modelo potencial d_{90} .

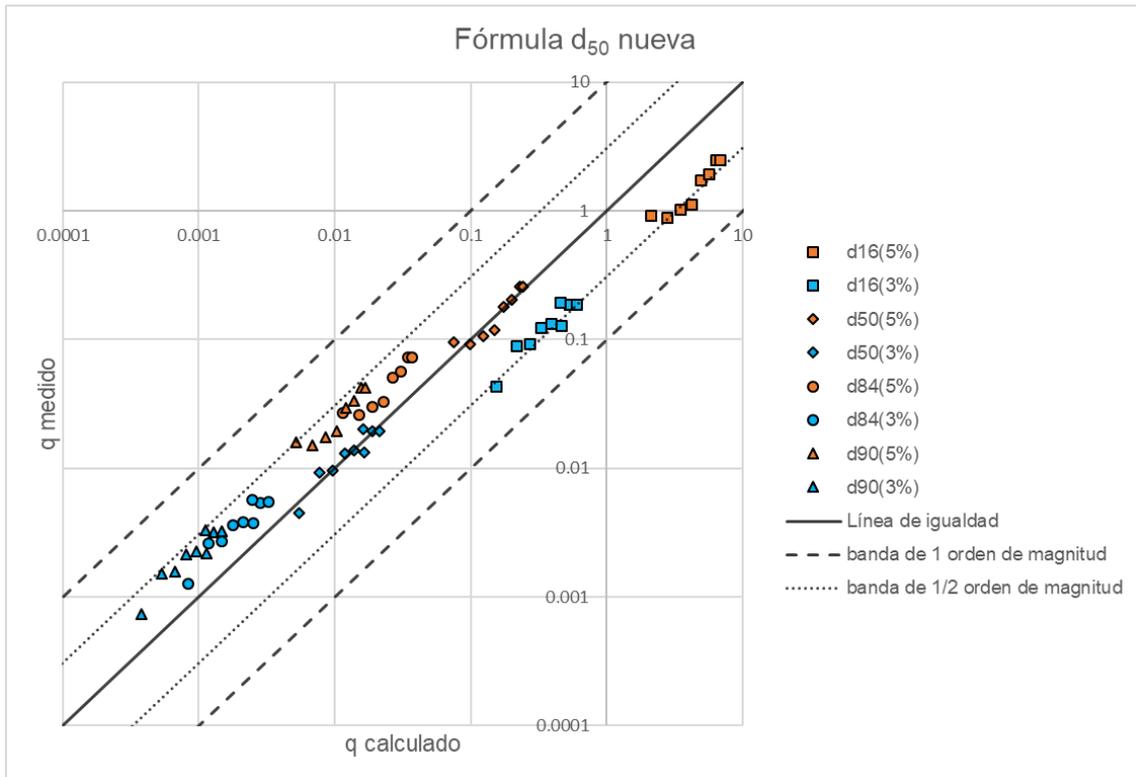
La figura 20 muestra los datos obtenidos con cada una de las formulaciones halladas en laboratorio con todos los diámetros característicos, es decir se obtuvo tasas adimensionales predichas por la formulación d_{16} con todos los diámetros característicos (d_{16} , d_{50} , d_{84} , d_{90}) y así con las demás formulaciones, para ver el comportamiento que tienen en diferentes contextos como son en cuanto a pendientes y diámetros. La formulación d_{50} se destaca sobre el resto de formulaciones ya que solo el 22% de los datos calculados caen fuera del medio orden de magnitud frente al 23% que se obtuvo con la formulación d_{16} , que corresponde a 15 y 16 datos fuera del rango para d_{50} y d_{16} , respectivamente. Un $r^2=0.887$ para la formulación d_{50} , ligeramente mayor frente al $r^2=0.886$ con la formulación d_{16} . Pero la formulación d_{50} presentó un error medio (MSE=0.061) menor por la mínima diferencia frente al MSE=0.069 obtenido con la fórmula d_{16} . Los datos con las formulaciones d_{84} y d_{90} son los que más imprecisiones tuvo al momento de predecir tasas ya que ambos presentaron un 75% de datos fuera del medio orden de magnitud y que 32 de los 68 datos analizados cayeron fuera del orden de magnitud. Un r^2 menor frente a las formulaciones d_{16} y d_{50} con valores de 0.872 y 0.881 para las formulaciones d_{84} y d_{90} , respectivamente y con un error medio mucho más grandes frente a los diámetros pequeños, ambos con un valor mayor a 110.

De manera más general tenemos que la formulación d_{50} para los diámetros d_{16} y d_{50} con ambas pendientes tuvieron un mejor rendimiento de predicción ya que un 88% y 82%, respectivamente cayeron dentro del rango de media orden de magnitud con un $r^2=0.97$ para ambos casos, pero dando un menor error el d_{50} . Con la formulación d_{16} paso algo similar, dando mejor rendimiento diámetros d_{16} y d_{50} , pero esta vez ambos tuvieron un 88% de datos que cayeron dentro del medio orden. Un $r^2=0.97$ igual para ambos y un error medio menor para el d_{50} . Para la pendiente menor la formulación d_{50} , el diámetro d_{16} tuvo menor porcentaje de datos que caían fuera del medio orden (22%), con un $r^2=0.86$. para la pendiente de 5% todos los diámetros tuvieron un excelente rendimiento ya que no hubo dato alguno que cayera fuera del rango de medio orden, todos con un $r^2=0.93$ y obteniendo el menor error medio para el diámetro d_{90} . Para la formulación d_{16} en la pendiente baja se obtiene el mismo porcentaje 88% (diámetro d_{16}) de datos que cayeron dentro del medio orden, pero con la particularidad de que para la pendiente alta el diámetro d_{16} el 12% de datos cayeron fuera de este mismo rango y para los otros diámetros se tuvo un muy buen rendimiento ya que todos los datos cayeron dentro de este rango.

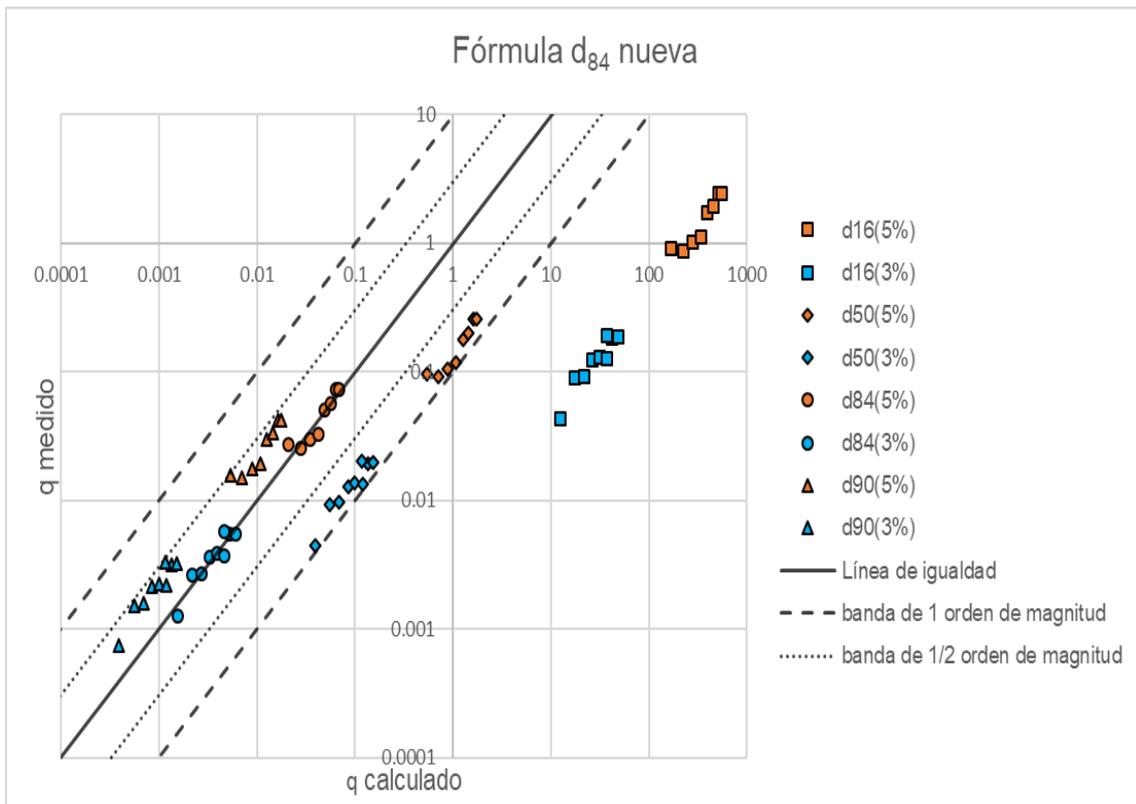
Algo a rescatar en las formulaciones d_{84} y d_{90} que dieron las peores predicciones de tasas, es que tanto con la formulación d_{84} como para la formulación d_{90} , solo en pendientes altas (5%) tienen un buen rendimiento de predicción para el diámetro medio (d_{50}) ya que el 100% de valores se quedan dentro del orden de magnitud.



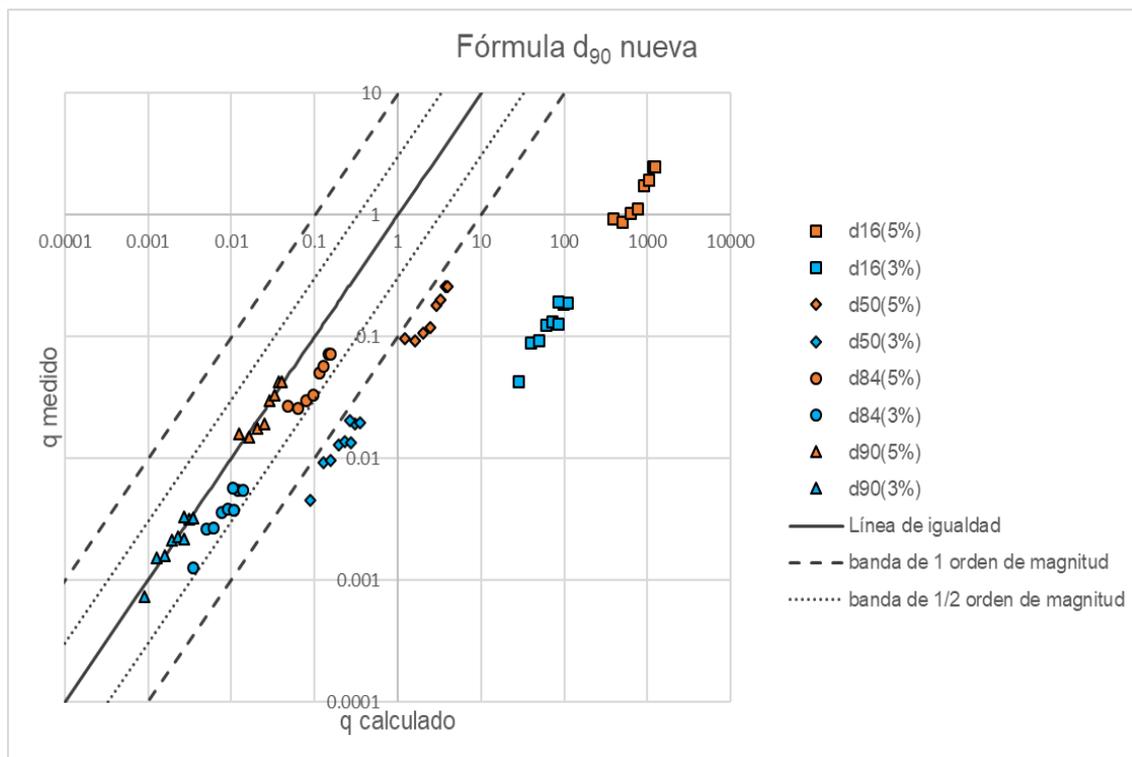
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 21. Comparación entre las tasas de transporte adimensionales medidas y calculadas con fórmulas halladas mediante regresión lineal y utilizado los parámetros de los diámetros característicos d_{16} , d_{50} , d_{84} y d_{90} para (a) formula nueva d_{16} para modelo potencial, (b) formula nueva d_{50} para modelo potencial, (c) formula nueva d_{84} para modelo potencial y (d) formula d_{90} para modelo potencial.

La figura 21 contempla los datos obtenidos con las fórmulas halladas mediante regresión lineal múltiple, así mismo para cada formulación las tasas se obtuvieron para cada diámetro característico. Se observó que la formulación d_{50} tuvo un rendimiento superior en comparación con las otras tres formulaciones. Esto se debe a que solo el 6% de los valores se encontraron fuera del rango del medio orden de magnitud. Además, esta formulación mostró un valor de $r^2=0.98$, lo que indica que existe una alta correlación entre los datos, con un mínimo error de 1.19.

En contraste, la formulación d_{16} , aunque es muy similar a la formulación d_{50} , no tuvo un rendimiento comparable. El 58% de los datos se ubicaron fuera del medio orden de magnitud, es decir, más de la mitad de los valores no se ajustaron adecuadamente. Esto es diferente a lo que sucedió con las formulaciones d_{84} y d_{90} , donde el 50% de los datos en ambos casos, se encontraron fuera de este rango.

El diámetro medio (d_{50}) penalizo a la formulación d_{16} ya que 6 de los 17 datos analizados cayeron fuera de este rango. La formulación d_{16} a pesar de tener esta penalización en el medio orden se comportó de una manera muy buena con todos los diámetros dentro del orden de magnitud donde ningún dato cayo fuera del mismo, como por el contrario sucedió para las formulaciones d_{84} y d_{90} con un 25% y 50%, respectivamente, cayeron fuera del orden de magnitud.

4.2.3 Determinación de exponentes para la relación predictiva

Para el total de 17 simulaciones realizadas en el canal multipropósito, se procedió a realizar una regresión lineal múltiple para hallar la ecuación de predicción de tasas para los 4 diámetros característicos, dándonos un total de 4 formulaciones de predicción. En la tabla 3 se puede observar un extracto de los parámetros linealizados con los datos del diámetro d_{16} previo a realizar la regresión lineal múltiple. En el anexo 2 se encuentra todos los datos linealizados para cada diámetro correspondiente. En la tabla 4 se detalla los coeficientes y exponentes hallados para cada diámetro característico y en la tabla 5 se detalla los parámetros estadísticos de cada modelo de regresión. Por último, la figura 22 muestra la gráfica de cada modelo hallado.

Tabla 3. Parámetros linealizados con resultados obtenidos a partir del diámetro característico d_{16}

$\ln(S_o)$	$\ln(V)$	$\ln(V^*)$	$\ln(q_{campo})$
-2.996	-0.247	1.052	-0.086
-2.996	0.014	1.067	-0.133
-2.996	0.169	1.093	0.016
-2.996	0.319	1.113	0.116
-2.996	0.431	1.129	0.540
-2.996	0.535	1.142	0.658
-2.996	0.622	1.158	0.902
-2.996	0.668	1.166	0.904
-3.507	0.033	0.650	-3.151
-3.507	0.292	0.684	-2.420
-3.507	0.461	0.706	-2.384
-3.507	0.566	0.738	-2.092
-3.507	0.668	0.760	-2.033
-3.507	0.729	0.795	-2.061
-3.507	0.818	0.808	-1.690
-3.507	0.888	0.827	-1.677
-3.507	0.738	0.788	-1.642

Tabla 4. Coeficientes y exponentes obtenidos para cada diámetro característico

Formulación	Parámetro	Constante	Exponente
d16	Coeficiente	75.7137	
	So (pendiente)		2.7496
	V (velocidad media adimensional)		0.8459
	V*(velocidad cortante adimensional)		3.5956
d50	Coeficiente	223.8581	
	So(pendiente)		2.7496
	V (velocidad media adimensional)		0.8459
	V*(velocidad cortante adimensional)		3.5956
d84	Coeficiente	0.3645	
	So (pendiente)		4.5525
	Q (caudal de descarga adimensional)		1.7000
	V (velocidad media adimensional)		-0.8522
d90	Coeficiente	0.8348	
	So (pendiente)		4.5525
	Q (caudal de descarga adimensional)		1.7000
	V (velocidad media adimensional)		-0.8522

Tabla 5. Parámetros estadísticos para cada modelo de regresión por cada diámetro característico

Formulación	Parámetro	Símbolo	Valor
d16	Coeficiente de correlación múltiple	R	0.9939
	Coeficiente de determinación R ²	R ²	0.9879
	R ² ajustado	R ² ajustado	0.9851
	Error típico	ET	0.1658
d50	Coeficiente de correlación múltiple	R	0.9939
	Coeficiente de determinación R ²	R ²	0.9879
	R ² ajustado	R ² ajustado	0.9851
	Error típico	ET	0.1658

d84	Coeficiente de correlación múltiple	R	0.9939
	Coeficiente de determinación R^2	R ²	0.9879
	R^2 ajustado	R ² ajustado	0.9851
	Error típico	ET	0.1655
d90	Coeficiente de correlación múltiple	R	0.9939
	Coeficiente de determinación R^2	R ²	0.9879
	R^2 ajustado	R ² ajustado	0.9851
	Error típico	ET	0.1655

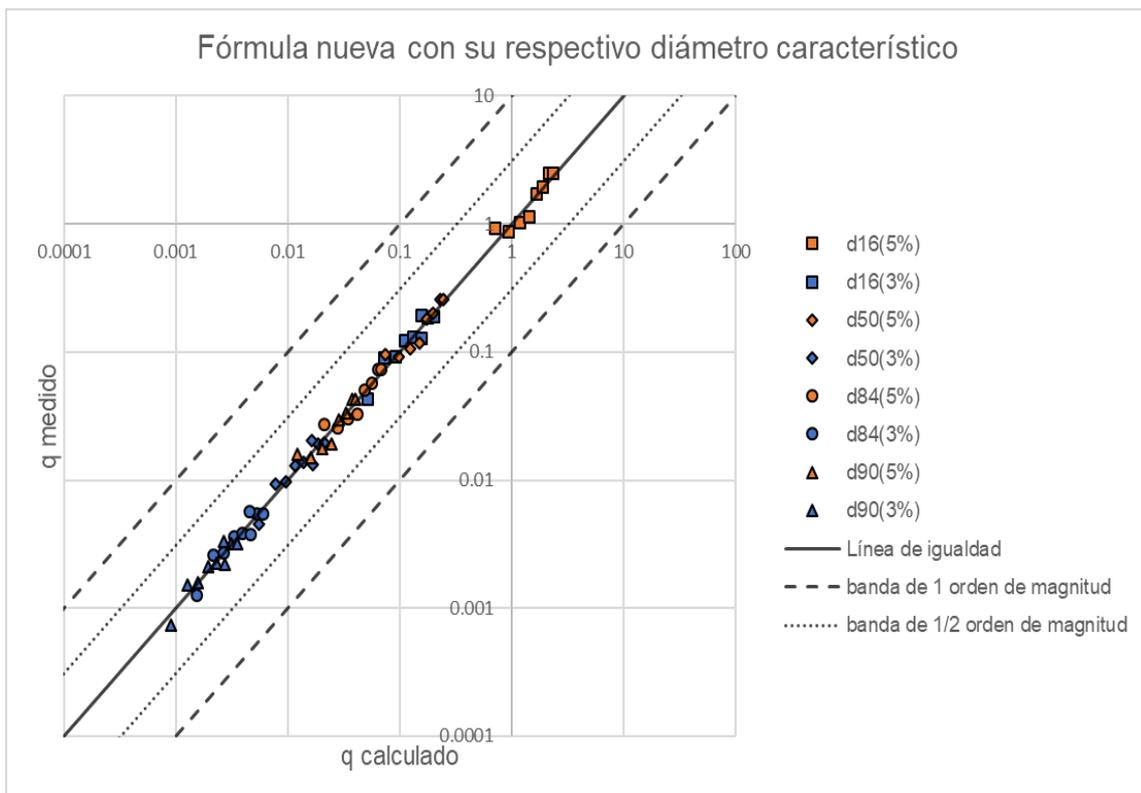


Figura 22. Resultados para la tasa de transporte de carga de fondo adimensional con las nuevas formulaciones utilizado un análisis de regresión lineal para el diámetro d_{16} , d_{50} , d_{84} y d_{90}

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Dentro del análisis cualitativo y cuantitativo expuesto en el anterior apartado se puede entonces definir los siguientes aspectos observados respecto a los datos obtenidos in situ vs resultados obtenidos a través de las relaciones predictivas de laboratorio:

Dentro del enfoque cualitativo:

- El comportamiento del transporte de carga de fondo en ambos casos (pendiente del 3% y 5%) es directamente proporcional al caudal. Sin embargo, se observa una relación inversa entre el tamaño de la partícula y el transporte de carga de fondo, donde a medida que el tamaño de la partícula aumenta el transporte de carga de fondo disminuye.
- La relación de partículas grandes respecto al área total tiene gran impacto en ensayos de pendiente de 3%, ya que las partículas grandes colocadas aleatoriamente sobre el lecho absorben parte del esfuerzo cortante, lo que ocasiona que el material la corriente del agua no transporte parte del material granular sobre el lecho móvil.
- Para el caso (pendiente 3% y parte de la pendiente 5%) se observó la subestimación de transporte de carga medida, una de las causas principales podría deberse a la acumulación de los sedimentos al ingreso de las trampas, parámetro externo que afecta al proceso de muestro en comparación con los resultados que se pueden esperar en pruebas realizadas en laboratorios.

Dentro del enfoque cuantitativo:

- En general, las cuatro formulaciones predictivas evaluadas para diferentes pendientes (5% y 3%) mostraron un buen comportamiento, con la mayoría de los datos ubicados dentro del mismo orden de magnitud. Las tasas de predicción para los diámetros d_{16} (2 mm) y d_{50} (9 mm) fueron las que mejor se ajustaron al rango de medio orden de magnitud, con porcentajes de 88% y 82% de datos dentro de este rango, respectivamente. Aunque el $r^2=0.86$ fue idéntico para ambos, el diámetro d_{50} (9 mm) presentó un error cuadrático más bajo, lo que sugiere que tiene un mejor rendimiento en general. Cuando se analizaron pendientes del 5%, tanto d_{16} (2 mm) como d_{50} (9 mm) demostraron una buena precisión, con la particularidad de que para él d_{16} (2 mm), un solo valor se encontraba fuera del rango de medio orden de magnitud. El diámetro d_{50} también obtuvo un menor error cuadrático, lo que indica una mayor precisión en sus predicciones. Para pendientes del 3%, nuevamente el diámetro d_{16} (2 mm) fue el más preciso, con solo un valor fuera del rango de medio orden de magnitud. Sin embargo, el diámetro d_{50} (2 mm) mostró tres valores fuera del rango, pero aún

mantuvo un coeficiente r^2 similar y un error cuadrático más bajo en comparación con d_{16} (2 mm). Se observó que ambos modelos tendieron a sobreestimar las tasas de predicción para pendientes bajas y subestimarlas para pendientes altas en comparación con los datos medidos en campo. El diámetro d_{84} (21 mm) no fue un buen predictor para pendientes pequeñas, ya que la mayoría de sus valores se ubicaron fuera del rango de 1 orden de magnitud, mientras que el diámetro d_{90} (30 mm) se comportó mejor en ambas pendientes, mostrándose como una opción viable en ambas pendientes.

➤ Para la estimación de tasas de transporte independiente del diámetro característico que sea usado en cada uno de los modelos, la formulación d_{50} (9 mm) mostró el mejor rendimiento en la predicción de tasas, ya que solo el 22% de los datos se ubicaron fuera del medio orden de magnitud, en comparación con el 23% para d_{16} (2 mm), con r^2 muy similares y un error medio ligeramente menor para la formulación d_{50} . Las formulaciones d_{84} (21 mm) y d_{90} (30 mm) presentaron mayores imprecisiones en la predicción de tasas, con un 75% de los datos fuera del medio orden de magnitud, con r^2 menores y errores medios mayores. La formulación d_{50} (9 mm) tiene un mejor rendimiento de predicción en general para los diámetros d_{16} (2 mm) y d_{50} (9 mm), independientemente de la pendiente. Ambos diámetros obtuvieron un alto porcentaje de datos (88% y 82%, respectivamente) dentro del rango de medio orden de magnitud, con un elevado coeficiente r^2 de 0.97 para ambos casos. Aunque el error medio fue menor para el diámetro d_{50} (9 mm), ambos diámetros se destacan por su precisión en las predicciones. También la formulación d_{50} (9 mm) tuvo un buen rendimiento para el diámetro d_{84} (21 mm) con un 77% de datos dentro del medio orden frente al 64% de datos con la formulación d_{16} (2 mm), haciéndolo más versátil en cuanto a diámetros característicos. Para la formulación d_{50} (9 mm) todos los diámetros tuvieron un rendimiento excelente cayendo dentro del medio orden de magnitud y con r^2 altísimos ($r^2=0.93$), destacándose el d_{90} (30 mm) en la pendiente alta, mientras que en la baja solo se destacó el diámetro menor (d_{16} (2 mm)) con menor porcentaje de datos fuera del medio orden de magnitud con un $r^2=0.86$. Las formulaciones d_{84} y d_{90} presentaron mayores imprecisiones en la predicción de tasas, con un 75% de los datos fuera del medio orden de magnitud, incluso en gran parte cayendo fuera del orden de magnitud con r^2 menores y mayores errores. Sin embargo, la formulación d_{90} (30 mm) y d_{84} (21 mm) mostraron un buen rendimiento en pendientes altas (5%) para predecir tasas con el diámetro medio (d_{50}).

Se realizó una regresión lineal múltiple para poder hallar ecuaciones de predicción de tasas para cada uno de los diámetros característicos ($d_{16}, d_{50}, d_{84}, d_{90}$) dándonos expresiones que difieren a los del laboratorio, para las constantes se tiene un mayor valor en la formulación d_{50} mientras que en las formulaciones de laboratorio pasa lo contrario dando el mayor valor

para la formulación d_{16} , en cuanto a los exponentes la diferencia puede ser debido a que se incluyó pendientes no ocupadas en laboratorio (3%). Se realizó de igual manera estimaciones de transporte usando todos los diámetros para cada una de las formulaciones halladas siendo la formulación d_{50} que mostró un rendimiento superior en comparación con las otras formulaciones (d_{16} , d_{84} y d_{90}). Solo el 6% de los valores calculados cayeron fuera del rango del medio orden de magnitud, con un valor $r^2=0.98$ alto, lo que indica una alta precisión en las predicciones. La formulación d_{16} , a pesar de ser similar a d_{50} , no tuvo un rendimiento comparable. El 58% de los datos se ubicaron fuera del rango del medio orden de magnitud mientras que para las formulaciones d_{84} y d_{90} el 50% de los datos fuera del rango del medio orden de magnitud para ambos casos. Se observó que el diámetro medio (d_{50}) penalizó a la formulación d_{16} , ya que 6 de los 17 datos analizados se ubicaron fuera de este rango, aun con esa penalización, tuvo un rendimiento competitivo en comparación con d_{84} y d_{90} , ya que ajustó adecuadamente la mayoría de los datos dentro del rango de 1 orden de magnitud.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar la validación de esta relación predictiva mediante ensayos con una pendiente del 4% y luego se aumente a pendiente mayores. De esta manera se podría obtener un rango de valores medidos en campo mayor, obteniéndose una perspectiva mas completa y representativa del comportamiento del transporte de carga de fondo en ríos de montaña.
- Se sugiere mejorar el control en las pruebas mediante la optimización de las condiciones del vertedero triangular de pared delgada y la compuerta en la obra de toma, especialmente en cuanto a la prevención de filtraciones de agua. Esto es de suma importancia, ya que la presencia de filtraciones podría alterar el lecho móvil en las condiciones iniciales y afectar la capacidad de determinar los tiempos de transporte de manera adecuada.
- Se sugiere llevar a cabo un programa de mantenimiento periódico para mejorar las condiciones de las compuertas, al mismo tiempo que se instalan barandales adecuados para incrementar la seguridad en el momento de su manipulación. Estas medidas son fundamentales para garantizar una operación segura y eficiente de las compuertas, así como para proteger la integridad de las personas y las propiedades cercanas. Mediante la implementación de un mantenimiento adecuado y la adopción de medidas de seguridad adicionales, se puede prolongar la vida útil de las compuertas y prevenir potenciales problemas o accidentes relacionados con su uso.

Referencias Bibliográficas

- Allen, P. A. (1997). *Earth surface processes*. Blackwell Science, Oxford.
- Bagnold, R. A. (1956). The flow of cohesionless grains in fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical, Physical and Engineering sciences*, 249, 235-297.
- Basile, P. (2018). *Transporte de Sedimentos y Morfodinámica de ríos aluviales* (Primera ed.). Rosario, Argentina: Editorrial de la Universidad Nacional de Rosario. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/154323886.pdf>
- Bathurst, J. C., Cao, H. H., & Graf, W. H. (1987). Bed load discharge equations for steep mountain streams,. En C. R. Thorne, J. C. Chichester, J. W. Bathurst, & R. D. Hey, *Sediment transport in gravel-bed rivers* (págs. 453-477).
- Becerra, R., Espinoza, N., Arriola, G., Villegas, L., & Sotomayor, G. (2021). Validación de las ecuaciones empíricas de transporte de sedimentos por arrastre y suspensión empleando mediciones en campo. *ResearchGate*, 8(1), 39-54. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/349157496_Validacion_de_las_ecuaciones_empiricas_de_transporte_de_sedimentos_por_arrastre_y_suspension_empleando_mediciones_en_campo
- Boiero, A. (2020). *Geo*. Obtenido de <https://geo-webonline.com/textura-granulometria-y-forma-de-las-particulas-de-suelo/>
- Bravo Espinoza, M., Osterkamp, W., & Lopes, V. (2004). Revisión técnica de ecuaciones empíricas de predicción del arrastre de sedimentos de fondo. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*.
- Bunte, K., Swingle, K., & Steven, A. (2007). Guidelines for Using Bedload Traps in Coarse-Bedded Mountain Streams: Construction, Installation, Operation, and Sample Processing. *United States Departament of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station*. Obtenido de <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-191>
- Carrillo, V., Mendoza, D., Petrie, J., Matovelle, P., Torres, S., Pacheco, E., . . . Timbe, L. (August de 2022). Using a statistical efficiency methodology for predictors selection in the bedload transport problem: A high gradient experimental channel case. *Alexandria Engineering Journal, Volume 61*(8), 6205-6219.
- Carrillo, V., Petrie, J., Timbe, L., Pacheco, E., Astudillo, W., Padilla, C., & Cisneros, F. (2021). Validation of an Experimental Procedure to Determine Bedload Transport Rates in Steep Channels with Coarse Sediment. *MDPA Water*, 13. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/w13050672>
- Carson, M. (1987). Bedload transport in gravel channels. *Journal of Hidrology*, 26, 1-151. Obtenido de http://www.hydrologynz.co.nz/downloads/JoHNZ_1987_v26_1_Carson.pdf
- Casas, R. (2015). *Estudio experimental del transporte de sedimentos y de las formas de fondo en un modelo físico*. Barcelona, España.
- Chen, C. (1990). Unified theory on power laws for flow resistance. *Journal of Hidraulic Engineering*, 117, 371-389.

- Delgado, M., & Orellana, M. (2023). *Evaluación del desempeño hidráulico de la obra de control de flujo del canal multipropósitos de la captación de derivación lateral ubicada en el Campus Balzay*. Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca, Cuenca.
- Einstein, A. (1950). The bed-load function for sediment transportation in open channel flows.
- Einstein, A. (s.f.). Formulas for the transportation of bedload. *ASCE*, 561-577.
- García, M. (2008). *Sediment Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice*. Virginia: ASCE Task Committee.
- Georgiev, B. (1990). Reliability of bed load measurements in mountain rivers, In Hydrology in mountainous regions I: Hydrological measurements; the water Cycle. *IAHS*, 193, Pages 263-270.
- Gesslet, J. (1964). *Beginning and ceasing of sediment motion (Cap. 7)*. (H. W. Shen, Trad.) CO: Water Resources Publications.
- Ghilardi, T., Franca, A., & Schleiss A. (2014). Sediment transport in steep channels with large roughness elements. En *River Flow 2014* (1st Edition ed., págs. Pages 899-907). CRC Press.
- Gomez, B., & Church, M. (1989). An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers. *Water Resources Research*(25), Pages 1161-1189.
- Heredia, A. (2017). *Caracterización del transporte de sedimentos en un tramo del río tercero (Ctalamochita) utilizando tecnología acústica doppler*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Cordoba, Córdoba.
- Meyer Peter, E., & Muller, R. (1948). Formulas for bed load transport. *Report on second meeting of the International Association of Hydraulic Structures Research*, Pages 39-64.
- Navas, A. (2014). *Caracterización y modelación del transporte de sedimentos en la cuenca alta del Río Bogotá tramo-Chingacio-Puente Santander*. Tesis de pregrado, Universidad de los Andes, Bogota.
- Nielsen, P. (1992). *Coastal Bottom Boundary layers and sediment transport, Advanced Series on Ocean Engineering* (Vol. 4). Singapore.
- Niño, Y. (2004). *Hidráulica fluvial y transporte de Sedimentos*. Chile.
- NTE INEN 857. (2010). *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso*. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito. Obtenido de <https://ia902907.us.archive.org/27/items/ec.nte.0857.2010/ec.nte.0857.2010.pdf>
- Pacheco, E., & Carrillo, V. (2014). Transporte de Fondo Potencial mediante Estudio en Modelo Físico de lecho Móvil,. *MASKANA*.
- Pacheco, E., & Carrillo, V. (2016). *Estudios para el Canal abierto Multipropósito del Campus Balzay de la Universidad de Cuenca*. Cuenca.
- Rijn, L. C. (1984). Sediment transport Part I: bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering, Volumen 110*, Pages 1613-1641.

- 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.
- Sarango, C. (2013). *Calibración de una ecuación para el transporte de sedimentos en la Cuenca El Limón, en el Río Zamora*. Tesis de pregrado, Universidad Técnica particular de Loja, Loja. Obtenido de https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/7459/1/TESIS_CINTHYA_SARANGO_ING%20CIVIL_CORREGIDA.pdf
- Schetz, J. A. (1979). *Boundary layer theory*. USA: Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Schlichting, H. (1979). *Boundary layer theory*. USA: Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Schoklitsch, A. (1962). *Handbuch des Wasserbaus*. Springer-Verlag.
- Shields, A. (1936). Ähnlichkeitmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. En A. Shields, *Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau and Schiffbau* (W. P. Ott, & J. C. Van Uchelen, Trads., CalTech ed., pág. 26). Pasadena, California.
- Van Rijn, L. C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. The Netherlands: Aqua, Amsterdam Publications.
- Vanoni V, A. (1941). Velocity distribution in open channels. *Civil Engineering*, 11(11), 356-357.
- Vázquez, D. (2008). *Transporte de sedimento como carga de fondo en la cuenca del río Narcea (vertiente Norte de la Cordillera Cantábrica)*. Tesis doctoral , Universidad de Oviedo, Oviedo.
- Von Karman, T. (1934). Turbulence and skin friction. *Journal Aeronaut Science*, 11(1), 1.
- Wohl, E. (2000). *Mountain Rivers*. American Geophysical Union AGU.
- Yang, C. (1996). *Sediment transport: Theory and practice*. Singapore : McGraw-Hill.

Anexos

Anexo A. Tabulación de resultados medidos en campo

Tabla 6. Datos obtenidos con pendiente del 3% y caudal aproximado de 65 l/s

Pendiente (%)	Tiempo caudal (min)	Caudal (m ³ /s)	Tiempo calados (min)	Calado (m)			Peso del material (kg)
				Izquierda (m)	Medio (m)	Derecha (m)	
3	0	0.063	-	0.315	0.3	0.31	88.145
	1	0.061	-				-
	2	0.047	-				-
	3	0.041	-				-
	4	0.051	-				-
	5	0.067	-				-
	7	0.073	-				-
	9	0.061	-				-
	11	0.044	-				-
	13	0.067	-				-
	15	0.078	-				-
	17	0.073	-				-
	19	0.073	-				-
	21	0.061	-				-
	23	0.058	-				-
	25	0.054	-				-
30	0.058	-				-	

Tabla 7. Datos obtenidos con pendiente del 3% y caudal aproximado de 85 l/s

Calado (m)		
------------	--	--

Pendiente (%)	Tiempo caudal (min)	Caudal (m3/s)	Tiempo calados (min)	Izquierda (m)	Medio (m)	Derecha (m)	Peso del material (kg)
3	0	0.0845	0	-	0.33	-	16.475
	1	0.0835	5	-	0.335	-	17.05
	2	0.0835	15	-	0.33	-	10.49
	3	0.0845	30	-	0.33	-	17.98
	4	0.0845	45	-	0.325	-	16.44
	5	0.0826	45	-	0.33	-	17.08
	9	0.0854					19.81
	11	0.0845					13.7
	15	0.0845					11.4
	20	0.0845					17.05
	25	0.0849					13.71
	31	0.0868					12.02
	35	0.0845					
	40	0.0863					
	45	0.0858					

Tabla 8. Datos obtenidos con pendiente del 3% y caudal aproximado de 105 l/s

Pendiente (%)	Tiempo caudal (min)	Caudal (m3/s)	Tiempo calados (min)	Calado (m)			Peso del material (kg)
				Izquierda (m)	Medio (m)	Derecha (m)	
3	0	0.104	0	-	0.33	-	17.715
	1	0.107	5	-	0.355	-	14.79
	2	0.105	15	0.34	-	0.35	16.765
	3	0.107	30	0.345	-	0.35	18.64
	4	0.107	45	0.34	-	0.345	17.54
	5	0.106					12.24
	7	0.107					17.45
	9	0.106					16.63
	11	0.103					15.83
	13	0.104					15.07
	15	0.103					16.82
	20	0.104					10.27
	28	0.103					
	30	0.104					
	35	0.105					
	40	0.105					
45	0.104						

Tabla 9. Datos obtenidos con pendiente del 3% y caudal aproximado de 125 l/s

Pendiente (%)	Tiempo caudal (min)	Caudal (m3/s)	Tiempo calados (min)	Calado (m)			Peso del material (kg)	
				Izquierda (m)	Medio (m)	Derecha (m)		
3	0	0.125	0	0.365	0.363	0.37	14.53	16.32
	1	0.123	8	0.36	0.37	0.375	12.705	13.34
	2	0.125	15	0.36	0.37	0.375	11.585	
	3	0.124	30	0.362	0.368	0.367	16.135	
	4	0.123	37	0.361	0.365	0.37	7.745	
	5	0.123	45	0.361	0.368	0.378	14.505	
	7	0.125					16.035	
	9	0.126					13.815	
	11	0.125					13.88	
	13	0.125					12.62	
	15	0.125					12.545	
	20	0.126					15.07	
	28	0.126					6.7	
	30	0.126					14.755	
	38	0.125					13.48	
	40	0.124					13.06	
	45	0.124					15.518	

Tabla 10. Datos obtenidos con pendiente del 3% y caudal aproximado de 145 l/s

Pendiente (%)	Tiempo caudal (min)	Caudal (m3/s)	Tiempo calados (min)	Calado (m)			Peso del material (kg)	
				Izquierda (m)	Medio (m)	Derecha (m)		
3	0	0.145	0	0.382	0.387	0.389	16.55	11.17
	1	0.145	5	0.383	0.385	0.39	15.95	
	2	0.145	30	0.379	0.382	0.385	19.55	
	3	0.146	45	0.38	0.381	0.386	16.61	
	4	0.145					15.84	
	5	0.146					16.17	
	7	0.145					16.23	
	11	0.145					16.04	
	13	0.145					15.45	
	16	0.144					16.77	
	22	0.145					16.73	
	25	0.145					15.14	
	30	0.144					17.27	
	35	0.144					9.635	
	40	0.145					17.51	
	45	0.145					17.13	

Tabla 11. Datos con pendiente del 3% y caudal aproximado de 165 l/s

Pendiente (%)	Tiempo caudal (min)	Caudal (m ³ /s)	Tiempo calados (min)	Calado (m)			Peso del material (kg)	
				Izquierda (m)	Medio (m)	Derecha (m)		
3	0	0.166	0	0.408	0.414	0.42	16.735	1.305
	1	0.165	5	0.406	0.415	0.418	16.81	
	2	0.165	30	0.403	0.411	0.415	18.59	
	3	0.166	45	0.402	0.41	0.415	14.905	
	4	0.165					18.855	
	5	0.165					16.955	
	7	0.165					19.25	
	9	0.166					15.125	
	11	0.165					19.705	
	13	0.165					7.746	
	15	0.165					16.845	
	20	0.167					16.855	
	30	0.165					17.415	
	35	0.166					15.625	
	40	0.166					10.465	
	45	0.166					19.065	

Tabla 12. Datos obtenidos con pendiente del 3% y caudal aproximado de 165 l/s (prueba repetida)

Pendiente (%)	Tiempo caudal (min)	Caudal (m ³ /s)	Tiempo calados (min)	Calado (m)			Peso del material (kg)		
				Izquierda (m)	Medio (m)	Derecha (m)			
3	0	0.166	0	0.399	0.403	0.407	11.735	16.18	15.4
	1	0.150	5	0.401	0.408	0.412	18.35	11.975	
	3	0.159	30	0.4	0.406	0.41	11.99	16.595	
	4	0.166	45	0.402	0.409	0.411	12.855	13.765	
	5	0.168					14.29	18.695	
	10	0.167					15.015	15.44	
	15	0.167					15.495	15.93	
	20	0.167					15.47	14.915	
	25	0.167					15.615	16.77	
	30	0.166					14.125	13.775	
	35	0.165					11.395	13.94	
	40	0.167					16.42	12.175	
	45	0.166					15.94	14.275	

Tabla 13. Datos obtenidos con pendiente de 3% y caudal aproximado de 185 l/s

Pendiente (%)	Tiempo caudal (min)	Caudal (m ³ /s)	Tiempo calados (min)	Calado (m)			Peso del material (kg)		
				Izquierda (m)	Medio (m)	Derecha (m)			
3	0	0.187	0	0.42	0.425	0.435	14.97	17.545	14.175
	1	0.185	8	0.42	0.425	0.43	18.52	13.325	
	2	0.185	15	0.41	0.415	0.43	12.79	13.75	
	5	0.186	30	0.41	0.425	0.43	15.265	16.74	
	10	0.186	45	0.415	0.425	0.425	17.55	16.21	
	15	0.186					14.215	19.39	
	20	0.187					13.535	16.485	
	25	0.187					17.01	14.245	
	30	0.186					15.11	19.36	
	35	0.187					14.34	16.59	
	40	0.186					15.48	18.755	
	45	0.186					10.09	4.455	

Tabla 14. Datos obtenidos con pendiente del 3% y caudal aproximado de 207 l/s

Pendiente (%)	Tiempo caudal (min)	Caudal (m ³ /s)	Tiempo calados (min)	Calado (m)			Peso del material (kg)	
				Izquierda (m)	Medio (m)	Derecha (m)		
3	0	0.208	0	0.434	0.438	0.441	18.755	17.67
	1	0.209	5	0.435	0.44	0.445	16.975	16.4
	2	0.207	30	0.435	0.438	0.446	16.645	18.59
	4	0.207	45	0.432	0.437	0.441	12.175	19.69
	5	0.208					17.105	17.83
	10	0.207					18.775	18.02
	15	0.207					20.01	11.69
	20	0.208					18.47	17.83
	25	0.207					15.95	14.05
	30	0.208					17.83	8.125
	35	0.209					17.495	0.445
	40	0.208					15.755	
	45	0.208					18.665	

Tabla 15. Datos obtenidos con pendiente de 5% y caudal aproximado de 65 l/s

Pendiente (%)	Tiempo caudal (min)	Caudal (m ³ /s)	Tiempo calados (min)	Calado (m)			Peso del material (kg)			
				Izquierda (cm)	Medio (cm)	Derecha (cm)				
5	0	0.063	5	0.41	0.41	0.415	12.76	16.63	19.23	20.53
	1	0.060	15	0.41	0.415	0.42	15.37	17.04	15.01	
	2	0.060	25	0.41	0.415	0.42	14.21	17.53	17.43	
	3	0.062	35	0.41	0.41	0.415	15.88	14.06	15.46	
	5	0.064	45	0.41	0.41	0.415	14.16	15.22	16.61	
	10	0.065					16.66	18.47	17.18	
	20	0.063					14.42	18.19	19.4	
	25	0.064					15.27	13.88	19.35	
	30	0.063					13.57	14.07	18.6	
	35	0.063					15.42	17.03	18.41	

Tabla 16. Datos obtenidos con pendiente del 5% y caudal aproximado de 85 l/s

Pendiente (%)	Tiempo caudal (min)	Caudal (m ³ /s)	Tiempo calados (min)	Calado (m)			Peso del material (kg)	
				Izquierda (cm)	Medio (cm)	Derecha (cm)		
5	0	0.084	0	0.423	0.425	0.427	17.365	16.075
	1	0.091	5	0.425	0.427	0.432	18.275	16.245
	2	0.085	15	0.42	0.427	0.431	17.16	19.85
	3	0.082	25	0.422	0.426	0.428	15.18	15.615
	4	0.083	35	0.42	0.425	0.431	15.92	14.025
	5	0.084	45	0.421	0.425	0.432	18.925	16.89
	10	0.083					17.185	16.91
	15	0.084					16.4	17.39
	20	0.083					18.85	15.445
	25	0.084					18.285	14.745
	30	0.084					16.27	13.445
	35	0.084					16.04	14.32
	40	0.084					16.235	18.675

Tabla 17. Datos obtenidos con pendiente del 5% y caudal aproximado de 105 l/s

Pendiente (%)	Tiempo caudal (min)	Caudal (m ³ /s)	Tiempo calados (min)	Calado (m)			Peso del material (kg)		
				Izquierda (cm)	Medio (cm)	Derecha (cm)			
5	0	0.104	0	0.465	0.468	0.471	18.865	19.065	15.705
	1	0.103	5	0.445	0.448	0.453	16.395	17.025	16.125
	2	0.099	15	0.44	0.444	0.45	16.755	18.975	
	3	0.104	25	0.44	0.443	0.448	15.91	16.01	
	4	0.105	35	0.439	0.444	0.447	15.505	17.805	
	5	0.106	45	0.438	0.442	0.447	18.435	15.58	
	10	0.104					18.36	17.7	
	20	0.104					19.395	18.715	
	25	0.104					18.365	16.4	
	30	0.104					14.85	10.5	
	35	0.103					19.02	19.335	
	45	0.104					16.645	16.29	

Tabla 18. Datos obtenidos con pendiente de 5% y caudal aproximado de 125 l/s

Pendiente (%)	Tiempo caudal (min)	Caudal (m ³ /s)	Tiempo calados (min)	Calado (m)			Peso del material (kg)		
				Izquierda (cm)	Medio (cm)	Derecha (cm)			
5	0	0.125	0	0.475	0.478	0.48	19.235	14.25	13.67
	1	0.126	5	0.465	0.467	0.471	16.74	15.955	
	2	0.126	15	0.461	0.466	0.473	13.85	17.89	
	3	0.126	25	0.462	0.467	0.472	19.29	13.67	
	4	0.126	35	0.432	0.467	0.469	18.175	15.38	
	5	0.125	45	0.461	0.463	0.472	17.975	14.83	
	10	0.125					15.62	17.58	
	25	0.125					15.685	14.34	
	30	0.125					17.95	18.71	
	35	0.125					16.375	12.85	
	40	0.125					16.67	19.71	
	43	0.125					17.29	14.765	

Tabla 19. Datos obtenidos con pendiente del 5% y caudal aproximado de 145 l/s

Calado (m)			Peso del material (kg)		

Pendiente (%)	Tiempo caudal (min)	Caudal (m ³ /s)	Tiempo calados (min)	Izquierda (cm)	Medio (cm)	Derecha (cm)			
5	0	0.145	0	0.48	0.482	0.492	16.165	16.285	18.935
	1	0.143	5	0.478	0.484	0.49	18.385	14.89	18.925
	2	0.145	15	0.472	0.48	0.49	18.485	15.665	19.08
	3	0.146	25	0.475	0.48	0.489	14.325	14.725	17.28
	4	0.148	35	0.475	0.48	0.489	14.395	15.025	18.46
	5	0.145	45	0.472	0.481	0.49	18.335	12.92	
	10	0.145					17.49	5.705	
	15	0.145					15.995	19.01	
	25	0.145					19.565	16.085	
	30	0.145					15.18	16.08	
	35	0.145					15.87	15.41	
	40	0.145					18.525	18.21	
	45	0.145					14.755	18.955	

Tabla 20. Datos obtenidos con pendiente del 5% y caudal aproximado de 165 l/s

Pendiente (%)	Tiempo caudal (min)	Caudal (m ³ /s)	Tiempo calados (min)	Calado (m)			Peso del material (kg)		
				Izquierda (cm)	Medio (cm)	Derecha (cm)			
5	0	0.166	0	0.492	0.494	0.501	16.615	14.525	17.625
	1	0.165	5	0.491	0.494	0.496	14.785	15.135	15.03
	2	0.165	15	0.491	0.493	0.498	16.63	16.22	16.235
	3	0.166	25	0.492	0.495	0.498	17.89	13.14	
	4	0.165	35	0.491	0.494	0.5	15.02	17.475	
	5	0.165	45	0.482	0.494	0.501	15.2	15.92	
	10	0.165					18.325	17.265	
	15	0.165					18.155	14.39	
	20	0.165					15.105	16.125	
	25	0.166					16.06	15.64	
	35	0.165					16.68	16.34	
	40	0.165					18.42	16.7	
	45	0.166					19.195	3.345	

Tabla 21. Datos obtenidos con pendiente del 5% y caudal aproximado de 186 l/s

Pendiente (%)	Tiempo caudal (min)	Caudal (m ³ /s)	Tiempo calados (min)	Calado (m)			Peso del material (kg)		
				Izquierda (cm)	Medio (cm)	Derecha (cm)			
5	0	0.187	0	0.5	0.508	0.515	16.895	14.52	16.57
	1	0.186	5	0.504	0.51	0.518	15.67	17.88	14.655
	2	0.185	15	0.506	0.516	0.52	18.525	15.54	16.345
	3	0.186	25	0.504	0.51	0.518	18.74	15.56	13.995
	4	0.185	35	0.506	0.512	0.517	17.595	18.78	15.995
	5	0.187	45	0.505	0.51	0.516	16.33	19.58	14.125
	10	0.186					16.12	10.52	14.69
	15	0.187					15.385	15.15	
	20	0.187					16.495	16.445	
	25	0.188					17.018	15.965	
	30	0.187					15.48	18.55	
	35	0.187					14.05	18.24	
	45	0.188					15.835	13.27	

Tabla 22. Datos obtenidos con pendiente del 5% y caudal aproximado de 200 l/s

Pendiente (%)	Tiempo caudal (min)	Caudal (m ³ /s)	Tiempo calados (min)	Calado (m)			Peso del material (kg)		
				Izquierda (cm)	Medio (cm)	Derecha (cm)			
5	0	0.197	5	0.51	0.515	0.53	12.525	15.77	16.9
	2	0.197	15	0.508	0.512	0.532	13.73	19.165	13.165
	3	0.197	25	0.508	0.515	0.53	13.96	15.045	16.12
	4	0.197	35	0.51	0.513	0.534	14.2	15	19.31
	5	0.200	45	0.508	0.515	0.534	16.495	16.845	16.685
	15	0.199					13.605	14.705	16.84
	20	0.198					12.645	15.705	16.71
	25	0.200					13.87	14.31	15.745
	35	0.197					16.015	15.145	13.48
	40	0.199					14.285	14.145	16.645
	45	0.197					14.57	14.71	13.705

Anexo B. Parámetros linealizados por cada modelo potencial de cada diámetro característico.

Tabla 23. Parámetros linealizados con d50

Ln(So)	Ln(V)	Ln(V*)	Ln(qcampo)
-2.996	-1.000	0.300	-2.342
-2.996	-0.738	0.315	-2.389
-2.996	-0.583	0.341	-2.240
-2.996	-0.433	0.361	-2.140
-2.996	-0.321	0.377	-1.716
-2.996	-0.217	0.390	-1.598
-2.996	-0.130	0.406	-1.355
-2.996	-0.085	0.413	-1.352
-3.507	-0.719	-0.102	-5.407
-3.507	-0.460	-0.068	-4.676
-3.507	-0.291	-0.046	-4.641
-3.507	-0.186	-0.014	-4.348
-3.507	-0.084	0.008	-4.289
-3.507	-0.023	0.043	-4.317
-3.507	0.066	0.056	-3.946
-3.507	0.136	0.074	-3.933
-3.507	-0.014	0.036	-3.899

Tabla 24. Parámetros linealizados con d84

Ln(So)	Ln(Q)	Ln(V)	Ln(qcampo)
-2.996	5.631	-1.423	-3.613
-2.996	5.925	-1.162	-3.660
-2.996	6.133	-1.007	-3.511
-2.996	6.325	-0.857	-3.411
-2.996	6.471	-0.745	-2.987
-2.996	6.602	-0.640	-2.869
-2.996	6.722	-0.554	-2.625
-2.996	6.783	-0.508	-2.623
-3.507	5.601	-1.143	-6.678
-3.507	5.933	-0.884	-5.947
-3.507	6.147	-0.715	-5.912
-3.507	6.320	-0.610	-5.619
-3.507	6.470	-0.508	-5.560
-3.507	6.603	-0.447	-5.588
-3.507	6.721	-0.358	-5.217
-3.507	6.830	-0.287	-5.204
-3.507	6.597	-0.438	-5.170

Tabla 25. Parámetros linealizados con d90

Ln(So)	Ln(Q)	Ln(V)	Ln(qcampo)
-2.996	4.739	-1.601	-4.148
-2.996	5.033	-1.340	-4.195
-2.996	5.242	-1.185	-4.046
-2.996	5.433	-1.035	-3.946
-2.996	5.580	-0.923	-3.522
-2.996	5.710	-0.819	-3.404
-2.996	5.831	-0.732	-3.160
-2.996	5.891	-0.686	-3.158
-3.507	4.709	-1.321	-7.213
-3.507	5.041	-1.062	-6.482
-3.507	5.255	-0.893	-6.447
-3.507	5.428	-0.788	-6.154
-3.507	5.578	-0.686	-6.095
-3.507	5.711	-0.625	-6.123
-3.507	5.829	-0.536	-5.752
-3.507	5.938	-0.466	-5.739
-3.507	5.706	-0.616	-5.705

Anexo C. Anexos fotográficos



Figura 23. Desbroce de vegetación en los alrededores del canal



Figura 24. Conformación de capa de lecho móvil



Figura 25. Ejecución de experimento

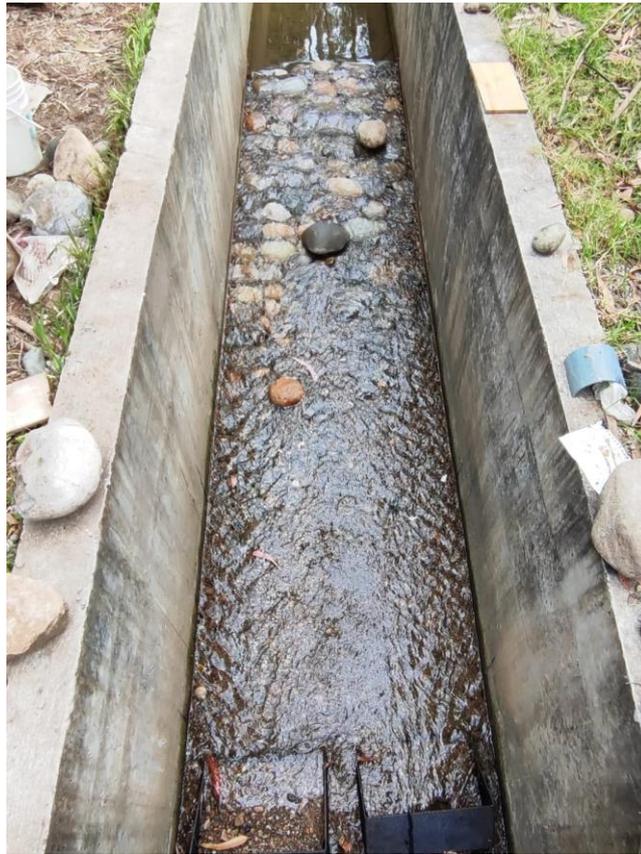


Figura 26. Finalización de experimento