



MÉXICO
GOBIERNO DE LA REPÚBLICA

CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUPERFICIALES E
INGENIERIA DE RÍOS**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL CON MODELOS FÍSICOS PARA
GENERACIÓN DE CRITERIOS DE PELIGRO POR
INUNDACIÓN Y PARA CARACTERIZACIÓN DE EFECTOS
DEL ARRASTRE DE SÓLIDOS SOBRE ESTRUCTURAS DE
CRUCE EN RÍOS DE ZONAS URBANAS
SGT-GASIR-DF-15-17-RF-AD**

**INFORME FINAL
PARTE 2**

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL CON MODELOS FÍSICOS PARA
GENERACIÓN DE CRITERIOS DE PELIGRO POR INUNDACIÓN Y PARA
CARACTERIZACIÓN DE EFECTOS DEL ARRASTRE DE SÓLIDOS SOBRE
ESTRUCTURAS DE CRUCE EN RÍOS DE ZONAS URBANAS”**

CONVENIO SGT-GASIR-DF-15-17-RF-AD
CLAVE IMTA: HC-1529.3

INFORME FINAL

PARTE 2

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO DEL
ARRASTRE DE SÓLIDOS EN FLUJOS A SUPERFICIE LIBRE CON ESTRUCTURAS
DE CRUCE EN RÍOS DE ZONAS URBANAS”**

Coordinación de Hidráulica
Subcoordinación de Obras y Equipos Hidráulicos

Jefe del Proyecto:
M. I. Xóchitl Peñaloza Rueda

Participantes:
M. I. José Alfredo González Verdugo
Dra. María Joselina Espinoza Ayala

Supervisión:
Ing. Efrén Martínez Ramírez

Noviembre de 2015

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
I. RECOPIACIÓN, REVISIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	3
I.1 Arrastre de material leñoso	3
I.2 Acumulación de material leñoso en estructuras de cruce.....	7
I.3 Afectación en estructuras de cruce.....	12
I.4 Potencial de acumulación de material leñoso	14
I.5 Medidas de mitigación.....	16
I.6 Estudios experimentales.....	20
II. CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS QUE SE PRESENTARÁN EN MODELOS	40
II.1 Características del flujo.....	40
II.2 Características de las pilas	41
II.3 Escalas.....	41
II.4 Caracterización de los sólidos flotantes	42
II.5 Distribución temporal del arrastre de sólidos	47
III. DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE LOS MODELOS.....	49
III.1 Módulos experimentales.....	49
III.2 Colocación de pilas.....	58
III.3 Fabricación de las muestras de material leñoso.....	59
IV. CALIBRACIÓN Y ENSAYOS PRELIMINARES	68
IV.1 Procedimiento para realización de ensayos.....	68
IV.2 Ensayos preliminares.....	73
IV.3 Calibración.....	75
V. ENSAYOS DE EVALUACIÓN DE LOS MODELOS Y MODIFICACIONES	76
V.1 Ensayos de evaluación.....	76
V.2 Modificaciones en la metodología experimental.....	77
V.3 Resultados de los ensayos.....	80
VI. GENERACIÓN DE METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CRUCE.....	88
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
REFERENCIAS.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I-1 LWD en cauces con diferentes anchuras, (D.B. Booth <i>et al.</i> , 1997).	4
Figura I-2 Posición de cauces y su interacción con los LWD, (D.B. Booth <i>et al.</i> , 1997). 4	
Figura I-3 Esquema de la probabilidad de que un árbol sea incorporado al cauce. Ruiz- Villanueva (2015).	6
Figura I-4 Tipos de acumulación de material leñoso en pilas.	8
Figura I-5 Ejemplos de acumulación de material leñoso en una pila y entre pilas.	8
Figura I-6 Longitud de tronco de diseño (L_t). P. F. Lagasse (2010)	9
Figura I-7 Separación efectiva entre las pilas.	9
Figura I-8 Longitud de tronco de diseño en pilas individuales en Indiana y Tennessee.	10
Figura I-9 Longitud de tronco de diseño para la separación entre pilas, en el Noroeste del Pacífico.	11
Figura I-10 Longitud de tronco de diseño en Estados Unidos.	11
Figura I-11 Puente colapsado (Guaileguay).	12
Figura I-12 Esquema del aumento de la socavación por acumulamiento en pilas.	13
Figura I-13 Acumulación de escombros en el diseño de pilas.	13
Figura I-14 Esquema de los procesos y las diferentes zonas de generación, transporte y depósito de material leñoso. Ruiz-Villanueva (2015).	15
Figura I-15 Aletas deflectoras.	18
Figura I-16 Cortina para retener sólidos flotantes.	18
Figura I-17 Espigones.	18
Figura I-18 Defectores.	19
Figura I-19 Barredoras.	19
Figura I-20 Barreras.	19
Figura I-21 Rejas.	20
Figura I-22 Esquema del modelo en planta y perfil.	21
Figura I-23 Tipos de puentes modelados.	22
Figura I-24 Material leñoso modelado.	22
Figura I-25 Prueba con el puente de barandilla.	23
Figura I-26 Probabilidad de bloqueo contra L/B (troncos solos) y D_R/H (raíces solas) para varios F y $h/H = 0.90$ (○, _), 0.93 (△, ...), 1.00 (□, __), y 1.07 (◇, - -) para el puente de la referencia.	24
Figura I-27 a) Vista en planta y (b) en corte del canal de aproximación del flujo y del arreglo de Reja para atrapar escombros.	25
Figura I-28 Ejemplo de los tipos de troncos de tres clases.	26
Figura I-29 Proceso de la prueba.	27

Figura I-30 Desarrollo de la relación de tirantes del flujo h/h_0 vs. V_D [%] para los diferentes volúmenes de troncos y de su variación en el tiempo de duración de la prueba (pruebas 20-24) y b) pruebas 25-27).....	28
Figura I-31 (a) Tirante relativo del flujo h/h_0 ; (b) longitud relativa de la carpeta de debris L_c/B_R para varios F_0 probados; cuadrados abiertos=muy grueso, círculos negros=grueso, círculos grises= medio, y círculos abiertos= mezclas de debris fino (pruebas 28-37).....	28
Figura I-32 Resultados para el caso de las clavijas o taquetes de madera.....	32
Figura I-33 Comparación respecto al tipo de modelo.	32
Figura I-34 Efecto de la velocidad en la acumulación de troncos para dos profundidades del flujo. a) 5 cm, b) 15 cm.....	33
Figura I-35 Distribución de la acumulación de troncos para dos profundidades, con velocidades aprox. constantes. a) $V = 15$ cm/s, b) $V = 25$ cm/s, c) $V = 30$ cm/s.....	33
Figura I-36 Modelo de baja de arena	34
Figura I-37 Efectos de la presencia de la barra de arena en la acumulación de troncos, para dos velocidades. a) $V = 25$ cm/s, b) $V = 15$ cm/s.....	34
Figura I-38 Efecto de la alternativa de control de la acumulación de troncos. a) Suma de troncos retenidos en la pila y el deflector, b) Acumulación de troncos en la pila....	35
Figura I-39 Efecto de la presencia de la barra de arena para dos gastos. a) $Q = 14$ l/s, $V = 22$ cm/s, b) $Q = 9$ l/s, $V = 14$ cm/s.	35
Figura I-40 Configuración del canal de pruebas y ubicación de las pilas.	37
Figura I-41 Visualización del tipo de pila utilizada en los experimentos.....	37
Figura I-42 Localización esquemática de los puntos de medición.....	38
Figura I-43 Ensaye para una acumulación de troncos en forma rectangular. La imagen de la derecha muestra la configuración de la socavación para este tipo de modelo de troncos.	38
Figura II-1 Fotografías de obstrucciones de material leñoso en pilas.....	44
Figura II-2 Esquema de espacio entre pilas.....	46
Figura II-3 Hidrograma Unitario (SCS).	47
Figura II-4 Distribución temporal del arrastre de material leñoso.....	48
Figura III-1 Esquema del canal de olas (estado original del modelo).	49
Figura III-2 Canal de olas (estado original del modelo).....	50
Figura III-3 Canal de olas (estado original del modelo).....	50
Figura III-4 Demolición de muros existentes.....	51
Figura III-5 Ampliación del depósito.	51
Figura III-6 Orientadores de flujo al inicio del canal.....	52
Figura III-7 Compuerta para controlar niveles y canasta para retención de sólidos.....	52
Figura III-8 Bomba sumergible.....	53
Figura III-9 Bombas, válvulas y baipás.	53

Figura III-10 Controles de las bombas.....	54
Figura III-11 Instalación de la línea de conducción con tubería de PVC de 6”.....	54
Figura III-12 Canal de pendiente nula terminado y operando.....	55
Figura III-13 Instalación de medidor de flujo.....	55
Figura III-14 Sensores de nivel instalados.....	56
Figura III-15 Micro ADV Sontek.....	56
Figura III-16 Cámaras fotográficas y de video instaladas.....	57
Figura III-17 Canal de pendiente variable.....	57
Figura III-18 Ubicación de las pilas los modulos experimentales, seccion transversal.....	58
Figura III-19 Pilas en cada uno de los canales.....	58
Figura III-20 Pasos para fabricacion de las muestras de material leñoso.....	59
Figura III-21 Material leñoso recolectado.....	59
Figura III-22 Material leñoso clasificado por tamaños (Vol. =18dm ³ y L _{max} = 23.3 cm).	60
Figura III-23 Material leñoso clasificado por tamaños (Vol. =15dm ³ y L _{max} = 30 cm)......	60
Figura III-24 Mezcla de material leñoso (L _{max} = 23.3 cm)......	61
Figura III-25 Troncos de mayor tamaño (L _{max} = 23.3 cm)......	61
Figura III-26 Ejemplos de los troncos con tramas o raices modelados.....	65
Figura III-27 Muestra de Vol.=30 dm ³ y L _d = 25 cm.....	66
Figura III-28 Distribución de material de acuerdo al troncograma.....	66
Figura III-29 Troncos y ramas menores separados para porcentajes requeridos en el troncograma.....	67
Figura III-30 Muestra de material leñoso con la distribuciónd del troncograma.....	67
Figura IV-1 Preparación de la muestra, paso 1.....	69
Figura IV-2 Inicio del ensayo y encendido de las cámaras, paso 4.....	69
Figura IV-3 Incorporación del material leñoso, paso 5.....	69
Figura IV-4 Retiro del material acumulado en las pilas, paso 7.....	70
Figura IV-5 Formato para las pruebas del canal de pendiente variable.....	71
Figura IV-6 Formato para las pruebas del canal de pendiente nula.....	72
Figura IV-7 Ensayos con diferente tirante.....	73
Figura IV-8 Ensayos con material saturado.....	74
Figura V-1 Tiempo de ensayo – volumen retenido, Vol. 1.5 dm ³ , Fr=0.37, Lt _d =25 cm.	78
Figura V-2 Ensayos para un volumen de 1.5 dm ³ y Lt _d =25 cm.....	79
Figura V-3 Volumen de la muestra – tiempo sin acumulaióón, Fr = 0.51 y Lt _d =25 cm.	80
Figura V-4 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 7.5 dm ³ y Fr=0.37...81	81
Figura V-5 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 15 dm ³ y Fr=0.37....81	81
Figura V-6 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 30 dm ³ y Fr=0.37....81	81

Figura V-7 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 1.5 dm³ y Fr=0.51...82
 Figura V-8 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 3 dm³ y Fr=0.51.....82
 Figura V-9 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 6 dm³ y Fr=0.51.....82
 Figura V-10 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 1.5 dm³ y Fr=0.64.
83
 Figura V-11 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 3 dm³ y Fr=0.64....83
 Figura V-12 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 6 dm³ y Fr=0.64....83
 Figura V-13 Volumen de la muestra – tiempo sin acumulación, Fr = 0.3784
 Figura V-14 Volumen de la muestra – tiempo sin acumulaición, Fr = 0.51.....85
 Figura V-15 Volumen de la muestra – tiempo sin acumulaición, Fr = 0.64.....85
 Figura V-16 Volumen del material – tiempo sin acumulación, valores de prototipo....86
 Figura VI-1 Vol – t, para diferentes relaciones Ep/Lt_d y diferentes Fr.....89
 Figura VI-2 Fr - S_p/Lt_d y Fr - t para diferentes volúmenes.90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I-1 Coeficiente de arrastre.....	14
Tabla I-2 Clases de troncos probados y Mezclas de troncos.....	25
Tabla I-3 Rangos de los parámetros en campo y laboratorio.....	30
Tabla II-1 Caracterización de material leñoso.....	44
Tabla II-2 Altura y diámetro de diferentes tipos de árboles.	44
Tabla II-3 Volúmenes de material leñoso a modelar.	45
Tabla II-4 Volúmenes a modelar en el canal de pendiente nula.	46
Tabla II-5 Longitudes y diámetros en la mezcla para $L_d = 30$ cm.	46
Tabla II-6 Volúmenes a modelar en el canal de pendiente variable.	47
Tabla II-7 Longitudes y diámetros en la mezcla para $L_d = 20$ cm.....	47
Tabla II-8 Tiempos de arrastre de material, en el modelo.....	48
Tabla IV-1 Características hidráulicas en modelo.	75
Tabla IV-2 Características hidráulicas en prototipo.	75
Tabla V-1 Canal de pendiente nula y longitud máxima de tronco de 30 cm.....	77
Tabla V-2 Canal de pendiente variable ($S=0.0009$) y.....	77
Tabla V-3 Tiempos sin acumulación, $Fr=0.37$	84
Tabla V-4 Tiempos sin acumulación, $Fr=0.51$	84
Tabla V-5 Tiempos sin acumulación, $Fr=0.64$	85

INTRODUCCIÓN

Existen diferentes amenazas naturales que con frecuencia afectan las zonas urbanas, entre ellas destacan las de origen hidrometeorológico, sobre todo precipitaciones intensas y las provocadas por ciclones tropicales, las cuales al vincularse con el proceso de desarrollo o extensión de zonas urbanas pueden causar grandes desastres, como inundaciones, que conllevan a daños materiales, suspensión de servicios y pérdidas económicas y hasta humanas.

Existe cierto avance en investigaciones y acciones para mitigar los efectos de las inundaciones, sin embargo, falta estudiar en conjunto los diferentes factores que las provocan, tomando en cuenta la naturaleza de los ríos y sus cuencas de aportación. Por ejemplo, en las cuencas hay factores importantes como el cambio de uso de suelos, la deforestación, la impermeabilización de la superficie en zonas urbanas, etc., y en los causes, su morfología, arrastre de sólidos, acumulación de sedimentos, estabilidad de taludes, deslizamiento de laderas, etc. Así como considerar la interrelación entre el comportamiento hidrológico-hidráulico de los cauces con obras para el aprovechamiento de los recursos hídricos o de defensa y obras de comunicación.

Un campo que actualmente se estudia pero que falta por investigar es el efecto del arrastre de material leñoso en ríos y arroyos, ante eventos meteorológicos, así como la afectación en las estructuras de cruce. En particular no existe en la literatura recomendaciones con sustento para el diseño del claro efectivo entre pilas de los puentes, necesario para disminuir la probabilidad de que se acumulen sólidos flotantes entre las pilas, y evitar que estas obstrucciones provoquen el desbordamiento del cauce, así como disminuir la posibilidad de falla de la estructura.

En México no se dispone de suficientes reportes elaborados a detalle sobre casos de obstrucciones de material leñoso en puentes, ni mediciones o suficiente investigación sobre el tema. Para solventar esto sería necesario llevar a cabo una campaña de medición y caracterización de eventos futuros, lo que requeriría un periodo y recursos considerables.

Por lo anterior, y dada la necesidad de proponer estrategias para evitar inundaciones causadas por la construcción de estructuras de cruce, la CONAGUA requirió al IMTA

un estudio experimental con modelos físicos para la caracterización del efecto del arrastre de sólidos (madera) en flujos a superficie libre con estructuras de cruce en zonas urbanas. Esto con el objetivo de generar una metodología para establecer las propiedades de las estructuras de cruce ante el efecto de arrastre de sólidos (madera), para garantizar el correcto funcionamiento hidráulico; específicamente para determinar el claro o separación mínima entre pilas, con el cual se evite o reduzca la posibilidad de acumulación de material leñoso entre las mismas.

Para cumplir con el objetivo del presente estudio se llevó a cabo una recopilación bibliográfica, revisando las publicaciones más relevantes en el tema de arrastre de sólidos en ríos. Con base en el estado del arte y el análisis de la problemática, se realizó la caracterización de los procesos a modelar y se diseñó el módulo experimental que se adecuó en el laboratorio de hidráulica. Se llevaron a cabo la calibración y los ensayos preliminares y de evaluación para proponer las modificaciones pertinentes, con lo que se definieron y obtuvieron los parámetros necesarios para la generación de la metodología para el diseño de estructuras de cruce. En los siguientes capítulos se describen a detalle cada una de las actividades realizadas.

I. RECOPIACIÓN, REVISIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Con base en la investigación realizada sobre el tema de arrastre de material leñoso, específicamente sobre la afectación en estructuras de cruce, en este primer capítulo se presenta una descripción general del fenómeno de flujo con material leñoso, desde su producción, arrastre, acumulación y estimación del potencial de presencia y acumulación, así como los problemas que ocasionan en las estructuras de cruce. Después se describen algunas medidas estructurales utilizadas para reducir las acumulaciones de material leñoso, incluyendo la separación entre pilas como medida estructural, que es el caso del presente estudio. Finalmente se presentan estudios experimentales publicados que tienen relación el tema.

I.1 Arrastre de material leñoso

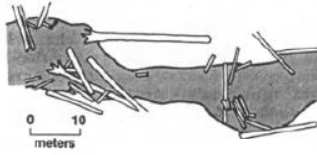
Se entiende por “arrastre de sólidos” al material flotante o sumergido, como troncos, vegetación o basura, que es transportado por una corriente. En este estudio nos vamos a referir exclusivamente al arreste de material leñoso, como son troncos, ramas y raíces. R. B. Manners *et al.* (2007) clasifican el material leñoso por su tamaño como: restos pequeños de madera (SWD, small woody debris) con un diámetro < 1 cm; restos medianos de madera (MWD, medium woody debris) con 1 cm < diámetro <10 cm; y restos grandes de madera (LWD, large woody debris) con un diámetro >10 cm.

El potencial de arrastre depende del flujo, las características del cauce, disponibilidad de material leñoso y de su tamaño y orientación con respecto al cauce, así como la presencia de obstáculos en el cauce. El potencial del arrastre aumenta con mayor caudal, como es el caso de las crecidas, debido a que aumenta la velocidad, la profundidad y el gradiente de energía. También se incrementa al aumentar la anchura del cauce, pero la concentración de material leñoso disminuye. En cauces estrechos rara vez se transportan LWD (J.B. Bradley, 2005). Ver Figura I-1.

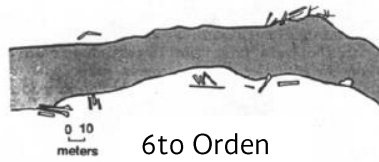
En una cuenca idealizada, la posición de un cauce en la red de drenaje se puede correlacionar con las fuentes de sedimentos, la pendiente, el papel de los LWD y la morfología visible. (Derek B. Booth *et al.*, 1997). Ver Figura I-2.



1er Orden



3er Orden



6to Orden

Position of large woody debris in channels of different sizes (redrawn from Salo and Cundy, 1987).

Figura I-1 LWD en cauces con diferentes anchuras, (D.B. Booth et al., 1997).

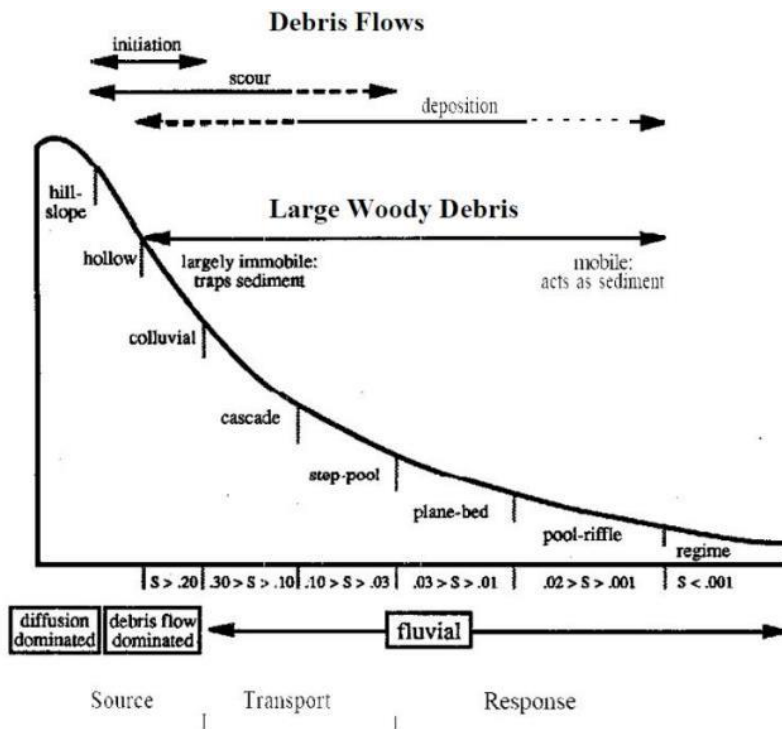


Figure 1. Characteristics of the channel types of Montgomery and Buffington (1993).

Figura I-2 Posición de cauces y su interacción con los LWD, (D.B. Booth et al., 1997).

La disponibilidad de material leñoso depende de diversos factores, como la densidad, distribución y condiciones de las laderas boscosas, llanuras de inundación y riberas a lo largo de una corriente; la morfología de los árboles y vegetación en general que se localizan en zonas cercanas a los cauces; la morfología y dinámica fluvial, etc. También influyen factores externos como la tala de árboles y desmontes. En la parte alta de las cuencas, un mecanismo importante en la generación de arrastre de material leñoso son los escurrimientos y deslizamientos de laderas, mientras que en algunos casos el factor importante puede ser el viento. (P. F. Lagasse, 2010).

Wallerstein y Thorne (2004) notaron que la acumulación de troncos es el resultado de los siguientes mecanismos (P. F. Lagasse, 2010):

- 37% debido a la erosión de las orillas, en la parte externa de las curvas de los cauces.
- 36% debido al desgaste de las márgenes en tramos con degradación.
- 12 % debido a la acción del viento.
- 7% material leñoso en antiguos depósitos aluviales.
- 5% iniciado por grandes troncos que son arrastrados desde aguas arriba.
- 3% diques de castores.

De acuerdo con varios autores, la probabilidad de que un árbol sea incorporado a un cauce está en función de la distancia a la que se encuentran con respecto al hombro del cauce. Robison y Beschta (1990) propusieron la ecuación (1.1) para determinar dicha probabilidad, cuyas variables se describen en el esquema de la Figura I-3.

$$P = \frac{AD}{2\pi H_e} = \frac{\cos^{-1}(D/H_e)}{180^\circ} \quad (1.1)$$

Donde:

P = probabilidad

AD = longitud del arco de círculo dentro del cauce

D = distancia del árbol al hombro del cauce

H_e = altura efectiva del árbol (altura total menos la punta que no se considera LWD).

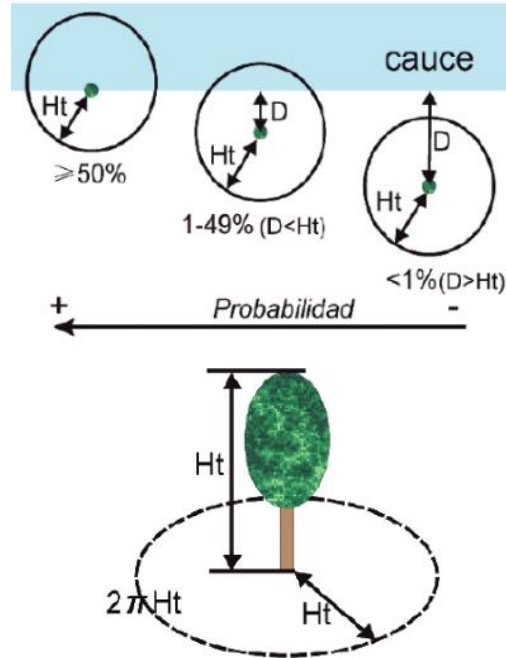


Figura I-3 Esquema de la probabilidad de que un árbol sea incorporado al cauce. Ruiz-Villanueva (2015).

Braudrick *et al.* (1997) y Braudrick y Grant (2001) publicaron resultados de experimentos sobre el transporte, la dinámica y la deposición de grandes escombros leñosos en ríos. En estos experimentos observaron que los troncos flotantes tienden a orientarse paralelos al eje del río. Observaron tres tipos de régimen de transporte: descongestionado, congestionado y semicongestionado. Ellos indican que la entrada o puesta en movimiento de los troncos depende principalmente de: el ángulo del tronco relativo a la dirección del flujo, la densidad del tronco, el diámetro del tronco y la presencia o ausencia de raíces. Los troncos se depositaron donde el tirante fue menor que la profundidad de flotación, típicamente en zonas someras y a lo largo de la parte externa de una curva.

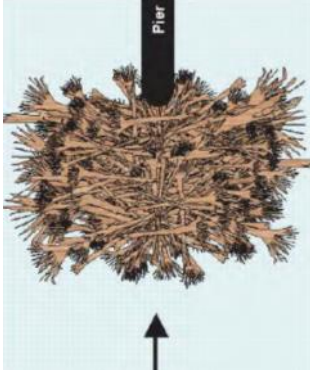
En los experimentos conducidos por Bocchiola *et al.* (2006a), investigaron el inicio del movimiento de troncos parcialmente sumergidos, evaluaron el tirante del flujo y la velocidad y obtuvieron un modelo teórico del arrastre de troncos. Estos estudios indican que las profundidades, las velocidades y la morfología del cauce afectan fuertemente la distancia del transporte y su recorrido. Los troncos con mayor longitud que el ancho del cauce tienden a estar estables y son removidos solamente cuando se presentan grandes avenidas.

I.2 Acumulación de material leñoso en estructuras de cruce

El material leñoso transportado puede ser retenido, formando acumulaciones importantes en diferentes lugares donde la corriente pierde fuerza o de acuerdo con Abbe y Montgomery (1996) cuando el tirante es menor que aproximadamente la mitad del diámetro del tronco. También se forman acumulaciones cuando las secciones transversales del cauce se vuelven más estrechas o en obstrucciones dentro del río, como pilas o estribos de puentes, barras, playones, islas, rocas, pozas formadas en la parte externa de las curvas, entre otros. El índice de acumulación depende de la concentración, definida como el número de troncos por unidad de longitud (Chang 1979). Lyn *et al.* (2003b) sugieren que la captación, el transporte y la acumulación de material leñoso parece ser un proceso con cierta aleatoriedad, mientras que los resultados de Manners *et al.* (2007) muestran que la relación entre los troncos individuales y las acumulaciones de material leñoso son complejas y no lineales. Abbe y Montgomery (1996) y Bocchiola *et al.* (2008), observaron que la probabilidad de acumulación de troncos se incrementaba con la longitud de los troncos y decrecía con el número de Froude. Las acumulaciones son más propable si se tiene un puente con pilas. Manners y Doyle 2008 describen dos procesos principales en la acumulación: 1) la retención de un solo tronco que inicia la formación del atasco o enjambre y 2) los troncos que se van sumando hasta bloquear la sección y alargar el enjambre.

Las acumulaciones en pilas de puentes pueden ser de dos tipos: acumulaciones en una sola pila y claros obstruidos. El segundo tipo a su vez se puede presentar entre pila y pila, pila y estibo, pila y hombro del cauce, o con otros obstáculos fijos como rocas grandes o árboles. Diehl, T.H., (1997) realizó un estudio en los Estado Unidos sobre acumulación de material leñoso en pilas de puentes, con base en recopilación bibliográfica, 2,577 casos de acumulaciones reportados y 144 investigaciones de campo. Observó que las acumulaciones en una sola pila se producen cuando la longitud máxima efectiva de los troncos es menor que la separación efectiva entre las pilas del puente, por el contrario, cuando la longitud de los troncos supera la apertura efectiva entre pilas se producen acumulaciones que bloquean los claros entre las pilas. En el segundo caso, por lo regular las acumulaciones contienen uno o más troncos que se extienden en todo el ancho de la acumulación. El ancho máximo de la acumulación entre pilas es aproximadamente igual a la longitud máxima de los troncos robustos. Este fenómeno está influenciado por el tipo y colocación de las pilas.

Acumulación en una pila



Claro obstruido



Figura I-4 Tipos de acumulación de material leñoso en pilas.



Figura I-5 Ejemplos de acumulación de material leñoso en una pila y entre pilas.

Por lo tanto, dos variables fundamentales que influyen en el proceso de acumulación de material leñoso en las pilas de los puentes son la longitud máxima efectiva de los troncos y la separación efectiva entre las pilas del puente, que se definen como:

- La longitud máxima efectiva de los troncos, también llamada longitud de tronco de diseño (L_{td}) se define como la longitud por encima de la cual los troncos no son lo suficientemente abundantes y fuertes en toda su longitud para producir una acumulación igual a su longitud. En otras palabras, es la longitud del tronco que por su resistencia se conserva en el proceso de arrastre y acumulación, por lo que esta longitud no necesariamente representa la longitud máxima absoluta de los árboles dentro de la cuenca aguas arriba del sitio. Este dato se toma en cuenta para el diseño de los puentes, especialmente para determinar la

separación entre pilas. En la Figura I-6 se presenta un esquema que representa la longitud de tronco de diseño.

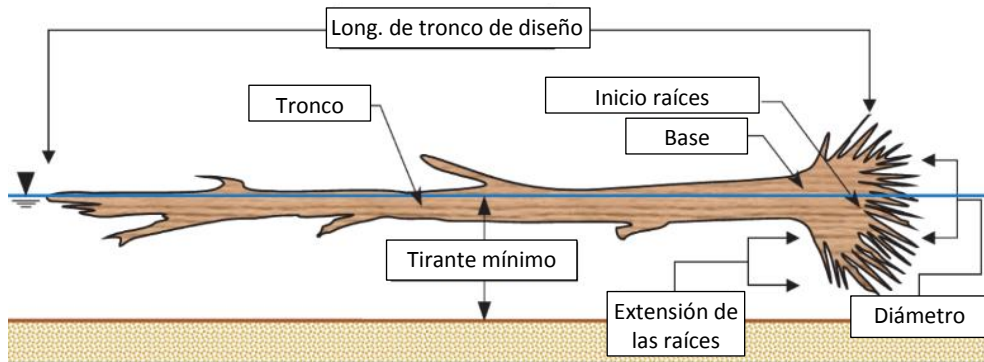
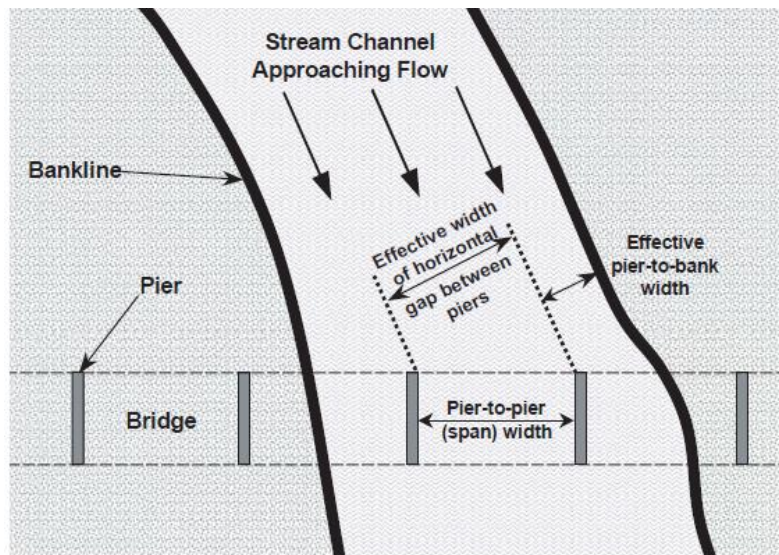


Figura I-6 Longitud de tronco de diseño (L_{td}). P. F. Lagasse (2010)

- Separación efectiva entre las pilas del puente. Es la distancia entre las líneas paralelas al flujo que se aproxima y que pasan a través de la nariz de cada pila. En la Figura I-7 se muestra el esquema que define este concepto.



Source: after Diehl (1997)

Figura I-7 Separación efectiva entre las pilas.

Diehl, T.H., (1997) obtuvo, como resultado de su estudio en los estados de Indiana y Tennessee, las gráficas que se presentan en la Figura I-8, que muestran el ancho del

cauce aguas arriba contra el ancho de la acumulación de material leñoso en pilas individuales con potencial de socavación, donde la línea discontinua representa la curva de anchos máximos de acumulación, o longitudes de tronco de diseño para diferentes anchos de cauce.

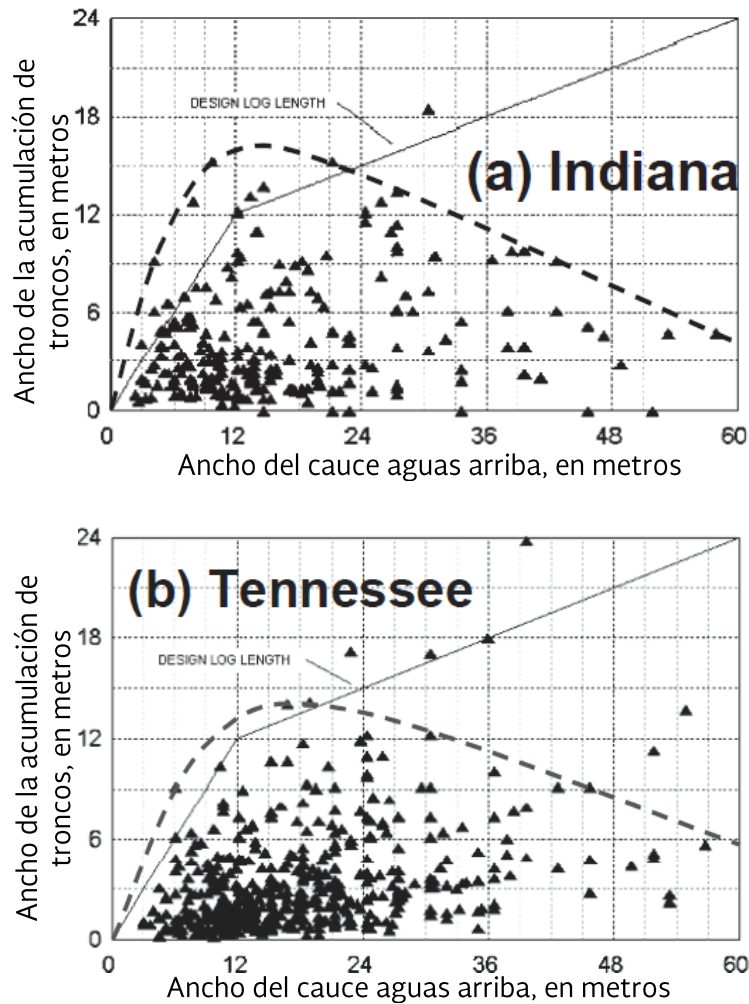


Figura I-8 Longitud de tronco de diseño en pilas individuales en Indiana y Tennessee.

Así mismo, Diehl (1997) presentó resultados para el caso de claros obstruidos o acumulación entre pilas en el noroeste del Pacífico, con lo que recomienda una longitud de tronco de diseño de 24 m para esa zona, aunque encontró también esta longitud de tronco en gran parte de Estados Unidos, sobre todo en el Este. En el norte de California y el noroeste del Pacífico la longitud de tronco de diseño llega a los 45 m. Ver Figura I-9 y Figura I-10.

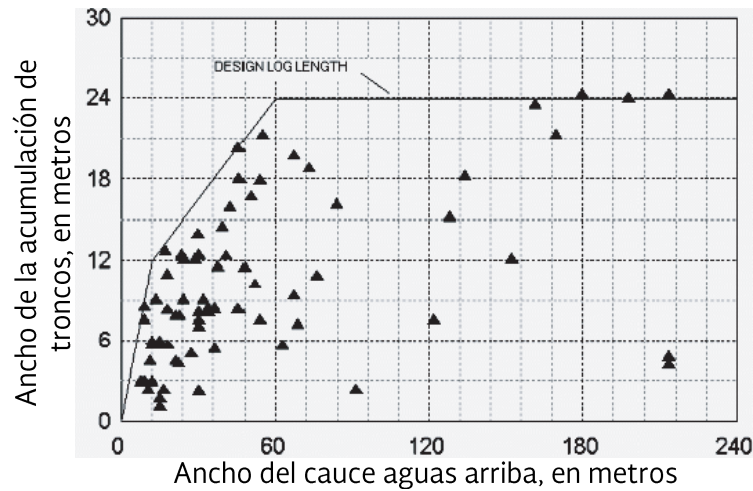


Figura I-9 Longitud de tronco de diseño para la separación entre pilas, en el Noroeste del Pacífico.

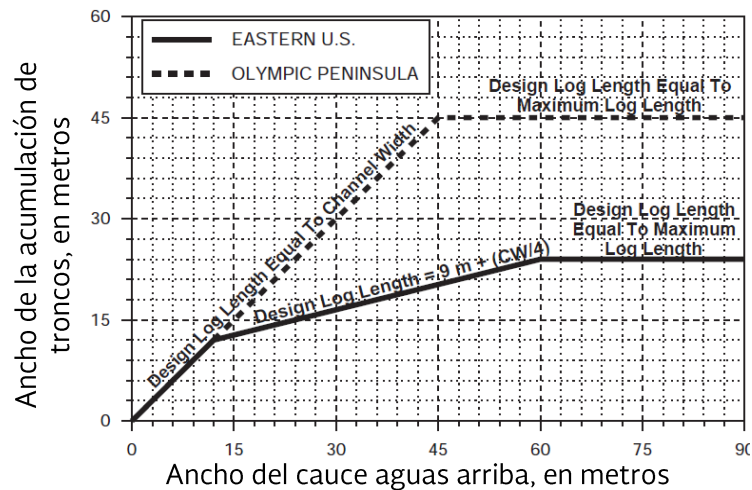


Figura I-10 Longitud de tronco de diseño en Estados Unidos.

Bezzola *et al.* (2002) presentó experimentos sistemáticos para investigar el proceso de acumulación de material leñoso en ríos de montaña. Analizó la probabilidad de bloqueo de troncos y raíces en un modelo de puente, en términos de la sección transversal del puente (rectangular, trapezoidal y con estribos laterales), el bordo libre y las características del flujo. Todos los puentes que modelaron fueron sin pilas, y de las pruebas resultaron dos ecuaciones para determinar la probabilidad de bloqueo. Los resultados señalan que: la probabilidad de bloqueo es más o menos independiente del bordo libre para una sección dada y de la condición del flujo. Para secciones transversales trapezoidales y con estribos laterales observaron un incremento del

riesgo de bloqueo. La presencia de raíces incrementa la probabilidad de bloqueo con respecto a los troncos solos, ya que la máxima probabilidad de bloqueo se observó para una acumulación de escombros conteniendo raíces.

I.3 Afectación en estructuras de cruce

La acumulación de material leñoso en las pilas de los puentes provoca el aumento del nivel del agua incluso por encima de la superestructura, se adiciona el empuje por los volúmenes retenidos y se incrementa la socavación en las pilas y estribos, lo que pueden llevar al colapso de la estructura, además se generan remansos que pueden provocar desbordamiento e inundaciones. Estos problemas se presentan principalmente durante avenidas extremas. Por lo tanto, una estructura de cruce con acumulación de material leñoso puede estar sometida principalmente a fuerzas hidrodinámicas, hidrostáticas, flotantes, laterales y de impacto.



Figura I-11 Puente colapsado (Gualeguay).

Debido a la contracción por las obstrucciones de material leñoso en las pilas de los puentes se incrementa la velocidad del flujo debajo de las acumulaciones, provocando la formación de vórtices (funcionando como una compuerta), lo que favorece la socavación en la zapata de las pilas. Ver Figura I-12.

La acumulación de escombros flotantes en la forma de troncos y ramas durante eventos de avenidas juega un rol crítico en la ocurrencia de socavación en pilas de puentes, que puede tener efectos catastróficos. Por ejemplo, en 1980 colapsó una parte del puente Perkins Road sobre Nonconnah Creek en Memphis, Tennessee. En el estudio de este evento, los ingenieros encontraron que un 20% del bloqueo entre pilas podría alterar las condiciones de flujo y socavar los 12 pies de empotramiento de las pilas de apoyo del puente que falló. Con el fin de contribuir a la disminución de esta problemática, en 2010, Ayres Associates Inc realizó un estudio para mejorar las técnicas de predicción del desarrollo y la forma de la acumulación de escombros y la extensión de la socavación resultante en las pilas de puente, este estudio se describe en el apartado de estudios experimentales (Efectos de los escombros en la socavación de pilas de puentes).

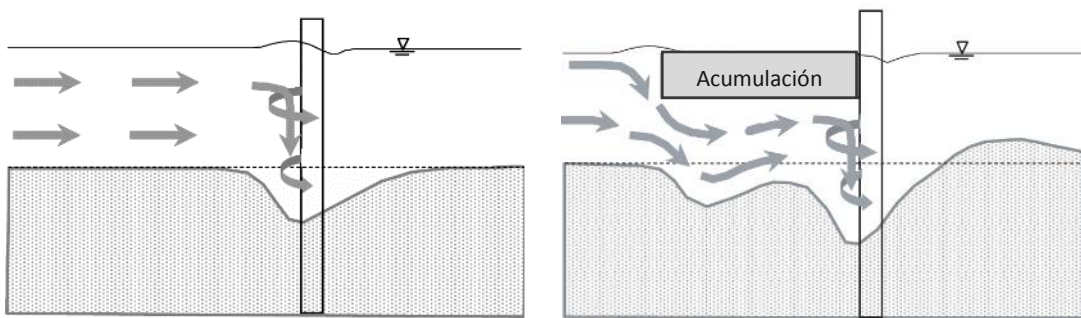


Figura I-12 Esquema del aumento de la socavación por acumamiento en pilas.

En las especificaciones de diseño de AASHTO LRFD BRIDGE, consideran la presión generada por escombros para el diseño estructural de las pilas.

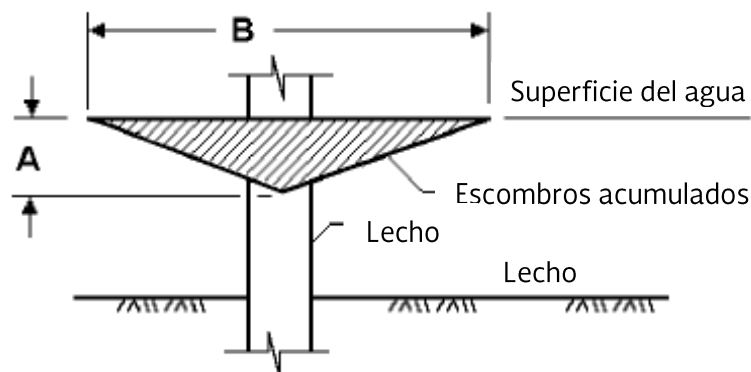


Figura I-13 Acumulación de escombros en el diseño de pilas.

Calculan la presión del flujo de agua actuando en la dirección longitudinal de la estructura con la siguiente expresión.

$$P = \frac{C_D V^2}{1000} \quad (1.2)$$

Donde:

P = presión de flujo de agua (ksf).

C_D = coeficiente de arrastre.

V = velocidad del agua para un evento extremo (ft/s).

Tabla I-1 Coeficiente de arrastre.

Tipo	D_D
Pilas de nariz semicircular	0.7
Pilas con terminación cuadrada	1.4
Escombros acumulados en la pila	1.4
Pila en forma de cuña con ángulo menor o igual a 90°	0.8

I.4 Potencial de acumulación de material leñoso

Para conocer la dinámica de incorporación de la carga leñosa a los ríos es necesario identificar las posibles áreas contribuyentes, las cuales deben estar conectadas con el cauce. En la Figura I-14 se presenta un esquema donde se ejemplifican las zonas de generación, transporte y depósito de material leñoso. Ruiz-Villanueva *et al.* (2015).

La probabilidad de que una pieza de madera llegue al río aumenta con el incremento de la pendiente, la cercanía al cauce y la altura del árbol, así como de la intensidad y frecuencia de los procesos de incorporación. Se requiere además un conocimiento detallado de la tipología y distribución de la vegetación, ya que el tipo de vegetación existente, la especie, su estado y su densidad serán parámetros fundamentales para entender la facilidad o resistencia a ser incorporados al río por estos procesos y en la cantidad de piezas que lleguen al cauce (Hutte, 1968; Stumbles, 1968; Naka, 1982; Abernethy y Rutherford, 2001; Webb y Erskine, 2003).

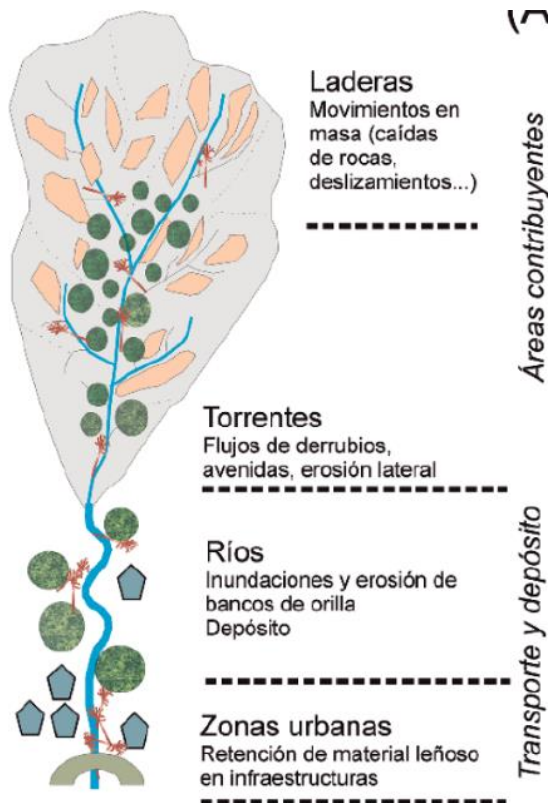


Figura I-14 Esquema de los procesos y las diferentes zonas de generación, transporte y depósito de material leñoso. Ruiz-Villanueva (2015).

Así, el potencial de acumulación de material leñoso en puentes se estima en función de las características del sitio y del cauce aguas arriba, y de las características y condiciones de la cuenca, también puede ser útil conocer las condiciones de cuencas vecinas.

Diehl (1997) presentó una metodología para estimar el potencial de acumulación de material leñoso, la cual consiste en tres fases compuestas con determinadas tareas. Esta metodología fue retomada y complementada por P. F. Lagasse (2010). Las tres fases principales son:

1. Evaluar el potencial de producción y entrega del material leñoso.
2. Evaluar el potencial de acumulación de material leñoso en elementos individuales.
3. Delimitar zonas con potencial de acumulación similares.

Para cada una de estas fases se cuenta con un procedimiento definido con formatos para la captura de los datos. Gran parte de esta información necesaria para aplicar esta metodología puede ser obtenida a partir de mapas, fotografías aéreas existentes, encuestas y reportes de acumulación de sólidos en puentes.

Ruiz-Villanueva *et al.* (2014c) definieron una serie de ecuaciones sencillas, a la vez que generaron diferentes escenarios en función de la frecuencia e intensidad de los procesos de incorporación, en las que el volumen incorporable se calcula con fórmulas del tipo:

$$V_i = (A_i \cdot C_i \cdot D_i) \cdot F_c \quad (1.3)$$

Donde:

V_i , el volumen potencialmente incorporable

A_i , el área contribuyente de un determinado proceso i

C_i , la cubierta forestal

D_i , la densidad

Este volumen es reducido por un factor de corrección F_c , que equivale a la resistencia a ser reclutado y puede ser igual a 0,1, 0,5 ó 1 en función de las matrices de lógica difusa. Esta resistencia de la vegetación depende del tipo de especie y del estado silvicultural. De esta manera, se pueden identificar aquellas zonas con mayor probabilidad de generar desechos leñosos, estimándose volúmenes de madera potencialmente disponible para una o varias cuencas.

1.5 Medidas de mitigación

El método que se usa más ampliamente para combatir la acumulación de escombros es la remoción, pero este método es difícil y costoso. Las acumulaciones de escombros pueden permanecer en el lugar y potencialmente crecer con el número de avenidas que ocurran. Las acumulaciones de madera que permanecen en un sitio por largos periodos de tiempo pueden inducir la formación de barras o islas. En algunos países como Estados Unidos, controlan el arrastre y acumulación de material leñoso con medidas

estructurales alternativas, como aletas en las pilas de los puentes, represas, espigones, deflectores, barredoras, puntales, rejas y características de diseño de los puentes. El último caso es el que se analizará en este estudio. A continuación se describe estas medidas estructurales y se presentan fotografías obtenidas de Terry J *et al.* (2012) (figuras del I-15 a I-21).

Aleta deflectora. Consisten de una pared delgada de concreto, con rieles de acero instalados aguas arriba de la pila y alineada con el flujo (Reihisen y Harrison, 1971). Sirve para impedir que se atasquen los troncos al frente de la pila. Ver Figura I-15.

Presa. Estructura en una sección del cauce que impide el flujo, proporcionando espacio de almacenamiento para los escombros. Este tipo de estructura es costosa en su construcción y mantenimiento. Ver Figura I-16.

Espigón. Son estructuras que se colocan en los cauces desde las orillas, en sentido no lineal con el flujo, modifican el patrón del flujo para redistribuir el transporte de escombros en el cauce. Ver Figura I-17.

Deflector. Son estructuras situadas aguas arriba de los pilares del puente para desviar y guiar los sólidos flotantes a través de la apertura del puente. Ver Figura I-18.

Barredora. Es un dispositivo de polietileno que está unida a un cable vertical de acero inoxidable o columna colocada en el lado aguas arriba de la columna de puente. El dispositivo de polietileno se desplaza verticalmente a lo largo de la pila cuando la superficie del agua sube y baja. También se hace girar por el flujo, haciendo que los sólidos flotantes se desvíen de la pila pasando por debajo del puente. Ver Figura I-19.

Barrera. Son estructuras que flotan en la superficie del agua para retener los sólidos flotantes, requieren guías para mantenerse en su lugar. Ver Figura I-20.

Reja. Se compone por una serie de barrotes colocados a lo largo de una sección del cauce, para retener sólidos flotantes, se coloca aguas arriba de la estructura a proteger. Ver Figura I-21.



Debris fins upstream of bridge piers (Lagasse et al. 2010)



Debris fins independent of bridge pier structure (Bradley et al. 2005)

Figura I-15 Aletas deflectoras.



Figure 7. Debris basin constructed of precast concrete sections (Bradley et al. 2005)

Figura I-16 Cortina para retener sólidos flotantes.



Figure 8. Weirs on outer bank of river (Bradley et al. 2005)

Figura I-17 Espigones.



Debris accumulation at single column debris deflectors (Lyn et al. 2003)

Figura I-18 Deflectores.



Figure 17. Debris sweeper (Bradley et al. 2005)



Close up of a debris sweeper installed on the Cedar Creek in Washington.

Figura I-19 Barredoras.



Figure 18. Debris boom protecting surface turbine (Tyler 2011)

Figura I-20 Barreras.



Figura I-21 Rejas.

Características de diseño. Son las características estructurales que se pueden implementar en el diseño de una estructura de puente. La primera característica es bordo libre, que es una medida de seguridad para proporcionar espacio adicional entre la máxima elevación de la superficie del agua y la elevación de la parte baja del puente. La segunda característica se relaciona con el tipo de pilas y la ubicación y la separación entre ellas. Idealmente, la subestructura debería conformarse de muros continuos en lugar de pilas aisladas, y estar alineados con el flujo de aproximación. Estos también deben estar colocados y separados de tal manera que el potencial de acumulación de sólidos flotantes se reduzca al mínimo. La tercera característica consiste en el diseño de superestructuras especiales, como las cubiertas delgadas, que ayudan a prevenir o reducir acumulación de escombros en la estructura cuando el nivel del agua sobrepasa la cubierta. La última característica implica proporcionar un acceso adecuado a la estructura de mantenimiento anual.

De estas características de diseño, en este estudio se tratará sobre la separación entre pilas.

I.6 Estudios experimentales

De la recopilación de publicaciones de estudios experimentales, se presentan aquí los que tienen mayor relación con el tema de efecto de arrastre de material leñoso en puentes.

1.6.1 Probabilidad de acumulación de troncos en la superestructura de puentes

Schmocker ,L. y Hager, H. (2011) realizaron un estudio experimental para determinar la probabilidad de acumulación de material leñoso en la superestructura de puentes con diferentes elementos estructurales. Tomaron en cuenta las dimensiones de los troncos, el bordo libre, las características del flujo y las características del puente. Los resultados permiten estimar la probabilidad de bloqueo para troncos solos y con raíces. Esto se puede emplear como herramienta para evaluación del riesgo ante inundaciones.

Instalación. Se utilizó un canal rectangular con capacidad de 150 l/s ($\pm 0.1\%$), ancho de 0.60 m, 0.60 m de alto y 13 m de largo. La pendiente varió entre $0 \leq S_0 \leq 2\%$, ver Figura I-22.

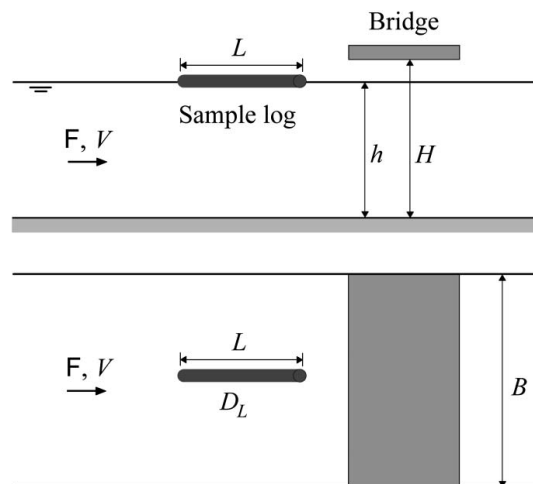


Figura I-22 Esquema del modelo en planta y perfil.

Modelos de puentes. Los puentes se fijaron directamente a las paredes del canal, a 8.70 m de la entrada y a una altura $H = 0.15$ m sobre el fondo. Se probaron tirantes de $h \geq 0.05$ m. Las dimensiones de la losa de los puentes fueron: largo de 0.60 m, 0.10 m de ancho, y 0.010 m de espesor. Se probaron 4 tipos de puentes: (a) la pura losa, (b) el puente de armadura o de viga (0.095 m de alto), (c) un puente de barandilla de 0.05 m de alto y (d) un puente deflector de 0.05 m de alto, ver Figura I-23.

Modelo del material leñoso. Se usaron cinco tipos de troncos y ocho tipos de raíces. Todos los troncos fueron de madera natural sin brazos y son comparativamente más

lisos que los troncos naturales. La longitud de los troncos varió entre $\frac{1}{4} B = 0.15$ m y $1.5 B = 0.90$ m; y su diámetro D_L entre 0.015 y 0.02 m. El diámetro máximo de las raíces varió entre 0.12 y 0.22 m. Ver Figura I-24.

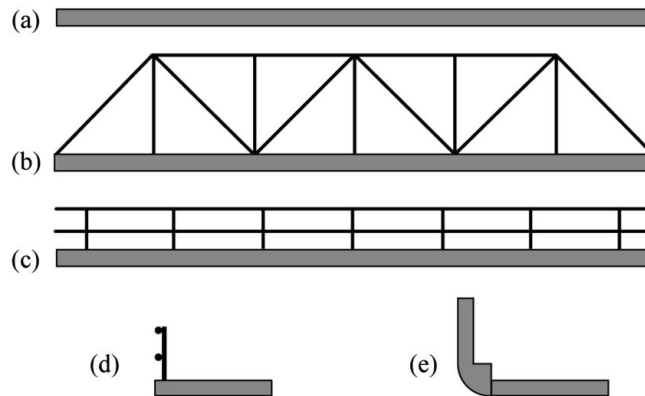


Figura I-23 Tipos de puentes modelados.

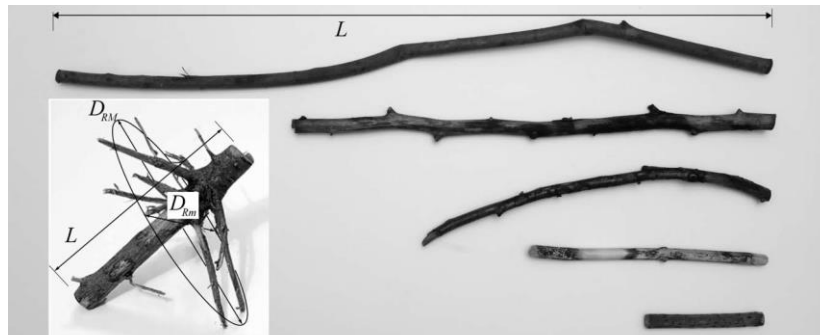


Figura I-24 Material leñoso modelado.

Escalas. El modelo de puente y de los troncos los escalaron con respecto a la acumulación observada durante la avenida de 2005 en Suiza (Bezzola y Hegg 2008). Los puentes típicos en las montañas investigadas tenían una longitud de 10 a 20 m y una altura de 2 a 5 m. La longitud de los troncos transportados en los eventos de avenidas estuvo en un rango de aproximadamente 2.5 a 15 m y las raíces con diámetros superiores a 3.0 m.

Caracterización del flujo. El flujo de aproximación se caracterizó con tirante h , la velocidad $V = Q/(Bh)$ y el número de Froude $F = V/(gh)^{1/2}$, donde g =aceleración de la gravedad. El tirante de aproximación varió entre $h/H = 0.90$ y 1.07. Para $h/H = 1$, la

superficie del agua alcanzó justo la parte inferior del puente, para $h/H = 1.07$ la superficie del agua supera la parte inferior puente. Los números de Froude estuvieron comprendidos en un rango de $F = 0.30$ y 1.20 , de flujo subcrítico a supercrítico. Consideraron para cada tipo de puente, once condiciones de flujo $h/H = 0.9, 1.00$ y 1.07 y 4 , Froude $Fr = 0.3, 0.5, 0.8$ y 1.2 .

Procedimiento de prueba. Los troncos se adicionaron aleatoriamente en dirección del flujo a 5 m aguas arriba del puente. La madera se probó seca para que flotaran, ya que lo que interesaba era la interacción con el puente. Combinaron 11 condiciones de flujo, 4 tipos de puente y 13 tipos de madera con 8 repeticiones para cada tipo de madera, resultando $4,576$ pruebas. En la Figura I-25 se presenta una de las pruebas realizadas.

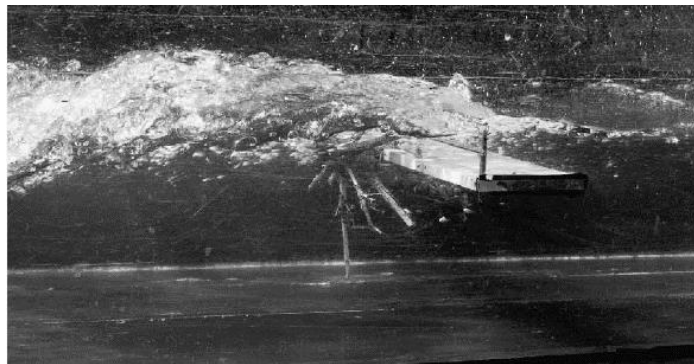


Figura I-25 Prueba con el puente de barandilla.

Probabilidad de Bloqueo. Se distinguieron dos casos básicamente. Si la madera pasaba por la sección del puente, la probabilidad de bloqueo era $P=0$, o si este quedaba atascada se consideran la probabilidad de bloqueo $P=1$. La madera pasando sobre el puente tiene $P=1$. Cada prueba se repitió 8 veces, con nueve posibles probabilidades de $P= 0, 1/8, 2/8, \dots$ y 1 . Los resultados proporcionan una estimación para la probabilidad de bloqueo y están sujetas a variaciones, dado el complejo proceso de bloqueo de troncos. Las probabilidades se relacionaron con la longitud relativa del tronco y el ancho del canal L/B o del diámetro de la raíz y la altura del puente D_R/H , como se muestra en la Figura I-26, donde P se incrementa con L/B o D_R/H y h/H . Para todos los tipos de puentes investigados resultó que con el incremento de h/H se incrementa P para troncos y raíces. Un incremento de Fr resultó en un decremento de P para troncos y raíces. De acuerdo a investigaciones de Bocchiola *et al.* (2008), la probabilidad de bloqueo para velocidades bajas es generalmente más alta.

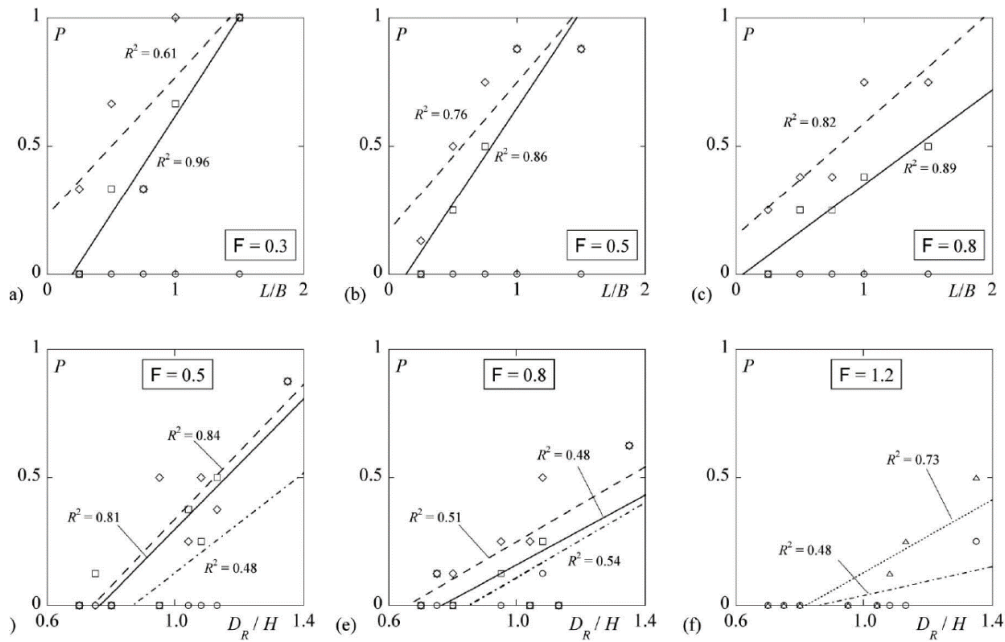


Figura I-26 Probabilidad de bloqueo contra L/B (troncos solos) y D_R/H (raíces solas) para varios F y $h/H = 0.90$ (o, _), 0.93 (Δ , ...), 1.00 (\square , $_$), y 1.07 (\diamond , - -) para el puente de la referencia.

Algunas de sus conclusiones son las siguientes:

- La probabilidad de bloqueo se incrementa con un decremento del borde libre y un incremento del tamaño de los troncos.
- La probabilidad de bloqueo se incrementa significativamente conforme el borde libre tiende a cero y se incrementa la probabilidad de que los troncos toquen el puente.
- La probabilidad del bloqueo para troncos y raíces decrece con un incremento del número de Froude.
- Se observó un incremento del riesgo de bloqueo especialmente para puentes de armadura y barandilla mientras que los puentes de losa favorecen el paso de la madera sin dañar la estructura.
- Un puente de losa decrece la probabilidad de bloqueo porque los escombros no pueden acumularse en elementos estructuralmente abiertos.
- Se requiere mayor investigación para tomar en cuenta especialmente la acumulación de escombros en pilas para flujos con pequeños tirantes. La geometría del río y la presencia de la carga de sedimento y las hojas y ramas son también aspectos adicionales a considerar.

I.6.2 Modelo a escala de acumulación de material leñoso en rejas

Schmocker, L., y Hager W. (2013) estudiaron en un modelo a escala la acumulación de material leñoso en una reja para atrapar escombros. El objetivo fue analizar varios aspectos en la modelación de escombros de madera y la sobreelevación del agua que se produce aguas arriba.

Instalación Experimental. Los experimentos se llevaron a cabo en un canal rectangular de 0.60 m de ancho, 0.60 m de alto y 10 m de longitud, y una descarga constante superior a $Q_0 = 60$ l/s. La pendiente del fondo se varió de $0 < S_0 < 0.02$. Probaron varias condiciones de flujo combinando la pendiente del fondo y el gasto. La reja para atrapar los troncos se localizó a 0.70 m aguas arriba de la salida del canal. La reja consistió de cilindros de aluminio de diámetro $D_R = 0.01$ m, altura de $H_R = 0.20$ m y separación entre cilindros de $a = 0.05$ m. La localización del origen de coordenadas x se consideró en la reja. Para medir el tirante del agua usaron cuatro sensores de nivel ultrasónicos a diferentes distancias de la reja (0.2, 0.6, 1.2 y 2.1 m). Ver Figura I-27.

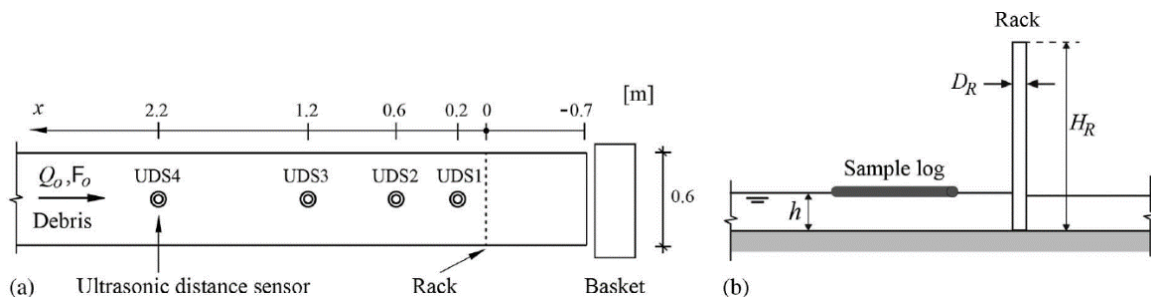


Figura I-27 a) Vista en planta y (b) en corte del canal de aproximación del flujo y del arreglo de Reja para atrapar escombros.

Modelo de los escombros de madera. El modelo de troncos se definió en tres clases de elementos y mezclas como se indica en la Tabla I-2.

Tabla I-2 Clases de troncos probados y Mezclas de troncos

Clases	L_L (mm)	d_L (mm)	Mezclas			
			Muy Gruesa %	Gruesa %	Media %	Fina %
Grandes	80-200	10-20	100	60	60	40
Medianos	30-80	3-10	---	40	30	40
Pequeños	4.7	2	--	--	10	20

La mezcla media se basó en un estudio in situ en Dorfbach Sachseln, donde los troncos acumulados se midieron y contaron después de la avenida de 1997-1998. Las otras clases de mezclas se derivaron engrosando o refinando la mezcla media. La mezcla más gruesa consistió sólo de troncos grandes, mientras la mezcla fina tenía una composición de 40 % gruesa, 40% media y 20% de pequeños troncos. En condiciones iniciales midieron a 1.2 m de distancia aguas arriba, el tirante inicial fue $h_0 = 0.04$ m y la $V_0 = Q_0 / (Bh_0)$, $F_0 = V_0 / \sqrt{gh_0}$. El F_0 varió de 0.5, 0.8 y 1.5 de subcrítico a supercrítico. Las duraciones de las pruebas fueron $t_T = 7, 60$ y 120 min. El volumen agregado a cada muestra fue variable de $V_D = 5, 12.5, 25, 50$ y 75 dm^3 . Los diámetros de los elementos de la reja para atrapar la madera variaron de $D_R = 0.005, 0.010, 0.015$ m.

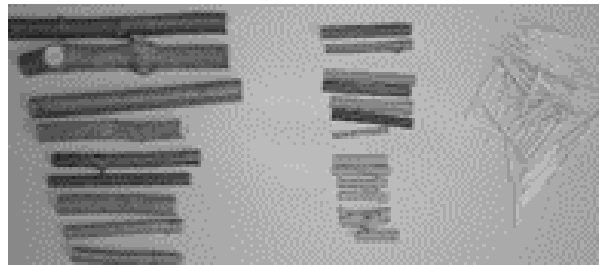


Figura I-28 Ejemplo de los tipos de troncos de tres clases.

Aplicación de Rejas para Troncos Grandes. Modelaron la reja para detener los escombros de acuerdo a las estructuras existentes en ríos de áreas montañosas. Los troncos los escalaron de acuerdo a las observaciones durante las avenidas de 2005 en Suiza donde la longitud de los troncos transportados varió de aproximadamente 2.5 a 15 m. El número de Froude varió de 0.5 a 1.5, proporcionando de ese modo las condiciones similares a las de la avenida. El modelo hidráulico tiene una escala de 1:30 de acuerdo con la ley de similitud de Froude. Los troncos del modelo no tenían ramas y fueron comparativamente más lisos que los troncos naturales, y no se modelaron las hojas ni el sedimento. En la naturaleza, con la presencia de troncos con ramas, hojas y sedimentos, se incrementarían los remansos.

Procedimiento de Prueba. Antes de cada prueba, los troncos fueron mojados por un cierto tiempo $t_w = 120$ min. Cada prueba la llevaron a cabo adicionando de manera continua el volumen de los troncos de madera durante el tiempo de duración de la prueba t_T . Los troncos se adicionaron no alineados con la dirección del flujo y en pequeños grupos de aproximadamente $V_D = 4$ dm^3 . Se midieron los tirantes aguas arriba en cuatro puntos. Los principales parámetros evaluados fueron la variación del

tirante $h(t)$ debido a la adición de troncos, el aumento del tirante relativo al tirante inicial $h/h_0(t)$, el porcentaje de troncos retenido en la reja, y la longitud del enjambre hacia aguas arriba L_c . Ya que este proceso es un tanto aleatorio, cada prueba fue producida tres veces.

Proceso de Acumulación de Debris. El desarrollo temporal de la acumulación de troncos en la reja se desarrolla de la siguiente forma: La prueba inicia para $t = 0$ s con un tirante inicial $h_0 = 0.04$ m. La acumulación inicia una vez que un tronco queda atrapado. Los troncos son transportados más o menos alineados con el flujo, impactan un poste, se voltean, y se extienden entre dos o más postes. La acumulación inicia para $t = 20$ s cuando el centro de la reja se bloquea con uno o dos troncos grandes. Después de un tiempo $t = 40$ s, los troncos acumulados se extienden en la superficie sobre todo el ancho del canal y después se extiende hacia abajo. La porosidad de la acumulación depende de las dimensiones de los troncos, llenándose los huecos con los troncos pequeños. La acumulación de troncos actúa como un obstáculo al flujo, resultando en un incremento del nivel del agua, un remanso. Hay una mayor diferencia entre los niveles de aguas arriba y de aguas abajo después de los $t = 80$ s. Para $t = 120$ s se bloquea gran parte de la reja y la velocidad del flujo aguas arriba de la reja decrece significativamente. Para tiempos mayores la acumulación se expande hacia aguas arriba, formando una carpeta flotante ($t > 220$ s). Ver Figura I-29.

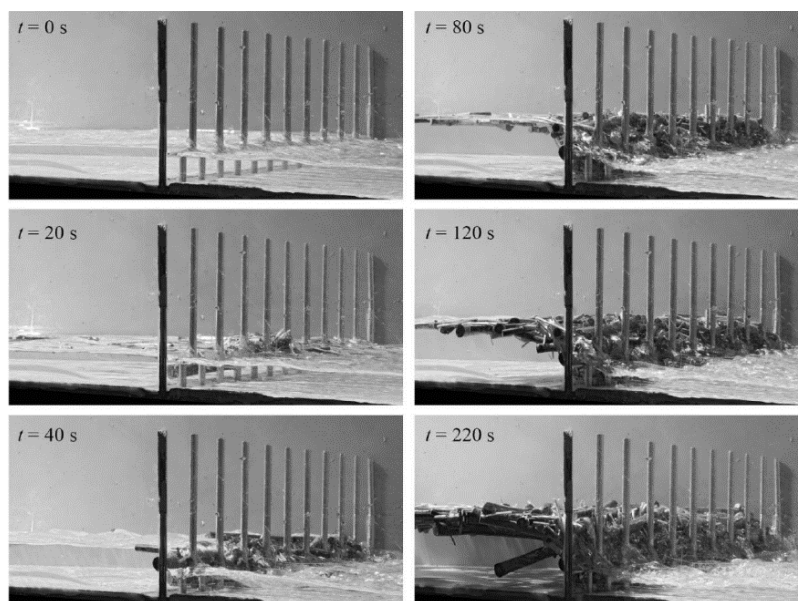


Figura I-29 Proceso de la prueba.

En la Figura I-30 se presentan las gráficas resultantes que describen los procesos estudiados. Se observa la evolución del tirante aguas arriba conforme se incrementa el volumen acumulado para cada muestra y para cada tiempo de prueba. Para todas las pruebas, el volumen de madera que pasó la reja varió entre 2% y 8% del total de volumen de troncos adicionado.

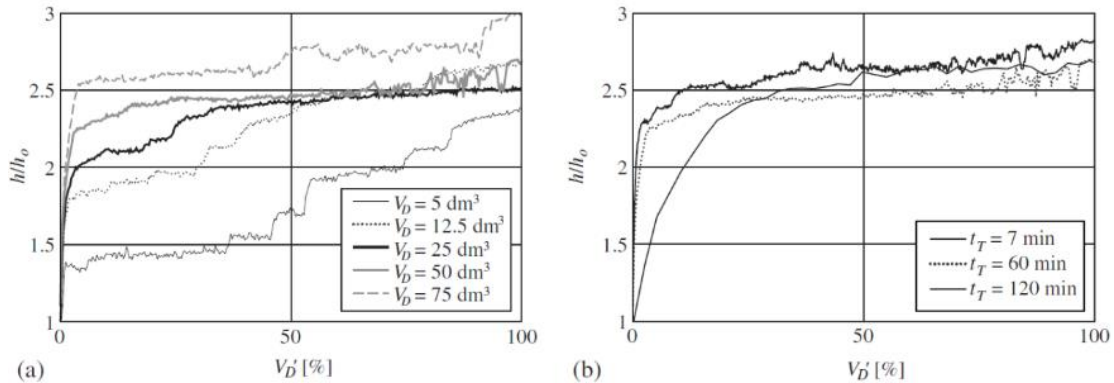


Figura I-30 Desarrollo de la relación de tirantes del flujo h/h_0 vs. V_D [%] para los diferentes volúmenes de troncos y de su variación en el tiempo de duración de la prueba (pruebas 20-24) y b) pruebas 25-27).

La acumulación de madera en la reja puede dividirse en dos fases: 1) Acumulación inicial en la reja con mayor elevación del agua y 2) Formación de una carpeta de troncos de longitud L_c cuando sube el nivel del agua. En la Figura I-31 se presentan las gráficas obtenidas para cada fase.

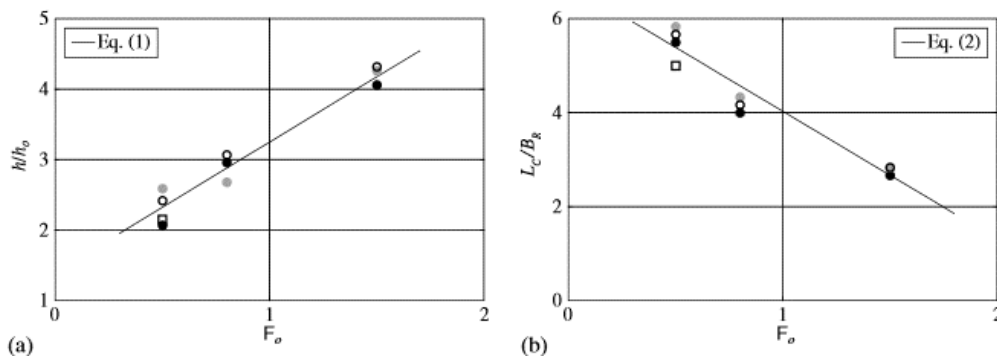


Figura I-31 (a) Tirante relativo del flujo h/h_0 ; (b) longitud relativa de la carpeta de debris L_c/B_R para varios F_o probados; cuadrados abiertos=muy grueso, círculos negros=grueso, círculos grises= medio, y círculos abiertos= mezclas de debris fino (pruebas 28-37).

Conclusiones

- Las pruebas indican que el proceso de acumulación depende de varios factores por lo que debe aceptarse cierta aleatoriedad para las pruebas de troncos. Sin embargo, la repetitividad en el proceso de acumulación se demostró que es aceptable para la investigación realizada.
- El proceso de acumulación puede dividirse en dos fases, incluyendo la acumulación de troncos resultante en un remanso durante la fase 1 y la formación de una carpeta de troncos con un incremento del tirante menor durante la fase 2. Las pruebas en el modelo demostraron que en ambas bases el proceso de acumulación y el incremento de la elevación del agua en el remanso dependen del número de Froude en el canal de aproximación y del volumen de troncos.
- Sin embargo, el remanso resultante dentro del rango de pruebas fue independiente de 1) el diámetro de los postes de la reja, 2) del tiempo de adición de los troncos si $tw \leq 8hr$, y 3) de la duración de la prueba.
- Si se adiciona un volumen suficiente de troncos para bloquear la sección entera de la reja, los troncos adicionales incrementan principalmente la longitud de la carpeta L_c con sólo un pequeño incremento en el tirante aguas arriba.
- El realizar pruebas con mezclas de troncos no tuvieron un efecto obvio en el proceso de acumulación e incremento del nivel del agua. Debido a que los parámetros relacionados con las propiedades de los troncos no tienen efecto dentro del rango de pruebas, el número de Froude y el volumen de troncos permanecen como parámetros relevantes en el remanso del agua h/h_o . Para un volumen de escombros dado, el remanso resultante al final de la prueba se incrementa linealmente con un incremento en el número de Froude, mientras la longitud de la carpeta de troncos L_c decrece linealmente con un incremento en el número de Froude del flujo de aproximación. El desarrollo del remanso se caracteriza con una ecuación que se ajusta dependiendo del número de Froude y del volumen de troncos.
- Las pruebas en modelo demostraron que el proceso de acumulación de troncos e incremento de nivel de agua dependen del número de Froude y del volumen de troncos.
- El proceso inicial de acumulación del material leñoso depende en gran medida del flujo de aproximación, es decir del número de Froude. Posteriormente, al incrementarse el grado de acumulación, la variación de la superficie libre ya no es tan importante.

I.6.3 Estudios de campo y laboratorio del acumulamiento de material leñoso en puentes (pilas)

Dennis A. Lyn *et al.* (2003) realizaron trabajos de campo y laboratorio para analizar el comportamiento de la acumulación de material leñoso sobre pilas de puentes. En el laboratorio se evaluaron los efectos de velocidad y profundidad del agua, respecto a la acumulación en la pila usando espigas o clavijas de madera y ramas como modelo de troncos. Los estudios de campo se basaron en el monitoreo en video de dos sitios en Indiana, un sitio ubicado sobre el río Eel y el otro en el río Big Vermillion. También analizaron experimentos preliminares sobre el uso de deflectores para retener el material leñoso aguas arriba de la ubicación de las pilas de los puentes.

Se utilizaron dos criterios para caracterizar la acumulación del material leñoso, uno determinístico y otro probabilístico. En el primero se establece una cantidad finita de material leñoso acumulable, N^* , número con el cual se considera que se presentó acumulación. Para el segundo criterio, se considera que N puede ser variable, requiriendo un cierto periodo de tiempo T^* para el cual exista acumulación.

Instalación experimental. Se utilizó un canal de recirculación con capacidad de 50 l/s, de sección rectangular de 40 cm de ancho y 15 m de largo, con pendiente variable y el fondo y las paredes de acrílico. El tamaño de los troncos se fijó en una longitud media de 11.6 cm y diámetro de 0.58 cm.

Tabla I-3 Rangos de los parámetros en campo y laboratorio.

Parámetro	Campo	Laboratorio
Ancho de la pila, b (ft)	2	1/24
Claro del puente, sp B (ft)	66	2/3
Tirante, H (ft)	10-20	1/6 – 1/2
Velocidad (ft/s)	4-7	1/2 – 1
Longitud del tronco, L (ft)	<65	1/3
Diámetro del tronco (ft)	<3	1/48
Número de Froude	0.2-0.4	0.2 – 0.4
Número de Reynolds	1000	3
Long. tronco/tirante L/H	<3	< 2
Long. tronco/claro/bordo libre	<1	1/4

Desarrollo experimental. El material leñoso se introdujo a 6 m aguas arriba de la pila ensayada, adicionando los troncos alineados con el flujo, se introdujeron alrededor de 70 leños. Dicha prueba fue repetida varias veces, constituyendo un solo experimento. En este sentido se realizaron 5 series de experimentos (A, B, C, D y E). Para la serie de experimentos A y B se consideró que el apilamiento de escombros se cumple para la condición de acumulación de 3 o más troncos, es decir $N^* \geq 3$. Con respecto al tiempo de permanencia del material acumulado, se estableció una condición estable para tiempos de 15 minutos. Para las series C, D y E, se estableció el criterio que cuando un apilamiento de troncos se mantiene más de 15 minutos, se considera válido el proceso de acumulación de los troncos, independientemente del número de ellos.

Resultados de experimentos de laboratorio

Serie A. Para esta serie, no está claro el efecto de la profundidad y la velocidad, respecto a la acumulación de material leñoso, tanto para una misma profundidad del flujo y velocidad variable, como la variación de la profundidad para una velocidad constante.

Serie B. En estos experimentos se ensayó el deflector. Como experiencia de la serie A, aquí se mantuvo una sola velocidad de 25 cm/s, y se varió la profundidad de 5 a 15 cm. La presencia del deflector incrementa el número de veces que existe acumulación de escombros.

Las series anteriores se consideraron preliminares, tratando de tomarle sensibilidad al proceso de arrastre del material.

Serie C. Se analizó más a detalle qué variable influye más en la acumulación. También se compararon resultados para dos tipos de modelos de troncos: 1) Clavija o taquetes de madera y 2) Ramas. Para el caso del uso de las clavijas de madera, en la Figura I-32 se muestran su comportamiento para dos condiciones: a) manteniendo constante la profundidad del agua y variando la velocidad y b) Manteniendo la velocidad constante y variando la profundidad. En esta figura se observan varios aspectos. A medida que se incrementa la velocidad el número de troncos acumulados disminuye. También, para una misma velocidad se incrementa el número de troncos para profundidades menores.

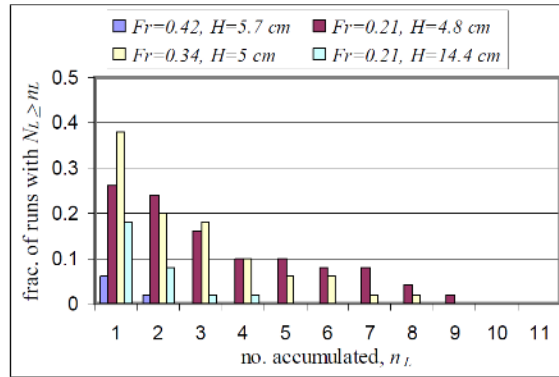


Figura I-32 Resultados para el caso de las clavijas o taquetes de madera.

Al comparar ahora el comportamiento entre los dos tipos de troncos ensayados, ver Figura I-33, existen diferencias importantes cuando el número de troncos acumulados es mayor que 3. Estas diferencias se pueden deber a que cuando se usan las ramas, existe un mejor amarre entre ellos y una mayor estabilidad de la acumulación.

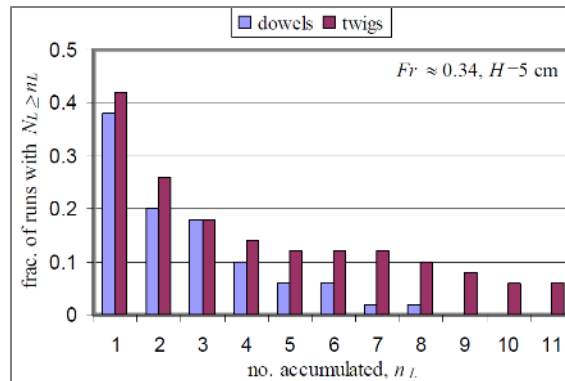


Figura I-33 Comparación respecto al tipo de modelo.

La Figura I-34 y Figura I-35 muestran el comportamiento de las ramas como modelo de troncos, respecto a la profundidad y a la velocidad del flujo. En la Figura I-34 se observa que para profundidades del agua de 5 cm, el número de troncos acumulados es mayor, mientras que en la Figura I-35, para velocidades de 15 cm/s no hay diferencia notable en el número acumulado de troncos respecto la profundidad del agua. La diferencia se da para velocidades mayores, siendo mayor la acumulación de troncos para la profundidad de 5 cm.

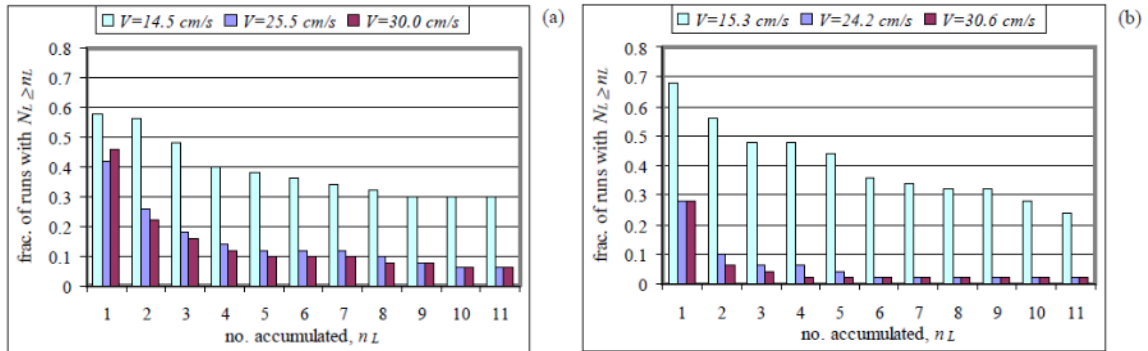


Figura I-34 Efecto de la velocidad en la acumulación de troncos para dos profundidades del flujo. a) 5 cm, b) 15 cm.

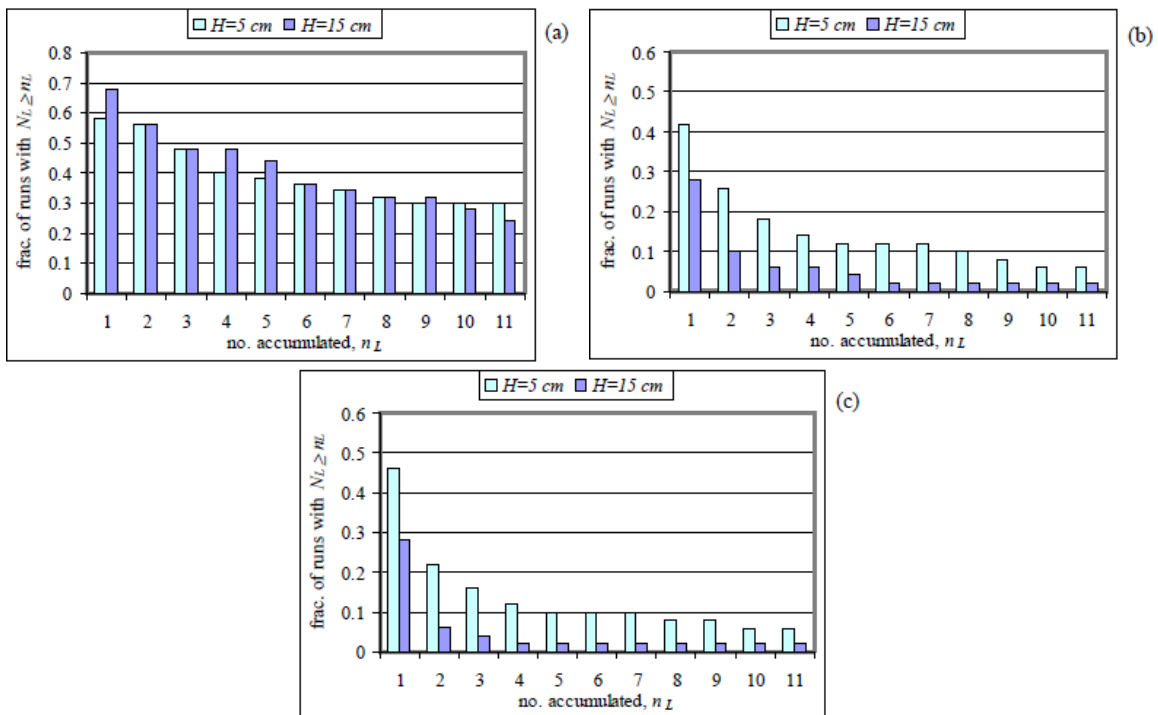


Figura I-35 Distribución de la acumulación de troncos para dos profundidades, con velocidades aprox. constantes. a) V = 15 cm/s, b) V = 25 cm/s, c) V = 30 cm/s.

SERIE D. Para esta serie se analizó la presencia de una barra de arena ubicada aguas arriba de la pila. Se ensayó para una profundidad del flujo y dos velocidades, realizando 25 pruebas en este caso.



Figura I-36 Modelo de baja de arena

Los resultados para esta serie se presentan en la Figura I-37. De nueva cuenta, a mayor velocidad del flujo la acumulación de troncos se ve disminuida notablemente, mientras que la presencia de la barra incrementa dicha acumulación.

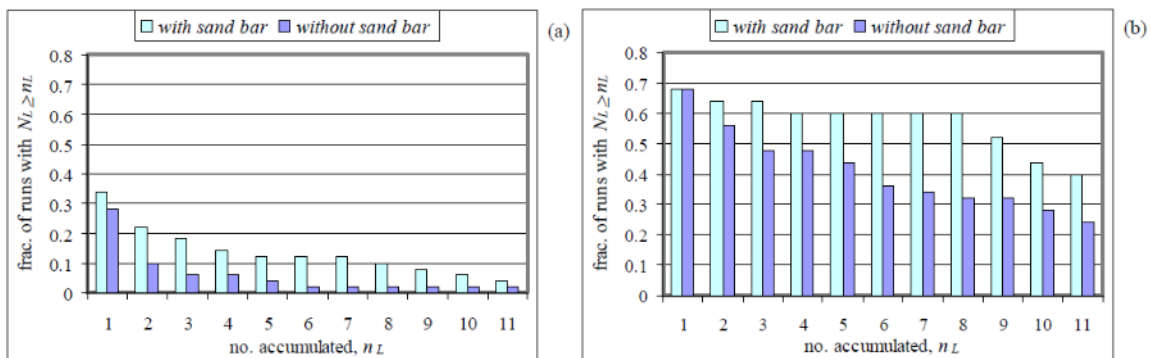


Figura I-37 Efectos de la presencia de la barra de arena en la acumulación de troncos, para dos velocidades. a) $V = 25$ cm/s, b) $V = 15$ cm/s.

Serie E. Los experimentos de esta serie, consistieron en probar dos alternativas para reducir la acumulación de los troncos, un cilindro vertical y una estructura sumergida adosada a las paredes. La profundidad del agua se mantuvo constante para todas las pruebas, siendo igual a $H = 16.2$ cm, mientras que se ensayaron dos velocidades de aproximación. También se analizó en este caso la presencia de la barra de arena.

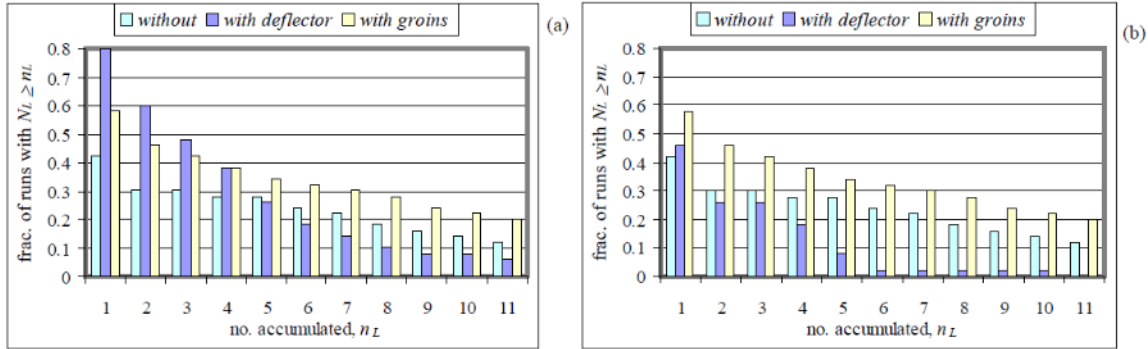


Figura I-38 Efecto de la alternativa de control de la acumulación de troncos. a) Suma de troncos retenidos en la pila y el deflector, b) Acumulación de troncos en la pila.

En la Figura I-38 Figura I-39 se muestran algunos de los resultados para esta serie, donde se observa que a mayor velocidad o gasto, la acumulación de troncos disminuye. Con la alternativa de colocar dos barreras laterales en las márgenes aguas arriba de la pila, la acumulación de troncos en dichas barreras es importante para una acumulación mayor que 5, es decir su eficiencia para evitar la acumulación disminuye, para la geometría de la barrera que fue ensayada.

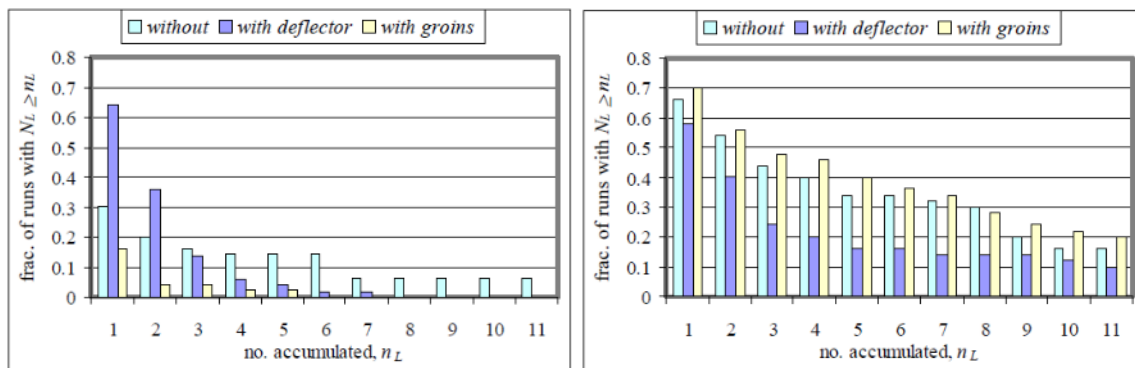


Figura I-39 Efecto de la presencia de la barra de arena para dos gastos. a) $Q = 14$ l/s, $V = 22$ cm/s, b) $Q = 9$ l/s, $V = 14$ cm/s.

Como resultados principales de este estudio se tiene lo siguiente:

- El proyecto estuvo orientado a conocer mejor los procesos físicos involucrados en la acumulación de los troncos para una sola pila y evaluar el funcionamiento de posibles medidas para la retención de los escombros aguas arriba de las pilas.
- Para las condiciones analizadas, la acumulación de troncos fue más estable para velocidades bajas. Para el caso de la profundidad del agua, los resultados

mostraron aparentemente una acumulación mayor de troncos para profundidades bajas.

- La alternativa ensayada en laboratorio del deflector circular para el control de arrastre de troncos aguas arriba de la pila y comparada con la observación de campo para uno de los sitios analizados, nos dice que efectivamente hay una reducción de la acumulación de troncos en la pila, pero porque se atorán justamente en el deflector. El problema aquí es que el apilamiento de troncos en el deflector fue menos estable en el campo que en laboratorio, situación debida probablemente a la no-uniformidad del flujo en el sitio de estudio.
- Como recomendaciones del estudio, ante la poca información generada en campo, de manera tentativa comentan las siguientes:
 - Para el caso de diseño hidráulico de puentes nuevos, se debe tomar en cuenta el proceso morfológico y de sedimentación del río en el sitio de proyecto del puente.
 - Las alternativas que se ensayaron para controlar la acumulación de troncos aguas arriba de la pila, tanto a nivel laboratorio y lo observado en campo, no pueden recomendarse para su implementación en este momento para puentes existentes.

I.6.3 Efectos de los escombros en la socavación de pilas de puentes

P.F. Lagasse *et al.* (2010), realizaron un estudio experimental para determinar factores de ajuste para las ecuaciones de cálculo de socavación, utilizadas por HEC-18, considerando la acumulación de escombros de madera en las pilas de los puentes. Previo a los experimentos, en el capítulo 3 del reporte presentan directrices para evaluar el potencial de producción de escombros y la acumulación en puentes. Diseñaron los modelos de acumulación de material leñoso con base en el análisis de reportes de campo de casos de acumulación en puentes.

Con respecto a las pruebas de laboratorio que se describen en este trabajo, el objetivo de dichas pruebas fue generar un rango suficiente de datos de acumulación de troncos y con ellos desarrollar factores de ajuste para las ecuaciones de cálculo de socavación, utilizadas por HEC-18.

Instalación experimental. Las pruebas se realizaron en un canal de 2.4 m de ancho y 61 m de largo del laboratorio de hidráulica de la Universidad del Estado de Colorado. El

lecho del canal fue conformado con arena con un espesor de 0.46 m, la arena tuvo un diámetro $d_{50} = 0.7$ mm. El sistema de recirculación del agua consistió de 2 bombas de 125 hp cada una, pudiendo alcanzar un gasto de hasta $Q = 1.6$ m³/s. La pendiente del canal se mantuvo en $S = 0.001$ en todas las pruebas.

Se establecieron cuatro secciones de ubicación de las pilas, las que fueron colocadas en la parte central del canal, ver Figura I-40. Las pilas utilizadas fueron de sección cuadrada de 10.2 cm y fueron construidas en dos partes, la parte inferior se fijó a la plantilla del canal y la parte superior puede ser retirada para efectos de hacer el mapeo de la erosión producida y para re-nivelar el lecho de arena antes de cada prueba, ver Figura I-41.

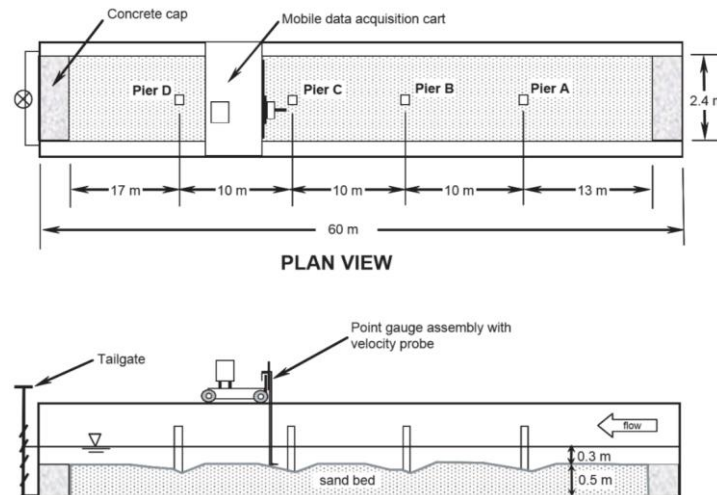


Figura I-40 Configuración del canal de pruebas y ubicación de las pilas.



Figura I-41 Visualización del tipo de pila utilizada en los experimentos.

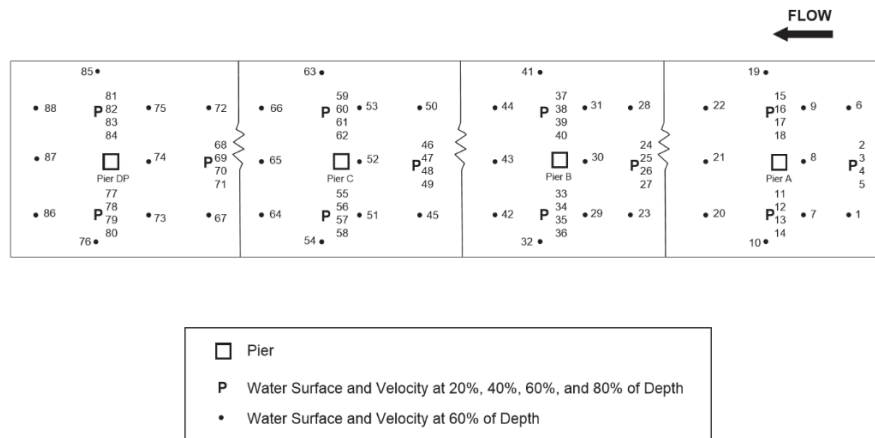


Figura I-42 Localización esquemática de los puntos de medición.

La mayoría de las pruebas se realizaron para condiciones de agua limpia, es decir sin arrastre de sedimentos, cuidando que la duración de las pruebas llegaran hasta un 60% de la socavación última.

Para monitorear en tiempo real el proceso de socavación se instalaron cuatro transductores alrededor de las pilas.

Se probaron diferentes formas de acumulación de troncos, rectangulares, triangulares/cónicas.



Figura I-43 Ensaye para una acumulación de troncos en forma rectangular. La imagen de la derecha muestra la configuración de la socavación para este tipo de modelo de troncos.

De los resultados del estudio, en la mayoría de los casos analizados, la presencia de acumulación de troncos generó una mayor erosión alrededor de la pila respecto a la condición de no tener acumulación de troncos. La extensión lateral de la socavación con la presencia de troncos, depende mucho del ancho del apilamiento de troncos.

Para el caso de la acumulación “rectangular” de troncos, la erosión en la pila es mayor cuando el apilamiento de escombros alcanza una longitud hacia aguas arriba del orden de la profundidad del agua.

Se analizó la ubicación del apilamiento de troncos, resultando que la acumulación superficial contribuye más en el proceso de socavación total que cuando la acumulación se da a la mitad de la profundidad o cercana al fondo.

En el caso del efecto de la rugosidad del conglomerado de troncos, así como el grado de compacidad de la masa acumulada de troncos, resultaron de importancia secundaria respecto a la erosión en la pila.

A partir de los resultados de laboratorio, se propone modificar la estimación del ancho equivalente de la pila, en las ecuaciones utilizadas para calcular la profundidad de erosión producto de la acumulación de los troncos, siendo este resultado uno de los más relevantes del estudio.

II. CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS QUE SE PRESENTARÁN EN MODELOS

De acuerdo con la revisión y análisis de información disponible sobre el tema de efecto de arrastre de sólidos (material leñoso) en puentes, presentado en el primer capítulo, se decidió considerar como variables en este estudio la longitud de los troncos, los volúmenes de material leñoso, tiempo del evento de arrastre, número de Froude y la separación entre pilas. Con ello se espera obtener una relación entre la separación entre pilas y la longitud de tronco de diseño para cada combinación de volumen, tiempo del ensayo y número de Froude. A continuación se presenta la caracterización de cada una de las variables consideradas en este estudio.

II.1 Características del flujo

Con el objeto de analizar el comportamiento de las acumulaciones de material leñoso en pilas con diferentes características del flujo, específicamente para diferentes velocidades, se realizaron ensayos con tres pendientes diferentes, y por ende tres números de Froude. Para ello se utilizaron dos instalaciones, un canal con pendiente nula y un canal con pendiente variable.

Como se vio en el Capítulo I el arrastre de material leñoso en cuencas está asociado a eventos meteorológicos, por lo que cuando se presentan fuertes avenidas se incrementa el potencial de arrastre de sólidos y con mayor concentración, dado que se favorece el arrastre con tirantes y velocidades mayores, especialmente en cauces con mayor anchura. Por esta razón y dado que el objetivo de este trabajo es mitigar las inundaciones, no se consideró como variable el tirante, pues se supone que se están simulando casos de fuertes avenidas donde los tirantes son altos. Por lo que con los ensayos preliminares se determinaron los tirantes para realizar las modelaciones, de tal manera que el material vaya transitando sin tener contacto con el fondo del canal.

II.2 Características de las pilas

En México las pilas comúnmente utilizadas son las de sección circular, con un diámetro promedio de 1.5 m. Por lo tanto, se modeló únicamente este tipo de pila, así en el presente estudio no se consideró como variable el tipo y tamaño de las pilas.

Por otra parte, partiendo de que se busca la separación mínima entre pilas de los puentes para evitar o reducir la posibilidad de acumulación de material leñoso entre las mismas, se optó por realizar la modelación con dos pilas, que es el mínimo número de pilas para reproducir el fenómeno de acumulación entre pilas. Esto también con la finalidad de trabajar con la escala más pequeña posible en los módulos experimentales utilizados.

Se propuso que las pilas tuvieran una separación entre ellas igual a un tercio del ancho del canal, para simular también que la separación entre las pilas y estribos sea igual a la separación entre las pilas, suponiendo que los estribos están alineados con las paredes del canal.

Con el fin de hacer más eficiente este trabajo, se utilizaron dos canales del laboratorio Enzo Leví, uno de pendiente variable y otro de pendiente nula, el primero tiene un ancho de 0.6 m y el segundo de 0.99 m. Entonces, en el canal de pendiente variable tendrán una separación de 0.2 m de centro a centro y en el canal de pendiente nula de 0.33 m.

II.3 Escalas

Los claros que comúnmente se utilizan en México para la construcción de puentes son a base de traveses de 12.5, 15, 20, 25 y 30 m. Considerando un claro de 25 m, y si en el canal de pendiente nula la separación entre pilas es de 0.31 m, la escala resulta igual a **1:80**; y en el canal de pendiente variable, con una separación entre pilas de 0.18 m, resulta una escala de **1:137**.

II.4 Caracterización de los sólidos flotantes

En el capítulo anterior se comentaron los trabajos realizados en los Estados Unidos por Lagasse *et al.* (2010) sobre el efecto de la acumulación de material leñoso en la socavación de las pilas, donde diseñaron las formas de las acumulaciones de material con base en la descripción de una serie de reportes, y presentan fotografías de algunos casos. Dado que en México no se dispone de información de casos de obstrucción en puentes por material leñoso, en este estudio se tomaron como base dichas fotografías y algunas más recopiladas para caracterizar las muestras del material a modelar. A continuación, se presentan dichas fotografías.

A pesar de que los troncos más fuertes y de mayor tamaño son los que inician y sostienen las acumulaciones en las pilas, en estas fotografías se observa que la mayor cantidad de masa corresponde a troncos y ramas de menor longitud y diámetro en comparación con los troncos más grandes.







Figura II-1 Fotografías de obstrucciones de material leñoso en pilas.

Por lo tanto, a falta de información sobre la caracterización del material acumulado en estos eventos, con base en las imágenes se propuso la caracterización que se presenta en Tabla II-1, donde los diferentes rangos de longitudes están en función de la longitud máxima de tronco o longitud de tronco de diseño (L_{td}), y a cada rango de longitud le corresponde un volumen del total de la muestra en porcentaje.

Tabla II-1 Caracterización de material leñoso.

L_{td}	10%
$0.6 L_{td} - 0.9 L_{td}$	20%
$0.3 L_{td} - 0.6 L_{td}$	30%
$0.15 L_{td} - 0.3 L_{td}$	40%

Para tener un marco de referencia en cuanto a los *diámetros de los troncos*, en la Tabla II-2 se presentan las alturas y diámetros de diferentes árboles, teniendo como valores medios una altura de 25 m y diámetro de 1.2 m. Por lo tanto, para cada rango de longitudes o alturas de troncos de la Tabla II-1 se dio un rango de diámetros de $0.04L_{máx} - 0.05L_{máx}$.

Tabla II-2 Altura y diámetro de diferentes tipos de árboles.

Tipo de árbol	Altura (m)	Diámetro (m)
Cancharana	28	0.95
Cedro	30	1.20
Guatambú	23	0.75

Tipo de árbol	Altura (m)	Diámetro (m)
Incienso	25	1.10
Quebracho	20	1.0
Virapitá	30	2.0
Pino Blanco	25	1.0
Alamo	30	1.0
Algarrobo	20	2.0
Anchico	25	0.8
Lapacho	30	1.5
Laurel	30	2.0
Mora	25	1.4
Palo Santo	20	0.8
Peteribí	30	0.8

De las publicaciones recopiladas, se buscaron las que tuvieran reportados los volúmenes de transporte de material leñoso, encontrando las siguientes. Ruiz-Villanueva *et al.* (2015) realizaron un estudio de 14 cuencas de España, se estimaron volúmenes de material leños transportado en crecidas, resultando el mayor volumen igual a **14,765 m³**, para una cuenca de 54.4 km² con un área forestada de 25.62 km². Por otra parte, Lagasse *et al.* (2010) encontraron las relaciones promedio de acumulaciones: $W/a=15.1$ y $L/a=12.4$, donde a es el ancho de pila, W y L son el ancho y longitud de la acumulación, respectivamente, y la altura va de 1/3 a 1.0 del tirante. Suponiendo una pila de 2 m de diámetro y una altura de acumulación de 8 m, se obtendría un volumen de **6,740 m³**. Tomando en cuenta los volúmenes de referencia se propusieron los tres volúmenes de la Tabla II-3.

Tabla II-3 Volúmenes de material leñoso a modelar.

Volumen m ³	Volumen escala 1:80	Volumen escala 1:137
3,840	7.5	1.5
7,680	15	3
15,360	30	6

En virtud de que, en la práctica, tanto en México como en otros países, como Estados Unidos, el espacio entre pilas (S_p) está en función de la longitud del tronco de diseño (L_{td}), siendo $S_p > L_{td}$ (ver Figura II-2), se propuso que la primera longitud de tronco

máximo a modelar sea igual al claro entre las pilas, es decir de 30 y 20 cm, en el canal de pendiente nula y canal de pendiente variable, respectivamente.

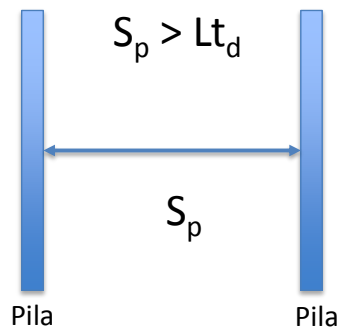


Figura II-2 Esquema de espacio entre pilas.

Por lo tanto, con estas determinaciones para el diseño del modelo de material leñoso, se tiene lo siguiente. En la Tabla II-4 se presentan los volúmenes que se modelarán en el canal de pendiente nula, en la Tabla II-5 las longitudes por rango cuando la longitud de tronco de diseño es de 30 cm en modelo, en la Tabla II-6 los volúmenes que se modelarán en el canal de pendiente variable y en la Tabla II-7 las longitudes por rango cuando la longitud de tronco de diseño es de 20 cm.

Tabla II-4 Volúmenes a modelar en el canal de pendiente nula.

Longitud de troncos	Porcentaje	Volumen 7.5 dm ³	Volumen 15 dm ³	Volumen 30 dm ³
L_{t_d}	10%	0.75	1.50	3.00
$0.6 L_{t_d} - 0.9 L_{t_d}$	20%	1.50	3.00	6.00
$0.3 L_{t_d} - 0.6 L_{t_d}$	30%	2.25	4.50	9.00
$0.15 L_{t_d} - 0.3 L_{t_d}$	40%	3.00	6.00	12.00

Tabla II-5 Longitudes y diámetros en la mezcla para $L_{t_d} = 30$ cm.

Longitud de troncos	Rango de longitud (cm)		Diámetros (cm)	
	L_{t_d}	30.00		1.2
$0.6 L_{t_d} - 0.9 L_{t_d}$	18.00	27.00	0.7	1.4
$0.3 L_{t_d} - 0.6 L_{t_d}$	9.00	18.00	0.4	0.9
$0.15 L_{t_d} - 0.3 L_{t_d}$	4.50	9.00	0.2	0.5

Tabla II-6 Volúmenes a modelar en el canal de pendiente variable.

Longitud de troncos	Porcentaje	Volumen 1.5 dm ³	Volumen 3.0 dm ³	Volumen 6 dm ³
L _d	10%	0.15	0.30	0.60
0.6 L _d - 0.9 L _d	20%	0.30	0.60	1.20
0.3 L _d - 0.6 L _d	30%	0.45	0.90	1.80
0.15 L _d - 0.3 L _d	40%	0.60	1.20	2.40

Tabla II-7 Longitudes y diámetros en la mezcla para L_d = 20 cm.

Longitud de troncos	Rango de longitud (cm)		Diámetros (cm)	
L _d	20.00		0.8	1.0
0.6 L _d - 0.9 L _d	12.00	18.00	0.5	0.9
0.3 L _d - 0.6 L _d	6.00	12.00	0.2	0.6
0.15 L _d - 0.3 L _d	3.00	6.00	0.1	0.3

II.5 Distribución temporal del arrastre de sólidos

En el estudio realizado por Ruiz-Villanueva *et al.* (2015) para modelar el arrastre de material leñoso, encontraron que un mejor ajuste de la distribución en el tiempo de arrastre de material leñoso es un arrastre escalonado, incorporando el material en diferentes pulsos, distribuido a intervalos del hidrograma, además que el arrastre inicia poco antes de la punta del hidrograma. Por lo tanto, para el presente estudio, ya que no se trata de un caso en particular, se diseñó un troncograma con base en el hidrograma unitario de la Soil Conservation Service, mostrado en la Figura II-3, sobre el periodo de $t/t_p = 0.9 - 1.9$, con intervalos de $\Delta t/t_p = 0.2$, resultando la gráfica de la Figura II-4, donde V es el volumen por intervalo de tiempo, VT el volumen total de material leñoso, t el tiempo y t_T el tiempo total de transporte de material.

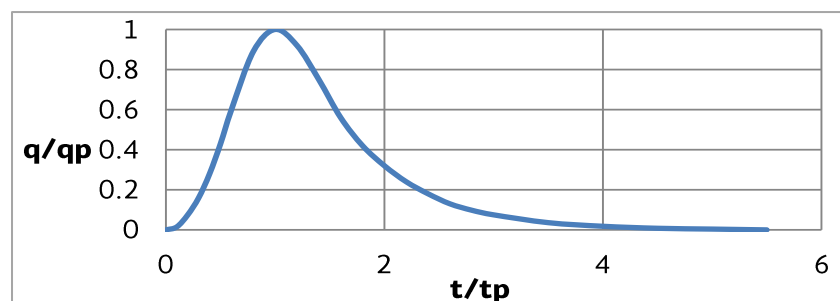


Figura II-3 Hidrograma Unitario (SCS).

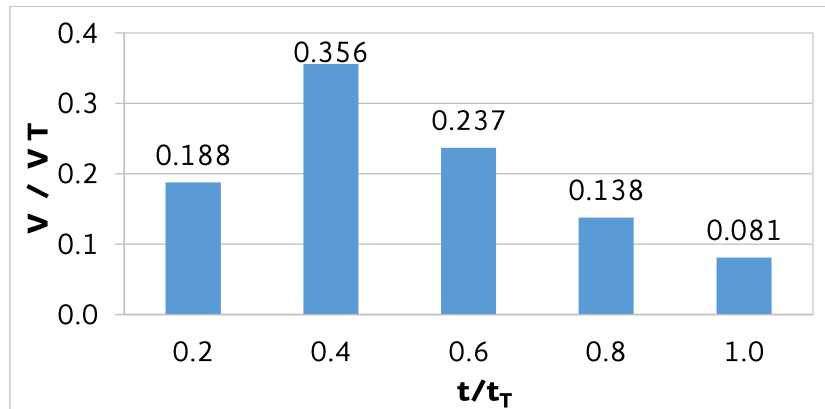


Figura II-4 Distribución temporal del arrastre de material leñoso.

El tiempo del evento con arrastre de material depende de las características de la cuenca, siendo lo más relevante las pendientes de las zonas con potencial a generar material leñoso, la pendiente y morfología de los cauces en los que transitan, y las velocidades que se alcanzan en dichos cauces. Este tiempo no necesariamente debe coincidir con el tiempo de concentración de la cuenca, sin embargo, para tener una referencia se propuso como tiempo máximo para realizar los ensayos preliminares un tiempo de 4.5 horas, que es del orden del tiempo de concentración de una cuenca pequeña a mediana. Se proponen entonces tres tiempos de arrastre de material 4.5, 3.0 y 1.5 horas en prototipo. Por lo tanto, los tiempos a modelar en cada canal, de acuerdo con las escalas, se presentan en la Tabla II-8.

Tabla II-8 Tiempos de arrastre de material, en el modelo.

Canal	Tiempos a modelar en minutos			
Pendiente nula	30	20	10	5
Pendiente variable	22.9	15.3	7.6	3.8

III. DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE LOS MODELOS

El modelo para la caracterización del efecto de arrastre de sólidos en pilas de puentes se conformó de dos módulos experimentales existentes en el laboratorio, las muestras de material leñoso y las pilas simuladas. En este capítulo se presenta la descripción, diseño, fabricación y/o adecuaciones de cada uno de estos elementos.

III.1 Módulos experimentales

En virtud de que se requieren diferentes condiciones de flujo, y por ende diferentes pendientes, las pruebas se realizaron en dos canales existentes en el Laboratorio de Hidráulica Enzo Levi. Uno de los canales es de pendiente variable y el otro tiene pendiente nula y fija; en este último se realizaron adecuaciones para cubrir los requerimientos del estudio.

III.1.1 Canal de pendiente nula

Originalmente el canal de pendiente nula se utilizaba para estudiar generación de electricidad con olas, por lo que no tenía flujo. Tiene una longitud de 20.5 m, ancho de 1 m, altura de 0.54 m, contaba con un depósito de 1.63 x 1.35 m y en la parte central tiene ventanas de visualización. Ver Figura III-1 y Figura III-2.

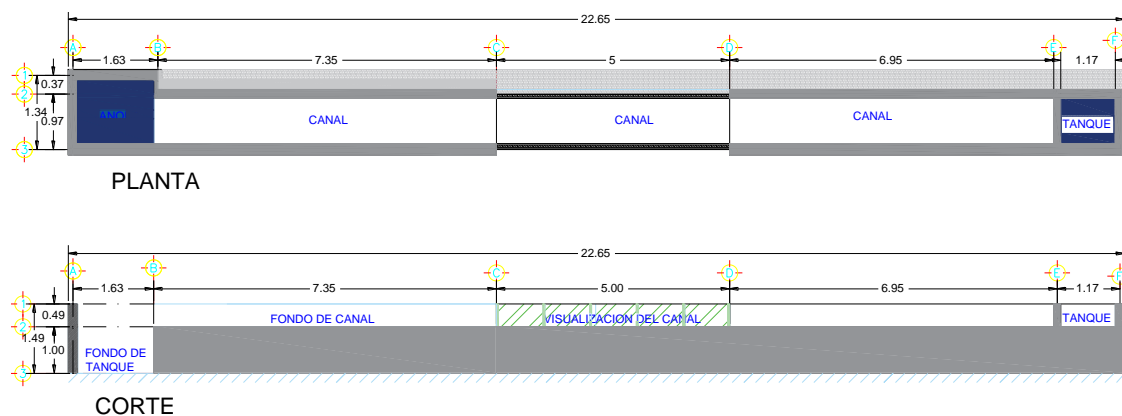


Figura III-1 Esquema del canal de olas (estado original del modelo).



Figura III-2 Canal de olas (estado original del modelo).

Dado que se requería que el agua circule, se realizaron adecuaciones al canal. Para recircular el flujo se diseñó un circuito cerrado como se observa en la Figura III-3, en el cual se bombea el agua del depósito y se conduce por la línea que descarga en el tanque de amortiguación del canal que descarga en el depósito, donde nuevamente se bombea el agua, cerrándose el circuito.

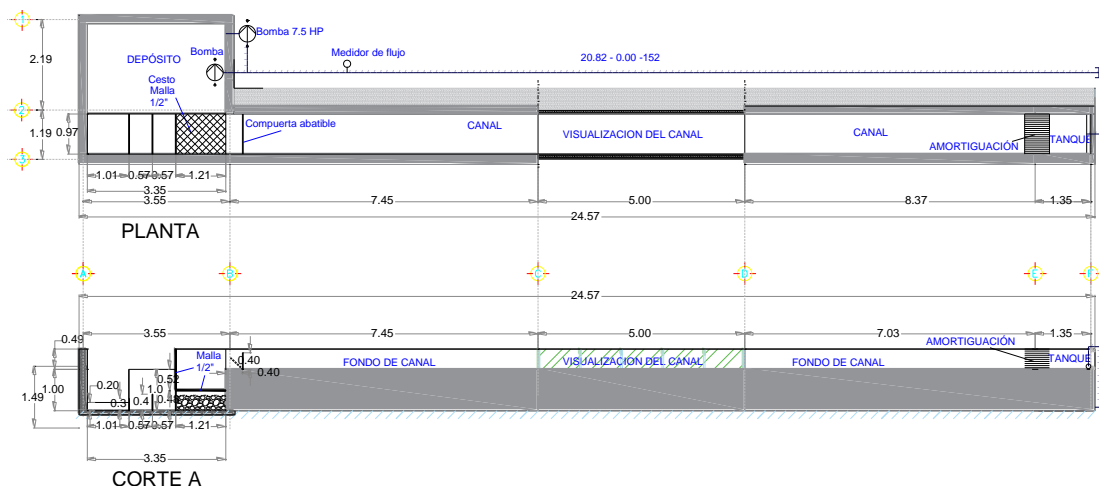


Figura III-3 Canal de olas (estado original del modelo).

III.1.1.1 Adecuaciones en el canal

Para poder recircular un gasto máximo de 50 l/s fue necesario ampliar las dimensiones del depósito en planta a 3.35 x 3.15 m, para lo cual se retiraron dos muros existentes y los nuevos muros se levantaron con mampostería sobre la losa de fondo que fue ampliada en las mismas dimensiones, ver Figura III-4 y Figura III-5. En este tanque se acondicionó un suministro de agua y vaciado.



Figura III-4 Demolición de muros existentes.



Figura III-5 Ampliación del depósito.

Al inicio del canal existía un muro transversal que dividía el área donde se encontraba el mecanismo para generar el oleaje, este muro se retiró y se colocó un difusor en la alimentación del canal a todo lo ancho, adicionalmente para amortiguar la turbulencia y direccionar el flujo de entrada, a 1.00 m de la entrada se colocó una serie de tubos de PVC de $\frac{1}{2}$ " y 0.6 m de longitud.



Figura III-6 Orientadores de flujo al inicio del canal.

Al final del canal se colocó una compuerta abatible para controlar los niveles. En la descarga se acondicionó una canasta y unas mamparas para retener los sólidos flotantes que no se retienen en las pilas e impedir que lleguen a la zona de succión de las bombas.



Figura III-7 Compuerta para controlar niveles y canasta para retención de sólidos.

Se instalaron dos bombas, una sumergible con una capacidad de bombeo de 20 l/s y una centrífuga con una capacidad de bombeo de 30 l/s, dando en total un gasto máximo de 50 l/s.



Figura III-8 Bomba sumergible.

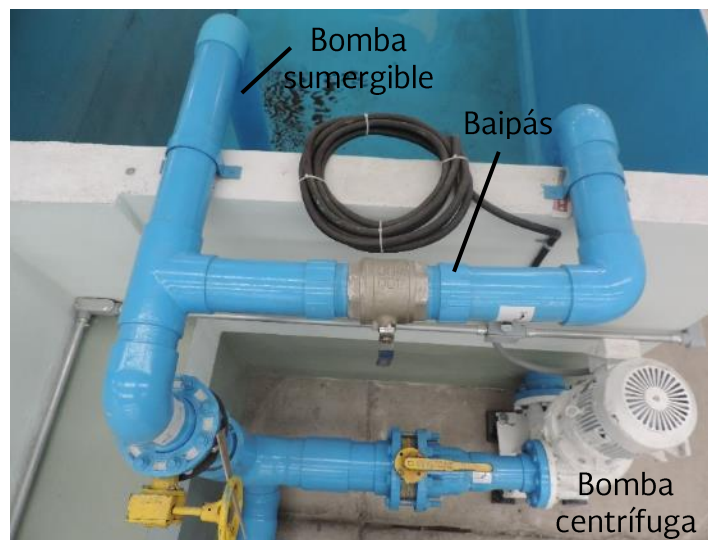


Figura III-9 Bombas, válvulas y baipás.

Para variar el gasto de la bomba sumergible se utiliza el baipás, y para variar el gasto de la bomba centrífuga se instaló un variador de frecuencia.



Figura III-10 Controles de las bombas.

Para la línea de conducción se utilizó tubería de PVC de 6" de diámetro.



Figura III-11 Instalación de la línea de conducción con tubería de PVC de 6".



Figura III-12 Canal de pendiente nula terminado y operando.

III.1.1.2 Instalación de equipo de medición

Para medir los gastos que circulan en el canal se instaló un medidor de flujo de funcionamiento electromagnético, en la línea de conducción, a 6.3 m de las bombas. El medidor del flujo indica el gasto en m^3/h , por lo que se hizo la conversión a l/s .



Figura III-13 Instalación de medidor de flujo.

Los tirantes en el canal se midieron con sensores de nivel de funcionamiento ultrasónico. Se instalaron dos, uno aguas arriba de la zona experimental y otro aguas

abajo. El sensor de nivel primeramente se calibró con el uso de su software y conectado a una computadora.

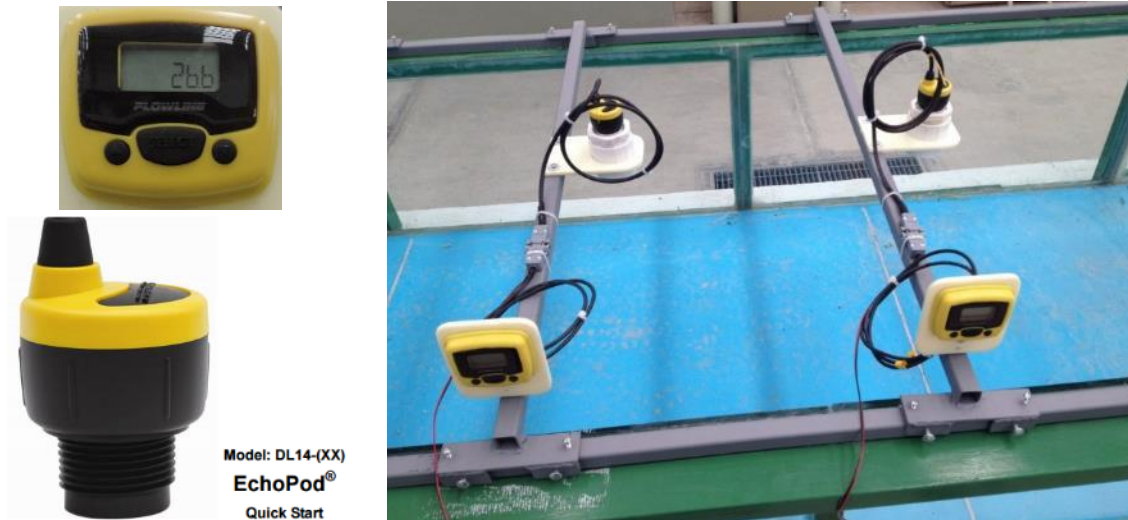


Figura III-14 Sensores de nivel instalados.

Las velocidades se midieron con un velocímetro de alta precisión para medir la velocidad del agua en 3 ejes (3D). Tiene un funcionamiento Acoustic Doppler, es un instrumento versátil, de muy alta precisión para medir la velocidad del agua en un punto específico, reportando velocidad y dirección en los ejes x, y, z. Este equipo está diseñado para aplicaciones tanto en laboratorio como de campo (ríos, estuarios, océano, etc.).

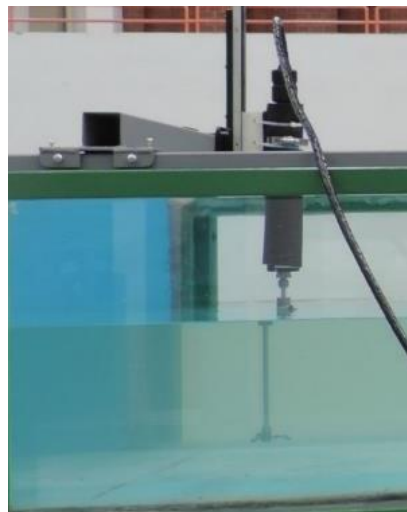


Figura III-15 Micro ADV Sontek.

Se filmaron cada una de las pruebas realizadas, en dos tomas, una lateral y otra de arriba, para lo cual se instalaron las cámaras que se observan en la Figura III-16.

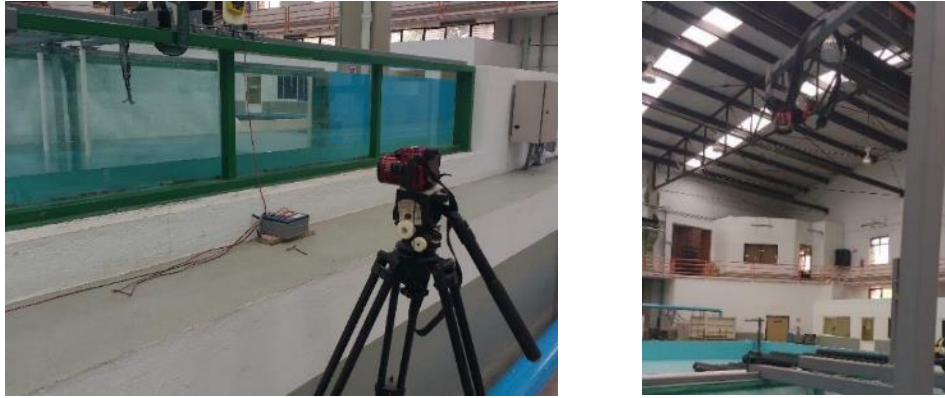


Figura III-16 Cámaras fotográficas y de video instaladas.

III.1.2 Canal de pendiente variable

En el canal de pendiente variable no se realizaron adecuaciones, se utilizó con sus condiciones actuales. Este canal tiene dimensiones de 18 m de longitud y una sección transversal de forma rectangular con un ancho de plantilla de 0.60 m y altura de 0.70 m. Está conformado por una estructura metálica, las paredes son de cristal y la plantilla de acrílico. Cuenta con un sistema hidráulico para el cambio de las pendientes. Se alimenta del tanque elevado, con el cual se alimentan los modelos en el laboratorio, y descarga en los canales de retorno a la cisterna. Para medir el gasto en este canal se instaló un medidor de flujo ultrasónico en su línea de alimentación.



Figura III-17 Canal de pendiente variable.

III.2 Colocación de pilas

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, para la modelación se seleccionaron pilas de sección circular, las cuales se simularon con barrotes de madera barnizados, con un diámetro comercial de $\frac{3}{4}$ ". Se colocaron a un tercio del ancho de plantilla, y en el sentido longitudinal se colocaron en la parte central en cada uno de los canales.

Con el fin de no adicionar alguna obstrucción sobre la plantilla del canal, las pilas se fijaron en la parte superior con el apoyo de un travesaño. En la Figura III-18 se presenta el esquema de la colocación de las pilas, y en la Figura III-19 se muestran las pilas instaladas.

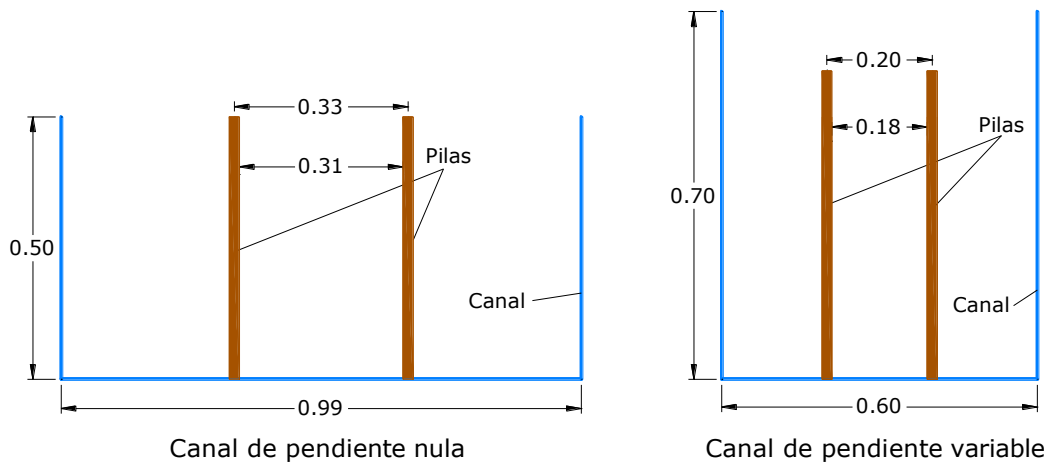


Figura III-18 Ubicación de las pilas los módulos experimentales, sección transversal.



Figura III-19 Pilas en cada uno de los canales.

III.3 Fabricación de las muestras de material leñoso

Se fabricaron las muestras de material leñoso con material leñoso natural, de diferentes tipos de árboles, arbustos y plantas en general, recolectados en el IMTA. Para representar el material a escala se seleccionaron diferentes formas y calibres, y se recortaron para dar los tamaños requeridos en cada muestra de acuerdo con la caracterización de material presentada en el capítulo anterior. En la Figura III-20 se presentan los pasos a seguir para la fabricación de material leñoso.

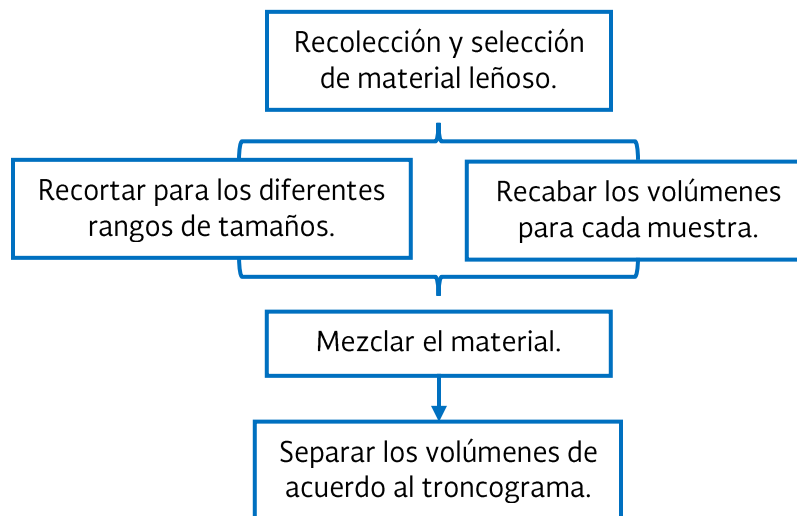


Figura III-20 Pasos para fabricación de las muestras de material leñoso.

En la Figura III-21 se presenta una muestra de material leñoso recolectado, del cual se extrajeron los troncos ramas y raíces de diferentes tamaños.



Figura III-21 Material leñoso recolectado

Una vez cortados los troncos para diferentes tamaños se clasificaron y se midieron los volúmenes para cada rango de tamaños, como se observa en la Figura III-22 y Figura III-23.



Figura III-22 Material leñoso clasificado por tamaños (Vol. =18dm³ y L_{max} = 23.3 cm).



Figura III-23 Material leñoso clasificado por tamaños (Vol. =15dm³ y L_{max} = 30 cm).

Una vez que se tienen los volúmenes para diferentes tamaños de troncos se mezclan como se observa en la Figura III-24, excepto los troncos de mayor tamaño que representan el 10% del volumen total de la muestra, como los que se presentan en la Figura III-25.



Figura III-24 Mezcla de material leñoso ($L_{\max} = 23.3$ cm).



Figura III-25 Troncos de mayor tamaño ($L_{\max} = 23.3$ cm).

Para el caso de las ramas y raíces se tomaron como prototipo diferentes formas y tipos de árboles naturales, los cuales se modelaron a escala a partir del material leñoso recolectado, tanto las formas y con los tamaños requeridos. En la Figura III-26 se presentan algunos ejemplos de troncos con ramas modelados.







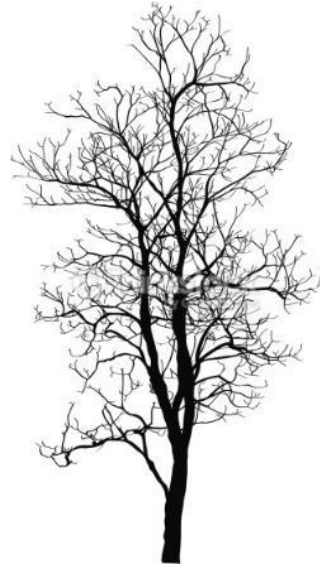


Figura III-26 Ejemplos de los troncos con tramas o raíces modelados.

Los troncos con ramas o raíces tienen una longitud máxima igual a la longitud máxima de los troncos con mayor longitud para cada muestra.

Teniendo los troncos y ramas de diferentes tamaños y troncos con ramas o raíces, se conformaron las muestras para los diferentes volúmenes y tamaños de troncos. En la Figura III-27 se presenta una muestra completa para un volumen de 30 dm³ y longitud máxima de tronco de 25 cm.



Figura III-27 Muestra de Vol.=30 dm³ y L_d = 25 cm.

El material se separa conforme a los porcentajes de volumen que se indican en el troncograma de la Figura II-4.



Figura III-28 Distribución de material de acuerdo al troncograma.

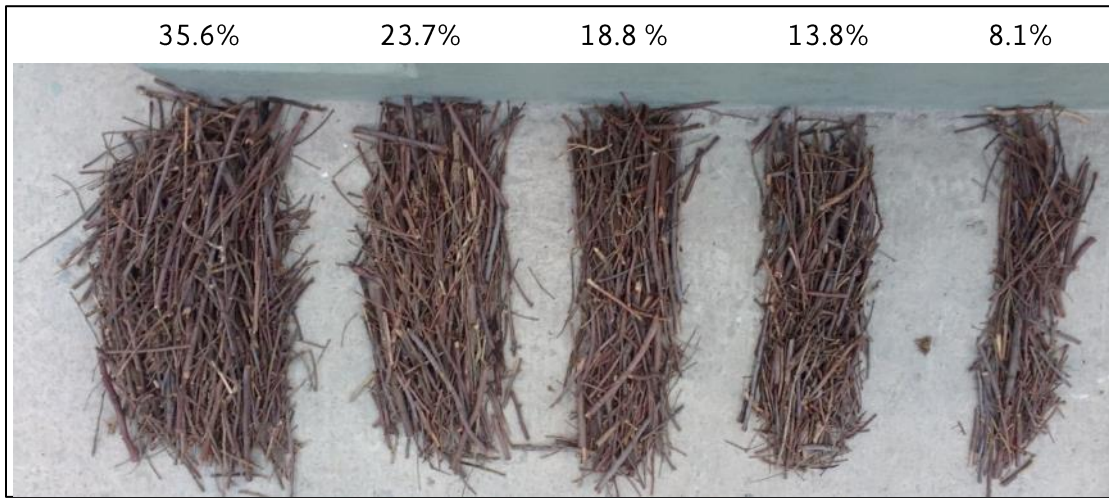


Figura III-29 Troncos y ramas menores separados para porcentajes requeridos en el troncograma.

A cada uno de los volúmenes del troncograma se agregaron los troncos de mayor longitud y troncos con ramas y raíces de manera proporcional a dichos volúmenes.

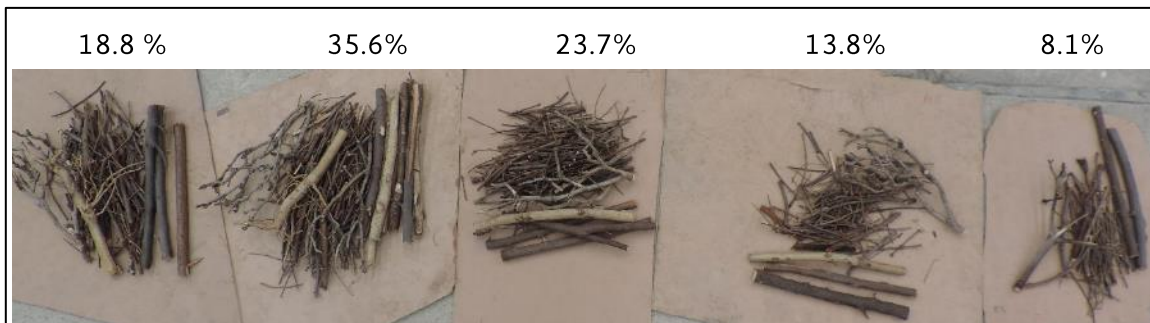


Figura III-30 Muestra de material leñoso con la distribución del troncograma.

IV. CALIBRACIÓN Y ENSAYOS PRELIMINARES

En este capítulo se presenta el procedimiento para la realización de los ensayos; los ensayos preliminares; que sirvieron como análisis de sensibilidad para afinar la metodología; y la calibración, que consistió en determinar los gastos y pendientes, con base en las observaciones de los ensayos preliminares.

IV.1 Procedimiento para realización de ensayos

A continuación se presenta el procedimiento para la realización de los ensayos, utilizada en ambos canales.

1. Se prepara la muestra de material leñoso conforme se indicó en el capítulo anterior, para dar como resultado una muestra como la de la Figura III-30, y se acercan al inicio del canal.
2. Se regula el gasto en el canal.
3. Se miden velocidades y tirantes, aguas arriba y aguas abajo de las pilas.
4. Teniendo todo preparado se activan las cámaras de filmación y se inicia la prueba.
5. Durante el tiempo establecido para cada prueba se incorpora el material leñoso de acuerdo con la distribución temporal de la Figura II-4.
6. Al terminarse el volumen de la muestra, en caso de que se haya retenido material en las pilas, se miden nuevamente las velocidades y tirantes.
7. Se retira el material acumulado en las pilas y el material que pasó y que se retuvo en la malla del depósito, y se pesan por separado para obtener el porcentaje de material retenido.

En las siguientes figuras se presentan momentos que muestran algunos pasos del procedimiento para la realización de ensayos.



Figura IV-1 Preparación de la muestra, paso 1.



Figura IV-2 Inicio del ensayo y encendido de las cámaras, paso 4.



Figura IV-3 Incorporación del material leñoso, paso 5.



Figura IV-4 Retiro del material acumulado en las pilas, paso 7.

Para la captura de los datos de cada prueba se diseñó un formato para cada canal, los cuales se muestran en la Figura IV-5 y Figura IV-6. En estos formatos se indica la hora y fecha de la prueba y el canal utilizado; datos de las pilas, como el diámetro y la separación entre ellas; la descripción de la muestra, como el volumen, longitud máxima de los troncos, el peso retenido en las pilas y el peso total de la muestra al terminar la prueba; tiempo de la prueba; el gasto y las velocidades y tirantes aguas arriba y aguas abajo de las pilas, así como antes y después de la prueba en caso de que se haya acumulado material.

EFFECTO DE ARRASTRE DE MATERIAL LEÑOSO EN PILAS	
Nombre de Prueba: _____	Fecha: _____
	Hora: _____
Canal: De recirculación _____	Pendiente variable _____
	Pendiente: _____
Datos de las pilas:	
Diametro de pilas: _____ "	Separación de pilas: _____ cm
Datos de la muestra:	
Volumen (dm ³): 4.5 _____ 9.0 _____ 18.0 _____	Long. máx. tronco: _____ cm
Peso troncos atrapados: _____	Peso total: _____
Trocicos con ramas y/o raíces Si _____	No _____
Tiempo de la prueba (min): _____	
Gasto (m ³ /h): _____	Gasto (l/s): _____
Velocidades y tirantes sin troncos:	
<u>Aguas arriba</u>	
Velocidad (cm/s): _____	Tirante (cm): _____
Profundidad medidor (cm): _____	
<u>Aguas abajo</u>	
Velocidad (cm/s): _____ Promedio: _____	Tirante (cm): _____
Profundidad medidor (cm): _____	
Velocidades y tirantes con troncos:	
<u>Aguas arriba</u>	
Velocidad (cm/s): _____	Tirante (cm): _____
<u>Aguas abajo</u>	
Velocidad (cm/s): _____ Promedio: _____	Tirante (cm): _____
NOTAS:	

Figura IV-5 Formato para las pruebas del canal de pendiente variable.

EFFECTO DE ARRASTRE DE MATERIAL LEÑOSO EN PILAS	
Nombre de Prueba: _____	Fecha: _____
	Hora: _____
Canal: De recirculación _____	Pendiente variable _____
Datos de las pilas:	
Diametro de pilas: _____ "	Separación de pilas: _____ cm
Datos de la muestra:	
Volumen (dm3): 7.5 _____ 15 _____ 30 _____	Long. máx. tronco: _____ cm
Peso troncos atrapados: _____	Peso total: _____
Trocicos con ramas y/o raices Si _____	No _____
Tiempo de la prueba (min): _____	
Gasto (m3/h): _____	Gasto (l/s): _____
Bombas utilizadas: Centrifuga _____	Sumergible _____
Variador de frecuencia: _____	Altura Compuerta _____
Velocidades y tirantes sin troncos:	
<u>Aguas arriba</u>	
Velocidad (cm/s): _____	Tirante (cm): _____
Profundidad medidor (cm): _____	
<u>Aguas abajo</u>	
Velocidad (cm/s): _____ Promedio: _____	Tirante (cm): _____
Profundidad medidor (cm): _____	
Velocidades y tirantes con troncos:	
<u>Aguas arriba</u>	
Velocidad (cm/s): _____	Tirante (cm): _____
<u>Aguas abajo</u>	
Velocidad (cm/s): _____ Promedio: _____	Tirante (cm): _____
NOTAS:	

Figura IV-6 Formato para las pruebas del canal de pendiente nula.

IV.2 Ensayos preliminares

Se realizaron ensayos primeramente en el canal de pendiente nula, con las muestras de material leñoso de $L_{td} = 30$ cm, de la cual se muestran sus características en la Tabla II-5 y Tabla II-6, para los volúmenes de 7.5, 15 y 30 dm^3 . Se realizaron ensayos para analizar hasta que tirante no afecta significativamente la fricción del material flotante con la plantilla, que es la forma que buscó para simular avenidas extraordinarias con tirantes altos, como se mencionó en el Capítulo II. De acuerdo con los ensayos realizados para 8 y 12 cm de tirante se observó que con un tirante de 8 cm el material tiene fricción con la plantilla, especialmente los troncos con ramas y raíces. Como ejemplo de las pruebas realizadas, en la Figura IV-7 se presentan dos ensayos para la muestra de 30 dm^3 , con una $L_{td} = 30$ cm y un tiempo de prueba de 30 minutos, la imagen superior corresponde a un tirante de 12 cm, mientras que en la imagen inferior el tirante es de 8 cm. Se observa que para un tirante de 8 cm el volumen acumulado es mayor que con el tirante de 12 cm, debido a fricción del material con la plantilla. Por lo tanto se concluye que con mayor tirante existe menor posibilidad de acumulación de material en las pilas.



Figura IV-7 Ensayos con diferente tirante.

Cabe mencionar que con el tirante de 8 cm, a pesar de que el material tiene cierta fricción con el fondo, sigue transitando, no obstante se debe recordar que el canal tiene una plantilla plana a diferencia de un cauce natural, donde existe una alta probabilidad de que el material se deposite antes de llegar al puente.

Por otra parte, durante los ensayos preliminares se observó que a medida que se reutilizan las muestras de material leñoso aumenta el grado de saturación, lo que provoca que los troncos medianos a pequeños transiten sumergidos y pasen por debajo de los troncos grandes atrapados entre las pilas, con lo que consecuentemente disminuye el volumen de acumulación. En la Figura IV-8 se presentan unas imágenes de ensayos con material saturado. En cuanto a esta observación, se optó por realizar las pruebas con el material seco, que de acuerdo con los ensayos es cuando los volúmenes acumulados son mayores, escenario más desfavorable, lo que correspondería a un evento climático sin lluvias antecedentes, lo suficiente para que el material no tenga un alto grado de saturación. Por lo tanto, en este estudio no se considerará el efecto por grado de saturación del material.

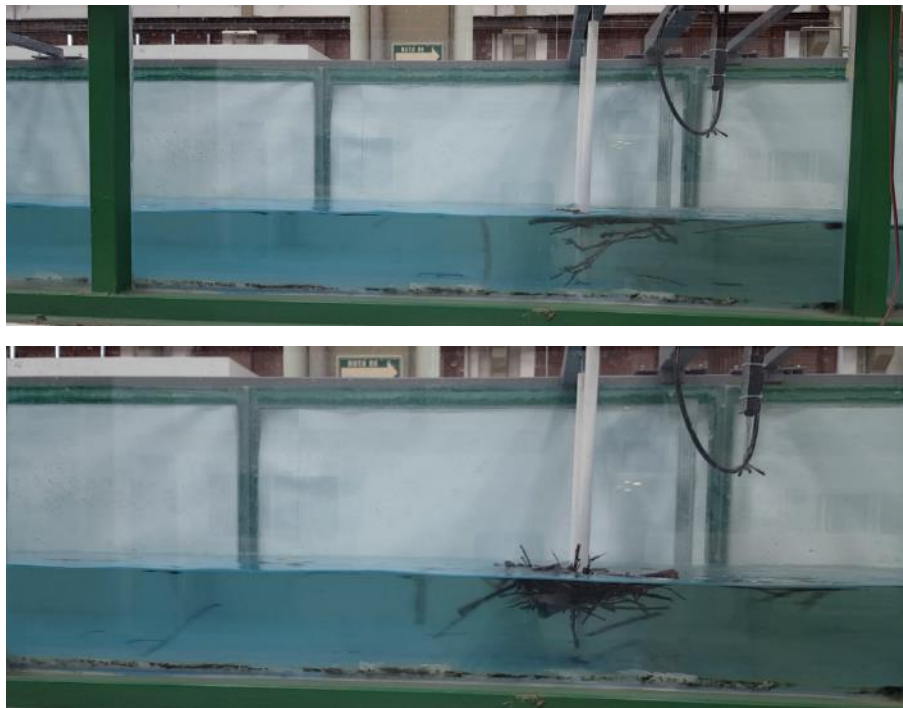


Figura IV-8 Ensayos con material saturado.

En el diseño del modelo se consideró que la separación entre pilas sería de 1/3 del ancho del canal. Sin embargo, se realizaron pruebas aumentando y reduciendo la separación entre pilas, lo cual modifica completamente el comportamiento en la acumulación del material, por lo que se decidió continuar con la idea original de que la separación entre pilas sea igual a 1/3 del ancho del canal.

IV.3 Calibración

La calibración consistió en encontrar las combinaciones de pendientes, gastos y tirantes, con las cuales se dieran tres velocidades y números de Froude diferentes. Primeramente se realizaron cálculos para determinar las pendientes necesarias, y posteriormente para verificar y afinar se midieron en los canales las velocidades, gastos y tirantes. En las tablas siguientes se presentan los resultados en modelo y prototipo para las tres pendientes encontradas y el canal al utilizar.

Tabla IV-1 Características hidráulicas en modelo.

Módulo de experimentación	Pendiente	Gasto (l/s)	Velocidad (m/s)	Ancho plantilla (m)	Tirante (m)	Fr
Pendiente nula	0	47	0.40	0.98	0.12	0.37
Pendiente variable	0.0009	40	0.56	0.60	0.12	0.51
Pendiente variable	0.0015	50	0.69	0.60	0.12	0.64

Tabla IV-2 Características hidráulicas en prototipo.

Módulo de experimentación	Pendiente	Gasto (m³/s)	Velocidad (m/s)	Ancho plantilla (m)	Tirante (m)	Fr
Pendiente nula	0	2690.4	3.57	78.4	9.6	0.37
Pendiente variable	0.0009	8787.4	6.50	82.2	16.44	0.51
Pendiente variable	0.0015	10984.	8.13	82.2	16.44	0.64

V. ENSAYOS DE EVALUACIÓN DE LOS MODELOS Y MODIFICACIONES

Considerando las condiciones y variables que se establecieron con las observaciones en los ensayos preliminares, se realizaron los ensayos de evaluación para continuar la caracterización del efecto de arrastre de material leñoso en pilas, a partir de lo cual se propusieron algunas modificaciones en la metodología experimental. Finalmente, se realizaron todos los ensayos planeados y se analizan los resultados.

V.1 Ensayos de evaluación

Con las observaciones en los ensayos preliminares se dedujeron las siguientes condiciones:

- La profundidad del agua será suficiente para que no haya fricción entre el material leñoso y el fondo del canal.
- Las muestras de material leñoso deben estar secas en cada prueba para que floten.
- Las pilas tendrán una separación entre ellas fijo de 1/3 del ancho del canal.

Por lo tanto, las variables a considerar en la modelación son:

- Longitud de tronco de diseño (long. máx.)
- Volumen de la muestra
- Tiempo de la prueba
- Número de Froude

Teniendo en cuenta lo anterior y la caracterización definida en el Capítulo II, se realizaron pruebas con las combinaciones de volumen de la muestra y tiempo de prueba que se presentan en la Tabla V-1 y Tabla V-2, para el primer tamaño de tronco a modelar en cada uno de los canales. Cada prueba se realizó dos veces.

Tabla V-1 Canal de pendiente nula y longitud máxima de tronco de 30 cm.

Tiempo/volumen		Tiempo de la prueba (min)			
		30	20	10	5
Volumen de la muestra (dm ³)	30	30-30	30-20	30-10	
	15	15-30	15-20	15-10	15-05
	7.5		7.5-20	7.5-10	7.5-05

Tabla V-2 Canal de pendiente variable (S=0.0009) y longitud máxima de tronco de 20 cm.

Tiempo/volumen		Tiempo de evento (min)			
		22.9	15.3	7.6	3.8
Volumen de material leñoso (dm ³)	6	6-22.9	6-15.3	6-7.6	
	3	3-22.9	3-15.3	3-7.6	3-3.8
	1.5		1.5-15.3	1.5-7.6	1.5-3.8

De los ensayos realizados en el canal de pendiente variable con una longitud máxima de tronco de 20 cm, no se generó acumulación entre las pilas para ninguna de las combinaciones de la Tabla V-2. Mientras que en los ensayos realizados en el canal de pendiente nula sí se generó acumulación en varias de las combinaciones de la Tabla V-1. Se observó que los volúmenes acumulados en las pilas o entre las pilas son mayores para volúmenes de muestras mayores y tiempos de ensayo menores. Esto quiere decir que existe mayor probabilidad de acumulación cuando se presentan arrastres con mayores concentraciones de material leñoso, lo cual es razonable.

V.2 Modificaciones en la metodología experimental

Realizados los ensayos con el primer tamaño máximo de tronco en cada canal, se observó que el tiempo que se requiere para realizar cada prueba es considerable, así como también el tiempo requerido para fabricar una muestra de material leñoso. Por lo que la idea original de modificar la longitud máxima del tronco hasta encontrar el tamaño con el cual no se genere acumulación ya no fue viable, pues de esta manera se tendrían que fabricar numerosas muestras. En ese sentido, se decidió reconsiderar la metodología experimental, proponiendo cierto tamaño de troncos y para cada tamaño encontrar el tiempo de ensayo con el cual no se genere acumulación en las pilas. De esta manera se tendrían que fabricar menos muestras de material leñoso.

Como se mencionó en el apartado anterior, en los ensayos realizados en el canal de pendiente variable con las muestras con $Lt_d = 20$ cm no se presentan acumulaciones. Para las mismas condiciones hidráulicas y mismas combinaciones de volumen y tiempo de prueba, se modelaron las mezclas con $Lt_d = 30$ cm, con las cuales se presenta acumulación en todos los ensayos. Teniendo estos dos extremos: cero acumulación con $Lt_d = 20$ cm y acumulación en todos los ensayos con $Lt_d = 30$ cm, se propuso fabricar una muestra con $Lt_d = 25$ cm.

Con volumen de 1.5 dm^3 y $Lt_d = 25$ cm, se realizaron varios ensayos para encontrar el tiempo con el cual no se acumula material en las pilas, de una manera iterativa, con lo cual se observó que se tendrían que realizar numerosos ensayos para encontrar un valor con buena aproximación del tiempo sin acumulación. Con el fin de solventar este inconveniente, se analizó la relación entre el volumen de acumulación y el tiempo de la prueba, como se presenta en la Figura V-1, donde se observa que existe una clara tendencia entre estas dos variables, generándose menos acumulación cuando se incrementa el tiempo de la prueba. A los puntos graficados se ajusta una línea recta, con la cual es posible encontrar el tiempo con el que la acumulación es igual a cero. De esta manera se realizaron menos pruebas.

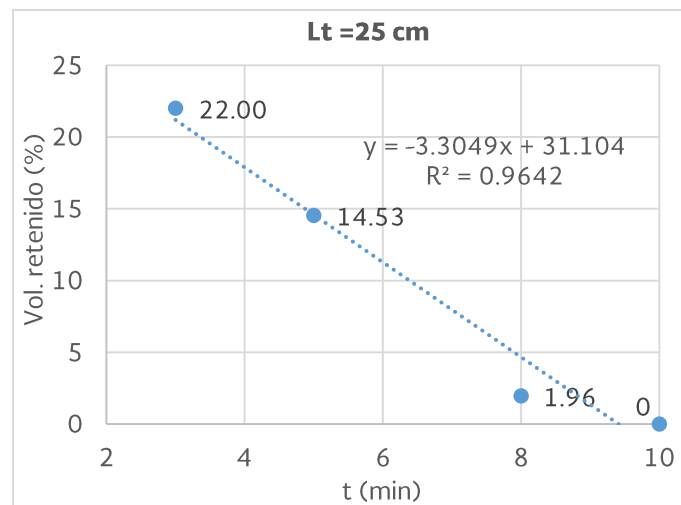


Figura V-1 Tiempo de ensayo – volumen retenido, Vol. 1.5 dm^3 , $Fr=0.37$, $Lt_d = 25$ cm.

En Figura V-2 se muestran fotografías al final de los ensayos de la gráfica anterior, en las que se observan las acumulaciones en las pilas.

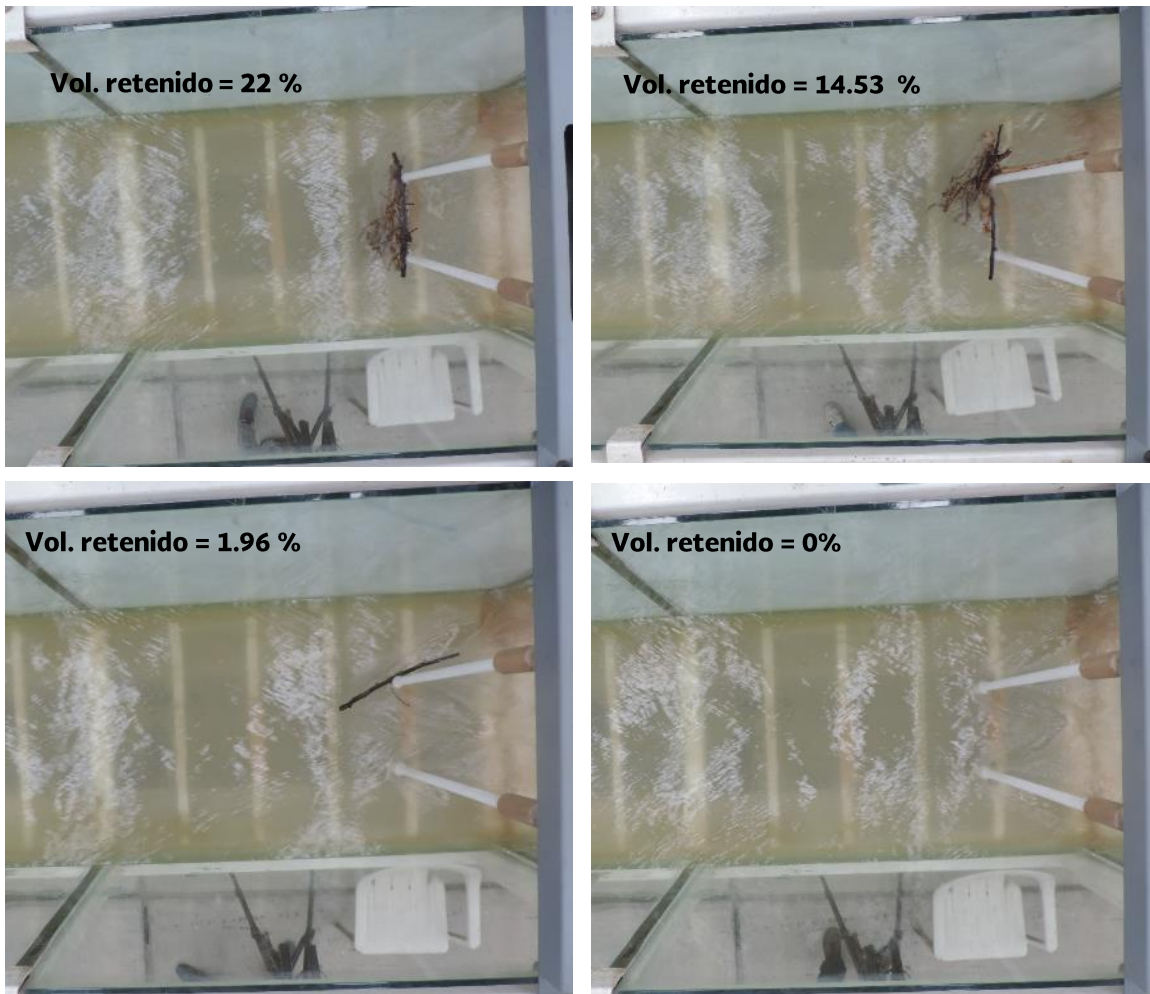


Figura V-2 Ensayos para un volumen de 1.5 dm³ y Lt_d = 25 cm.

Para $Lt_d = 25$ cm, se ensayaron los volúmenes propuestos de 1.5, 3 y 6 dm³ y dos volúmenes mayores de 9 y 18 dm³. Para cada volumen se encontró el tiempo con el cual no se presenta acumulación siguiendo el procedimiento descrito en el párrafo anterior. Se graficaron los valores de volumen de la muestra contra el tiempo sin acumulación, como se presenta en la Figura V-3, donde se observa una tendencia a incrementarse el tiempo sin acumulación conforme aumenta el volumen de la muestra. Entre los volúmenes 1.5, 3 y 6 dm³ los valores de los tiempos sin acumulación están considerablemente separados en comparación con la separación de los tiempos entre los volúmenes 6, 9 y 18 dm³, es decir, que a partir del volumen de 6 dm³ el tiempo sin acumulación incrementa poco, tendiendo en este caso a 30 min. Con esto se demuestra que la selección de los volúmenes a modelar fue acertada, puesto que para volúmenes mayores la curva se hace asíntota.

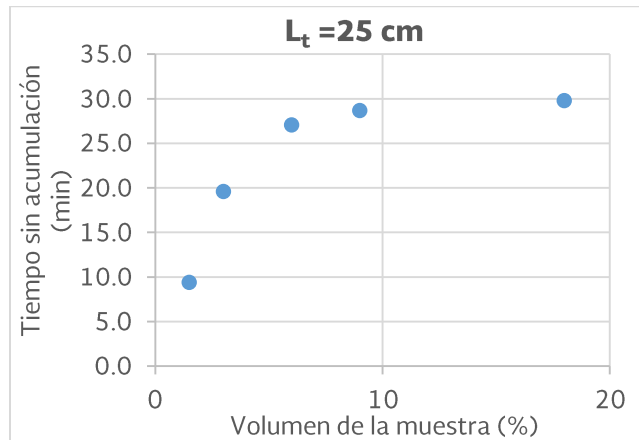


Figura V-3 Volumen de la muestra – tiempo sin acumulación, $Fr = 0.51$ y $L_t = 25$ cm.

Por lo tanto, las modificaciones a la metodología experimental consistieron básicamente en omitir la Tabla II-8, Tabla V-1 y Tabla V-2, en las que se indicaban los tiempos específicos para los ensayos. En su lugar el tiempo de la prueba se vuelve variable para cada combinación de volumen y tamaño máximo de tronco, quedando el tiempo como una incógnita, la cual se determina con las ecuaciones de las rectas ajustadas a los valores de “tiempo de ensayo-volumen retenido”. Con esto ya no fue necesario realizar dos veces la misma prueba.

Los tamaños de los troncos se fueron definiendo sobre el desarrollo de los experimentos, de acuerdo con los resultados que iban dando con otros tamaños previamente modelados. Así mismo, los tiempos sin acumulación que se iban encontrado servían de referencia para proponer los tiempos a modelar en nuevas pruebas.

V.3 Resultados de los ensayos

En las siguientes gráficas se presentan los resultados para todas las combinaciones de volumen y longitud máxima de tronco, y para cada número de Froude. Contienen la línea recta ajustada a los datos, su ecuación y el valor R cuadrado. Cabe aclarar que en algunos ensayos se obtuvieron puntos que se alejan de la nube de datos con tendencia, pero fueron descartados y no aparecen en las gráficas. Estos datos alejados se deben a dos razones, la primera se atribuye a que el fenómeno estudiado tiene cierto grado de aleatoriedad, y la segunda razón es que pueden ser producto de un error en el

ensayo, por ejemplo, que no se siguió correctamente el procedimiento, no se tomaron bien las lecturas o no se capturaron bien los datos.

- **Canal de pendiente nula, Fr = 0.37 y escala 1:80**

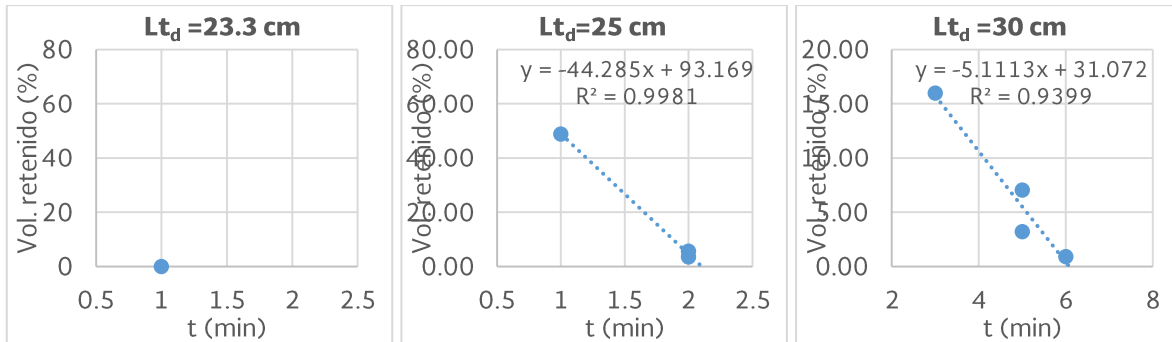


Figura V-4 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 7.5 dm³ y Fr=0.37.

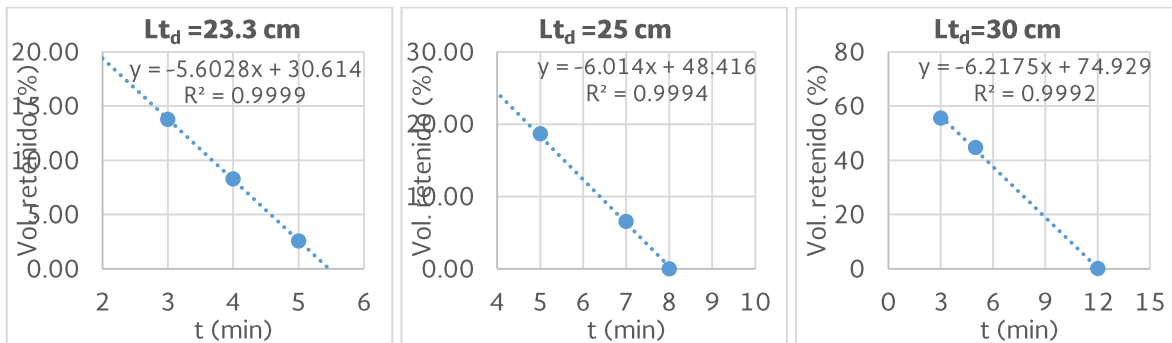


Figura V-5 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 15 dm³ y Fr=0.37.

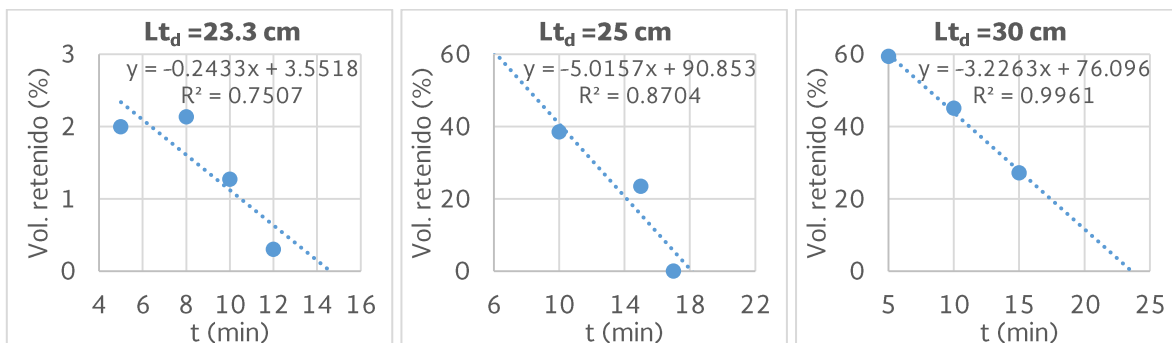


Figura V-6 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 30 dm³ y Fr=0.37.

- **Canal de pendiente variable, Fr = 0.51 y escala 1:137**

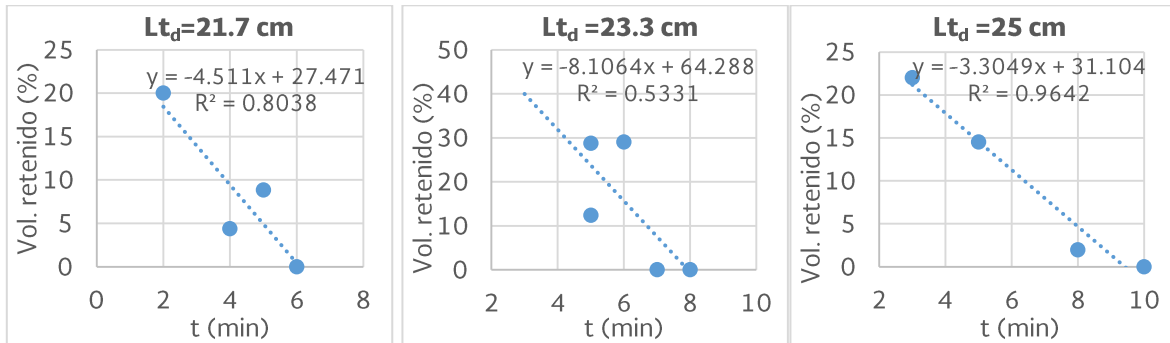


Figura V-7 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 1.5 dm³ y Fr=0.51.

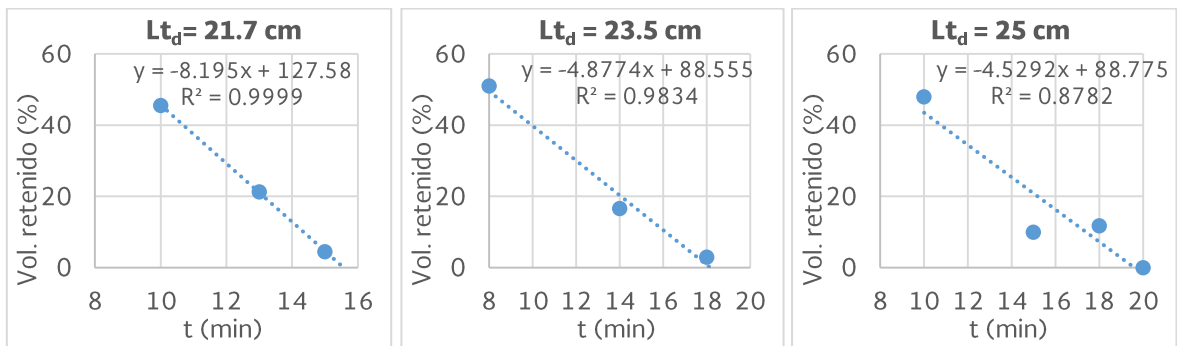


Figura V-8 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 3 dm³ y Fr=0.51.

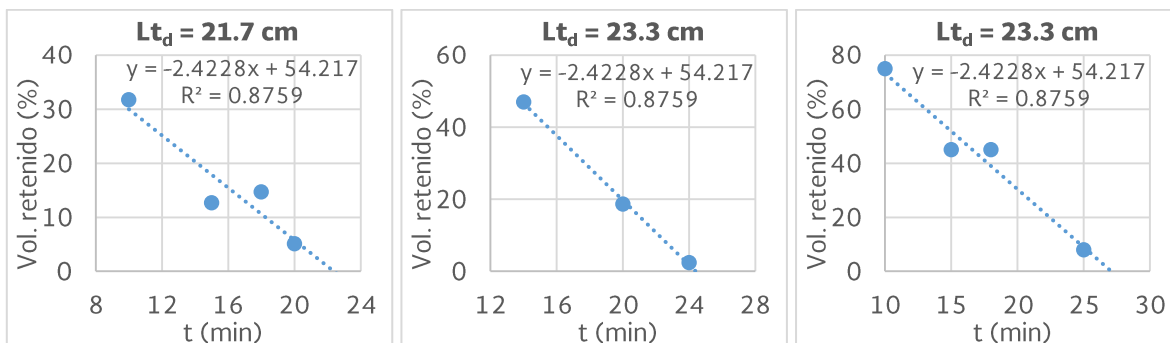


Figura V-9 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 6 dm³ y Fr=0.51.

- **Canal de pendiente variable, Fr = 0.64 y escala 1:137**

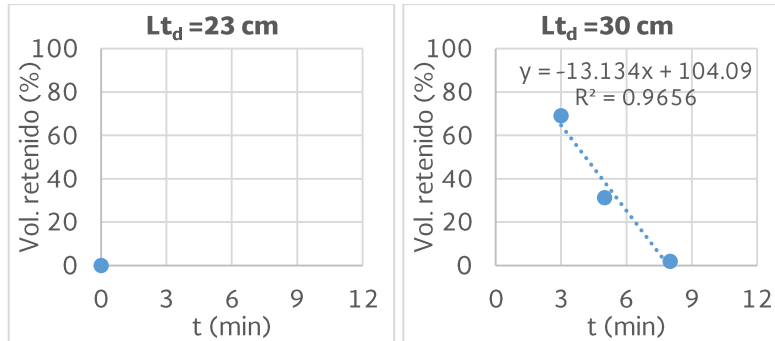


Figura V-10 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 1.5 dm³ y Fr=0.64.

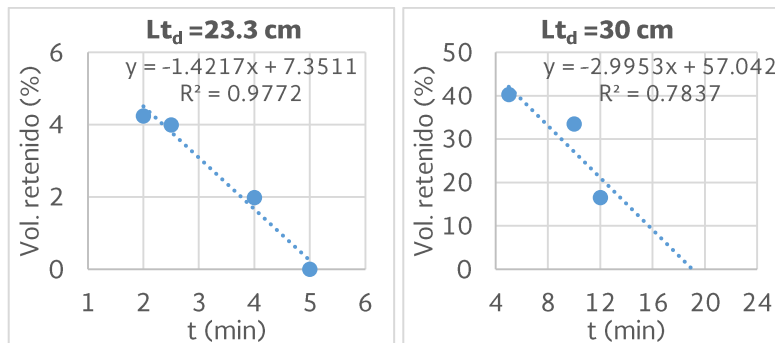


Figura V-11 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 3 dm³ y Fr=0.64.

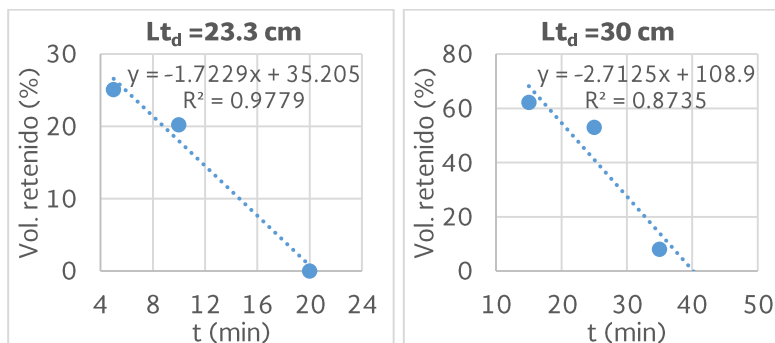


Figura V-12 Tiempo de prueba-vol. retenido para un volumen de 6 dm³ y Fr=0.64.

Con las ecuaciones de las gráficas anteriores se obtuvieron los tiempos con los cuales la acumulación es igual a cero, y se graficaron los volúmenes de las muestras contra los

tiempos sin acumulación, para cada número de Froude.

- **Canal de pendiente nula, $Fr = 0.37$ y escala 1:80**

Tabla V-3 Tiempos sin acumulación, $Fr=0.37$.

Volumen (dm ³)	Long. de tronco de diseño (cm)		
	30	25	23.3
Tiempo sin acumulación (min)			
7.5	6.08	2.10	0
15	12.05	8.02	5.46
30	23.59	18.11	14.6

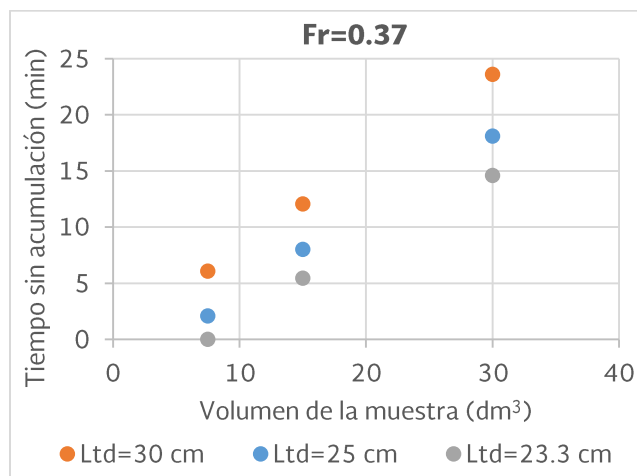


Figura V-13 Volumen de la muestra – tiempo sin acumulación, $Fr = 0.37$.

- **Canal de pendiente nula, $Fr = 0.51$ y escala 1:137**

Tabla V-4 Tiempos sin acumulación, $Fr=0.51$.

Volumen (dm ³)	Long. de tronco de diseño (cm)		
	25	23.3	21.7
Tiempo sin acumulación (min)			
1.5	9.41	7.93	6.09
3	19.6	18.16	15.57
6	27.1	24.40	22.38

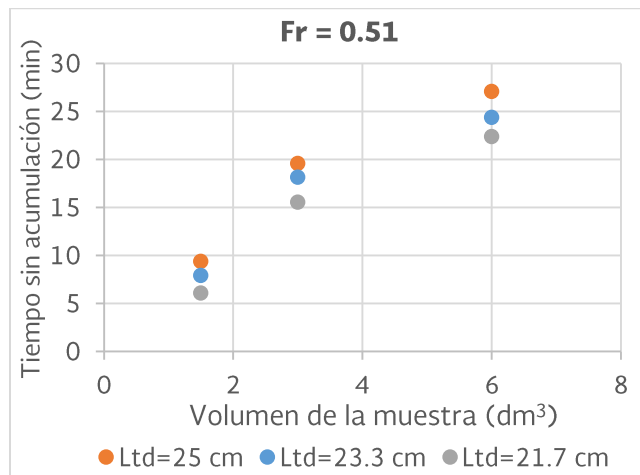


Figura V-14 Volumen de la muestra – tiempo sin acumulaci3n, Fr = 0.51.

- **Canal de pendiente nula, Fr = 0.64 y escala 1:137**

Tabla V-5 Tiempos sin acumulaci3n, Fr=0.64.

Volumen (dm ³)	Long. de tronco de dise1o (cm)		
	30	25	23.3
Tiempo sin acumulaci3n (min)			
1.5	7.93	1.00*	
3	19	11.00*	5.17
6	40.15	29.00*	20.43

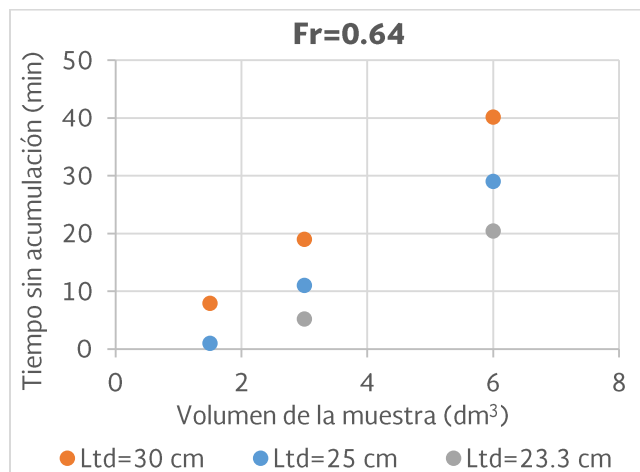


Figura V-15 Volumen de la muestra – tiempo sin acumulaci3n, Fr = 0.64.

Los valores con () de la tabla V-5 no son resultados directos de las pruebas, fueron deducidos.

A partir de las gráficas Figura V-13, Figura V-14 y Figura V-15 que están a escala, se obtuvieron las gráficas con los valores en prototipo, las cuales se presentan en la Figura V-16.

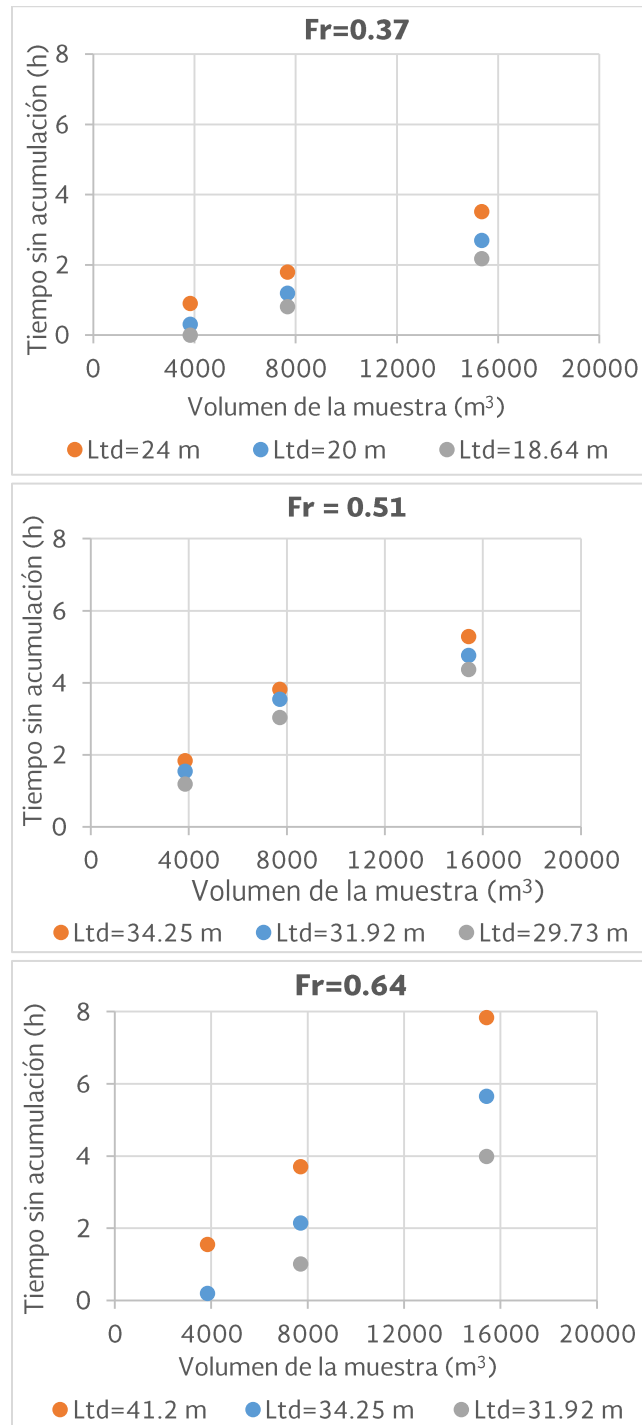


Figura V-16 Volumen del material – tiempo sin acumulación, valores de prototipo.

En estas gráficas se puede visualizar claramente que a mayor volumen del material se requiere mayor tiempo del evento para que no se presente acumulación en las pilas, y a mayor longitud de tronco de diseño también se requiere mayor tiempo, o visto de otra manera, entre menor sea el tiempo del evento hay mayor probabilidad de que se genere acumulación en las pilas ya que se incrementa la concentración del material para un mismo volumen. Por otra parte, se observa que conforme aumenta el número de Froude se reduce la probabilidad de que se generen acumulaciones.

VI. GENERACIÓN DE METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CRUCE

Para aplicar los resultados del presente estudio, previamente se deberán estimar cuatro variables que dependen de las características del cauce aguas arriba y su cuenca de aportación, estas son:

- Volumen de material leñoso con potencial a incorporarse al cauce.
- Tiempo con presencia de arrastre de material leñoso.
- Longitud de tronco de diseño.
- Número de Froude.

El volumen de material leñoso está en función de la tipología y distribución de la vegetación y de las pendientes y condiciones del suelo de las zonas contiguas a los cauces. Diehl (1997) propuso una metodología para estimar el potencial de acumulación de material leñoso, complementada por P. F. Lagasse (2010), para la cual se requiere principalmente de mapas, fotografías aéreas existentes, encuestas y reportes de acumulación de sólidos en puentes. Ruiz-Villanueva *et al.* (2014c) propusieron una metodología para estimar el volumen incorporable que está en función de contribuyente, cubierta forestal, densidad y un factor de corrección.

El tiempo con presencia de arrastre de material leñoso está ligado a los hidrogramas de avenidas y al tiempo de recorrido desde las zonas con potencial de generación y arrastre hasta el sitio de estudio, por lo que para estimar este tiempo se deberá realizar un estudio hidrológico. El periodo con arrastre abarca el pico del hidrograma.

La longitud de tronco de diseño se determina mediante la evaluación de los troncos existentes en el cauce y sus márgenes, así como del análisis de la tipología de la vegetación de las zonas potenciales, por lo que esto es un examen de campo. Si existen reportes de eventos con acumulación de material también pueden ser útiles.

El número de Froude está en función de la velocidad y el tirante, variables que pueden ser medidas en campo o determinadas mediante un modelo numérico. Para fines de diseño, la velocidad y tirante deben corresponder a una avenida extraordinaria o condiciones de inundación.

Teniendo la información sobre las cuatro variables se pueden tomar como referencia las gráficas de la Figura VI-1, para determinar la separación mínima entre pilas.

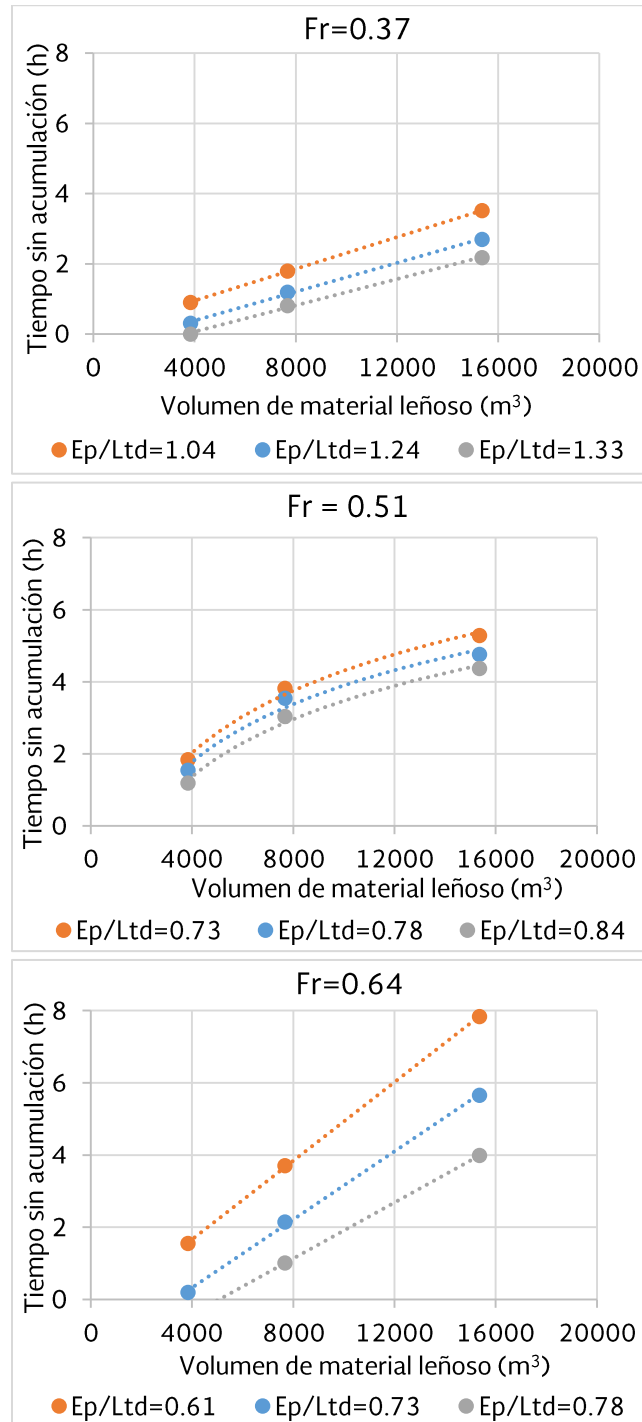


Figura VI-1 Vol – t, para diferentes relaciones E_p/L_t y diferentes Fr.

En las gráficas anteriores, para cada número de Froude están graficados los valores de los volúmenes de material leñoso y tiempos con el cual no se presenta acumulación de material, esto para cada relación de la separación entre pilas y la longitud de tronco de diseño, (S_p/L_{td}).

Otra forma de representar los resultados del presente estudio es con la gráfica de la Figura VI-2, donde las líneas punteadas corresponden a los valores del tiempo sin acumulación (eje derecho) y las líneas continuas con etiquetas corresponden a los valores de la relación S_p/L_{td} (eje izquierdo).

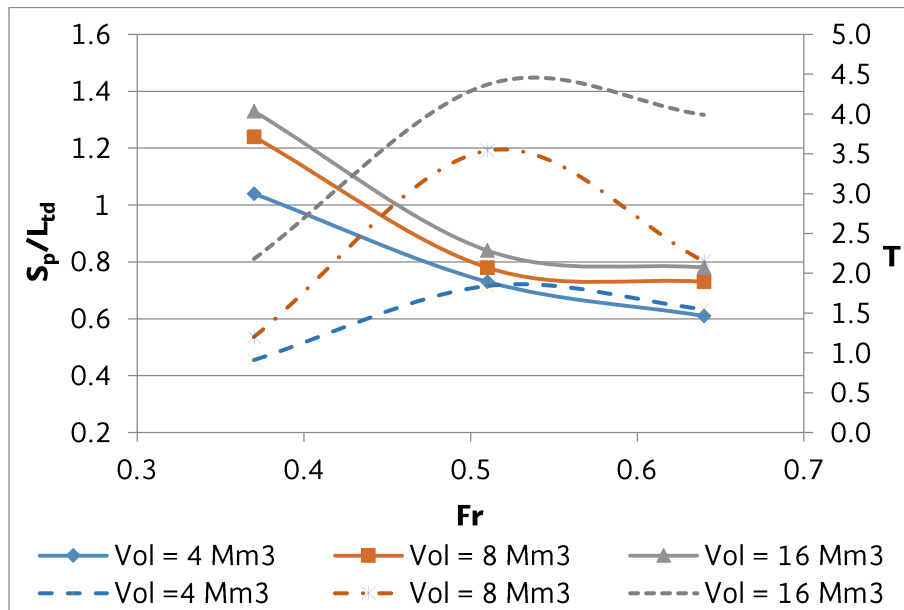


Figura VI-2 Fr - S_p/L_{td} y Fr - t para diferentes volúmenes.

Con esta gráfica es posible obtener los valores de S_p/L_{td} para diferentes números de Froude y combinaciones de volumen de material y tiempo de arrastre.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para generar la metodología con la cual se estime la separación entre pilas requerida para evitar o reducir la acumulación de material leñoso en pilas de los puentes, previamente se realizó un análisis de sensibilidad para determinar las variables y condiciones a considerar en el desarrollo experimental. Las variables seleccionadas fueron la longitud de tronco de diseño, el volumen de material leñoso, el tiempo con arrastre de material y el número de Froude. Se observó que las acumulaciones se favorecen con volúmenes mayores de material, tamaño de troncos mayores, tiempos de evento menores y números de froude menores.

De los números de Froude modelados, para $Fr = 0.37$ la separación entre pilas debe ser mayores que la longitud de tronco de diseño, hasta en un 133% del L_{td} , mientras que para $Fr = 0.51$ y 0.64 la separación entre pilas puede ser menor que la L_{td} hasta en un 61% del L_{td} , lo cual contraviene con lo que se realiza en la práctica, pues el criterio utilizado en México para determinar la separación entre pilas es que la separación sea mayor que la longitud de los troncos con mayor longitud que se observen la zona aguas arriba con potencial de generación de arrastre de material leñoso. Esto indica que el espacio mínimo entre pilas necesario es muy sensible al número de Froude.

De acuerdo con estos resultados, se debe tener mayor cuidado cuando los números de Froude son bajos, donde el potencial de acumulación es mayor. Además, por lo regular en las zonas urbanas los cauces tienen pendientes y números de Froude bajos, estando estas zonas más propensas a inundaciones. Por otra parte, los números de Froude altos se presentan en las partes altas de la cuenca donde los cauces son más estrechos, por lo que en estos casos se recomienda no utilizar pilas de apoyo intermedias.

El proceso de generación, arrastre y acumulación de material leñoso y otros desechos es muy complejo, ya que influyen un gran número de factores. Razón por la que es muy complicado generalizar una metodología para diseño de estructuras de cruce en cauces, pues cada cauce cuenta con sus propias características geomorfológicas e hidrológicas. Por esto, en casos que son especiales por su complejidad e importantes por la inversión, beneficio y riesgo, se recomienda que se realice un estudio en modelo físico a escala, el cual deberá ser calibrado y validado con datos de campo.

Aún y cuando se considere una separación entre pilas que reduzca la probabilidad de acumulaciones de material leñosos, se recomienda que para el diseño de la estructura se consideren las fuerzas que adicionalmente proporcionarían las posibles acumulaciones.

En cuencas con alto potencial de arrastre de material leñoso, además de dimensionar la estructura de cruce para reducir el potencial de acumulación, se recomienda adicionar al sistema medidas estructurales alternativas, como aletas en las pilas de los puentes, represas, espigones, deflectores, barredoras, puntales, rejillas.

Es necesario implementar un programa a nivel nacional para monitorear las estructuras de cruce, en el que se considere la caracterización de cada evento con acumulación de escombros en estructuras de cruce en corrientes de agua, para contar con información de campo que sirva en los avances de investigaciones del efecto de arrastre de sólidos en estructuras de cruce. Con información de este tipo sería posible regionalizar recomendaciones para el diseño de puentes considerando el arrastre de sólidos.

REFERENCIAS

Abbe, T. B., and Montgomery, D.R. (1996). Large woody debris jams, channel hydraulics and habitat formation in large rivers. *Regulated Rivers*, 12 (2-3). Pp. 201-221.

Abbe, T. B. and Montgomery, D. R. (2003). Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets River Basin, W.A. *Geomorphology*, 51 (1-3) 81-107.

AASHTO LRFD BRIDGE. DESIGN SPECIFICATIONS. Customary U. S. Units HIGHWAY SUBCOMMITTEE ON BRIDGES AND STRUCTURES (2012).

Bocchiola, D., Rulli, M.C., and Rosso, R. (2006a). Flume experiments on wood entrainment in rivers. *Adv. Water Resour*, 29(8), 1182-1195.

Bocchiola, D., Rulli, M.C., and Rosso, R. (2006b). Transport of large woody debris in presence of obstacles. *Geomorphology*, 76(1-2), 166-178.

Bocchiola, D., Rulli, M.C., and Rosso, R. (2008). A flume experiment on the formation of wood jams in rivers. *Water Resour. Res.*, 44(2), W02408

Braudrick, C.A., and Grant, G.E. (2000). When do logs move in rivers? *Water Resour. Res.*, 36(2), 571-583.

Braudrick, C.A., and Grant, G.E. (2001). Transport and deposition of large woody debris in streams: A flume experiment. *Geomorphology*, 41(4), 263-283.

Chang, F.F., and Shen, H. W. (1979). Debris problems in the river environment. U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Rep. FHWA-RD-79-62, Washington, D.C.

D.B. Booth, D.R. Montgomery, and J.P. Bethel, 1997, Large woody debris in urban streams of the Pacific Northwest: in Roesner, L.A., ed., Effects of watershed development and management on aquatic ecosystems: Engineering Foundation Conference, Proceedings, Snowbird, Utah, August 4–9, 1996, pp. 178-197.

De Cicco, P.N, Paris, E., E. and Solari, L. (2015) Bridge clogging caused by woody debris: experimental analysis on the effect of pier shape. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Florence (Italy) via di Santa Marta, 3 50139 Firenze. e-mail: pinanicoletta.decicco@unifi.it; eparis@dicea.unifi.it; luca.solari@unifi.it.

Dennis A. Lyn, Thomas Cooper, Yong-Kon Yi, Rahul Sinha, and A. R. Rao (2003). Debris Accumulation at Bridge Crossings: Laboratory and Field Studies. Joint Transportation Research Program. Technology Transfer and Project Implementation Information.

Diehl, T.H., 1997, "Potential Drift Accumulation at Bridges", FHWA-RD-97-28, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Heller, V. (2011). Scale effects in physical hydraulic engineering models. *J. Hydraul. Res.* 49 (3), 293-306.

Lyn, D.A., Cooper, T., Yi, Y-K, Sinha, R., and Rao, A.R. (2003b) Debris Accumulation at Bridge Crossings: Laboratory and Field Studies, School of Civil Engineering, Purdue University, Joint Transportation Research Program, Report. No. FHWA/IN/JTRP.-2003/10, 59 pp.

Manners, R. B., and Doyle, M.W. (2008). A mechanistic model of woody debris jam evolution and its application to wood-based restoration and management. *River. Res. Appl.*, 24 (8), 1104-1123.

P. F. Lagasse, P. E. Clopper, L. W. Zevenbergen, W. J. Spitz L. G. Girard (2010). Effects of Debris on Bridge Pier Scour. National Cooperative Highway Research Program, Report 653.

Perham, R.E. (1987). Floating debris control: A literature review. Rep REMR-HY-3, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.

R. B. Manners, M. W. Doyle, M. J. Small, 2007. Structure and hydraulics of natural woody debris jams. *Water Resources Research*. Volume 43, Issue 6. DOI: 10.1029/2006WR004910.

Ruiz Villanueva V., Blade Castellet, E., Díez, H. A., Bodoque, J.M y Sánchez, J.M. (2013) Two-dimensional modelling of large Wood transport during flash floods. *Earth Surf. Process. Landforms*,

Ruiz-Villanueva, V.; Díez-Herrero, A.; Bodoque, J.M., Bladé, E. (2015). Avances en el análisis del material leñoso en ríos: incorporación, transporte e influencia en el riesgo por inundaciones. *Cuaternario y Geomorfología* ISSN: 0214-1744. www.rediris.es/CuaternarioyGeomorfologia/

Schmocker, L., Hager, H. (2011). Probability of Drift Blockage at Bridge Decks. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, V. 137 (4), p. 470-479.

Schmocker, L., Hager, H. (2013). Scale Modeling of Wooden Debris Accumulation at Debris Rack. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, V.139 (8): 827-836.

Terry J. Wipf, Brent M. Phares, and Justin M. Dahlberg (2012). Debris Mitigation Methods for Bridge Piers. Bridge Engineering Center. Iowa State University. Instituto for Transportation. Federal Highway Administration Iowa Department of Transportation (InTrans Project 11-395).