



**COORDINACIÓN DE DESARROLLO
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL**

SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO

T E S I S

**EFFECTO DEL ARRASTRE DE SOLIDOS FLOTANTES EN FLUJOS A
SUPERFICIE LIBRE EN PILAS DE PUENTES**

que para obtener el grado de
**Maestro en
Ciencias y Tecnología del Agua**

presenta
Ing. Luis Fernando Rojas López

Tutor: M.I. José Alfredo González Verdugo

Jiutepec, Morelos

2017

Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada “EFECTO DEL ARRASTRE DE SOLIDOS FLOTANTES EN FLUJOS A SUPERFICIE LIBRE EN PILAS DE PUENTES”, otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

Ing. Luis Fernando Rojas López

Jiutepec, Morelos a 17 de noviembre del 2017

Dedicatoria

Pon en manos del Señor todas tus obras, y
tus proyectos se cumplirán.

Proverbios 16:3

Gracias Dios

Por las bendiciones que me otorgas, por
guiar mis pasos y permitirme culminar
una etapa más en mi vida.

A mis padres

Me han dado lo más valioso que un hijo puede recibir un
amor sincero y su confianza absoluta.

Gracias por apoyarme a cumplir una meta más en mi vida,
por respaldar mis decisiones, por sus consejos y sus
palabras de aliento.

Ustedes son el motor que me impulsa a llegar cada vez
más lejos.

A Miguel Ángel

Por tu apoyo y tu confianza...
Gracias por creer en mí.

Agradecimientos

A mi tutor M.I. José Alfredo González Verdugo por su valiosa asesoría, su apoyo y su confianza depositada en mí.

A mi comité tutorial por todas sus recomendaciones y su tiempo:

Dra. María Joselina Clemencia Espinoza Ayala

M.C. Gilberto Salgado Maldonado

M.I. Xóchitl Peñaloza Rueda

M.I. Juan Antonio López Orozco

Toda mi gratitud y respeto al:

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Por su apoyo durante la realización de esta tesis y haberme dado la oportunidad de cumplir mis metas profesionales.

A mis amigos Isaí, Daniela, Tania, Jon, Josué, Javier y Juan Carlos gracias por su amistad y por tantos momentos juntos.

Al equipo del Enzo Levi: Don Toño, Diana, Castro, Dra. Edith, Ángel y Ceci por siempre brindarme su apoyo.

A mis maestros, al equipo de la subordinación de posgrado, a mis compañeros y a todos los que me han apoyado en esta etapa de mi vida.

¡Muchas GRACIAS a todos!

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1 Objetivo de la investigación	3
II. ESTADO DEL ARTE	4
II.1 Los puentes	4
II.1.1 Principales elementos	5
II.1.2 Problemas hidráulicos.....	6
II.2 Sólidos flotantes	11
II.2.1 Origen e incorporación a los ríos.....	12
II.2.2 Transporte	15
II.2.3 Acumulación.....	18
II.2.3.1 Acumulación en una pila	21
II.2.3.2 Acumulación entre pilas de puente.....	23
II.2.4 Longitud del tronco de diseño	25
II.2.5 Efectos de la acumulación de material leñoso.....	26
II.3 Campo de flujo	27
II.3.1 Campo de flujo alrededor de la pila.....	27
II.3.2 Campo de flujo en presencia de acumulación de material leñoso.....	29
II.4 Estudios experimentales	31
II.4.1 Efectos de los escombros en la socavación de pilas de puente	31
II.4.2 Evolución temporal de la socavación en pilas de puente: Efecto de la rugosidad y la porosidad de la acumulación de madera	34
II.4.3 Estudio experimental para caracterización de efectos del arrastre de sólidos sobre estructuras de cruce en ríos de zonas urbanas.....	37
II.4.4 Conclusiones.....	40

Estudio experimental para caracterización de efectos del arrastre de sólidos sobre estructuras de cruce en ríos de zonas urbanas. Peñaloza Rueda et al., (2015).....	41
--	----

III. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL Y

METODOLOGÍA 42

III.1 Configuración y diseño experimental	42
III.1.1 Instalaciones.....	42
III.1.2 Sistema de bombas.....	44
III.1.3 Medidor de flujo electromagnético.....	45
III.1.4 Pilas.....	45
III.1.5 Escala	46
III.1.6 Condiciones de flujo	47
III.1.7 Geometrías de acumulación de material leñoso	47
III.1.8 Material leñoso	50
III.1.9 Velocímetro Acústico Doppler (ADV).....	52
III.1.9.1 Características principales	52
III.1.9.2 Configuración del ADV.....	55
III.2 Metodología.....	57

IV. PRUEBAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS 61

IV.1 Descripción de las pruebas	62
IV.1.1 Condición de flujo $Fr=0.40$	62
IV.1.1.1 Escenario PC-CPN_01.....	62
IV.1.1.2 Escenario SC-CPN_01.....	66
IV.1.1.3 Escenario TC-CPN_01	71
IV.1.2 Condición de flujo $Fr=0.10$	82
IV.1.2.1 Escenario PC-CPN_02.....	82
IV.1.2.2 Escenario SC-CPN_02.....	86
IV.1.2.3 Escenario TC-CPN_02	90

IV.2	Perfiles de velocidad sección vertical	98
IV.2.1	Perfiles de velocidad condición de flujo CPN_01	101
IV.2.2	Perfiles de velocidad condición de flujo CPN_02	105
IV.2.3	Conclusiones	109
IV.3	Análisis de vorticidad (Curl)	110
IV.4	Relación de bloqueo	115
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	118
V.1	Conclusiones.....	118
V.2	Recomendaciones	120
	REFERENCIAS	121
	ANEXOS	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Puente ferroviario de Exwick. Fuente: (Hamill, 1999).....	4
Figura 2. Elementos que forman la subestructura y superestructura de un puente. Fuente: (Reinoso Angulo, Rodríguez Rodríguez, & Betancourt Ribotta, 2000).	5
Figura 3. Estadística en fallas de puentes. Fuente: Elaboración a partir de Smith (1976, 1977).	7
Figura 4. Socavación en la cimentación. Fuente: (Aguado Sandoval, 2012).	9
Figura 5. Exposición de la cimentación. Fuente: (Aguado Sandoval, 2012).....	9
Figura 6. Cauce antes de la llegada del huracán Stan. Fuente: (Aguado Sandoval, 2012).	9
Figura 7. Cauce después del paso del huracán Stan. Fuente: (Aguado Sandoval, 2012). .	9
Figura 8. Colapso del puente. Fuente: (Barboza Sosa & Avila Perez, 2009).	10
Figura 9. Colapso del puente. Fuente: (Muñoz Sánchez, 2009).	10
Figura 10. Separación de la superficie de rodamiento. Fuente: (Del Refugio Torrentera, 2010).	10
Figura 11. Separación de la superficie de rodamiento. Fuente: (Del Refugio Torrentera, 2010).	10
Figura 12. Falla en pila de apoyo. Fuente: (Morquecho, 2009).....	10
Figura 13. Falla en pila de apoyo. Fuente: (Morquecho, 2009).....	10
Figura 14. (A) Restos de raíces y ramas; (B) Árbol completo; (C) Restos de material leñoso; (D) Acumulación de varios ramas y troncos. Fuente: (Ruiz Villanueva et al., 2015).	11
Figura 15. Representación esquemática de tres procesos de incorporación de madera al cauce. Fuente: (Ruiz Villanueva & Díez Herro, 2012).....	13
Figura 16. Los esquemas (A) y (B) muestran la probabilidad de que un árbol sea incorporado como material leñoso en el río desde las laderas o desde el corredor fluvial. Fuente: (Ruiz Villanueva & Díez Herro, 2012).....	14
Figura 17. Regímenes de transporte de una pieza de material leñoso en función de su densidad y del tirante: A, B, D: rodadura o arrastre por el fondo; C: flotación. $D_w =$	

diámetro, h = profundidad, y_w = nivel sumergido A_{sub} = área sumergida. Fuente: (Ruiz Villanueva & Díez Herro, 2012).....	16
Figura 18. Régimen de transporte de madera (A) No congestionado, (B) Congestionado y (C) Semi congestionado. Las figuras de la izquierda son la posición en un tiempo inicial (t_0) y en las figuras de la derecha son los mismos troncos en un tiempo posterior (t_1). Fuente: (Braudrick et al., 1997).	17
Figura 19. Acumulación de material en un puente. Fuente: (Conservation Department of Environmental, s.f.).....	18
Figura 20. (A) Acumulación en una sola pila, (B) Acumulación entre claros. Fuente: (Lagasse et al., 2010).	21
Figura 21. Acumulación en una pila. Fuente: (Peñaloza Rueda, González Verdugo, & Espinoza Ayala, 2015).	21
Figura 22. Ancho de las acumulaciones de material leñoso en una sola pila en sitios potenciales de socavación en (A) Indiana y (B) Tennessee. Fuente: Modificado a partir de Diehl, (1997).	23
Figura 23. Esquema del ancho efectivo entre pilas de puentes. Fuente: Modificado a partir de Lagasse et al., (2010).....	24
Figura 24. Ancho efectivo de las acumulaciones de material leñoso en el Pacífico Noroeste, Estados Unidos. Fuente: Modificado a partir de Lagasse et al., (2010).	25
Figura 25. Esquema de la longitud del tronco de diseño. Fuente: Modificado a partir de Lagasse et al., (2010).	26
Figura 26. Puente Pellegrini colapsado en Gualeguay, Argentina. Fuente (El Día, 2013)	27
Figura 27. Campo de flujo alrededor de un pilar circular. Fuente: (Gunt Hamburg, 2017).	28
Figura 28. Perfil de velocidades y de presión en una pila circular. Fuente: (Gunt Hamburg, 2017).	29
Figura 29. Campo de flujo idealizado (A) Una sola pila sin material acumulado, (B) Pila con acumulación de material. Fuente: Lagasse et al., (2010).	30
Figura 30. Campo de flujo idealizado en una pila con acumulación triangular. Fuente: Lagasse et al., (2010).	31

Figura 31. Canal de la Universidad de Colorado antes de la instalación de las pilas. Fuente: Lagasse et al., (2010).	32
Figura 32. Configuración del canal, Vista en planta y perfil. Fuente: Modificado a partir de Lagasse et al., (2010).	33
Figura 33. Formas de acumulación (A) Prueba con acumulación triangular, (B) Construcción de acumulación rectangular. Fuente: Lagasse et al., (2010).	33
Figura 34. Canal de pruebas con acumulación de material. (A) Vista desde aguas abajo y (B) Vista lateral. Fuente: (Pagliara & Carnacina, 2010).	35
Figura 35. Acumulaciones de material para las pruebas de rugosidad. (A) Disposición paralela impermeable, (B) Disposición cuasi-paralela impermeable, (C) Acumulación permeable con jaula de metal, (D) Disposición al azar permeable, (E) Acumulación impermeable lisa y (F) Disposición cuasi-paralela permeable. Fuente: (Pagliara & Carnacina, 2010).	36
Figura 36. Canal de pendiente nula en funcionamiento. Fuente: (Peñaloza Rueda et al., 2015).	38
Figura 37. Canal de pendiente variable. Fuente: (Peñaloza Rueda et al., 2015).	38
Figura 38. Clasificación de material por tamaños. Fuente: (Peñaloza Rueda et al., 2015).	39
Figura 39. Estructura del canal de pendiente nula.	43
Figura 40. Plano del canal de pendiente nula con vistas en planta y corte. Fuente: Modificado a partir de Peñaloza Rueda et al., (2015).	44
Figura 41. Sistema de bombas.	44
Figura 42. Medidor de flujo electromagnético.	45
Figura 43. Instalación de las pilas en el canal de pendiente nula.	46
Figura 44. Geometría rectangular de acero galvanizado con medidas 0.40x0.20x0.06 metros.	48
Figura 45. Geometría rectangular de escombros y sus variables asociadas. Lagasse et al., (2010).	49
Figura 46. Geometría de acumulación.	50
Figura 47. Acumulación de material leñoso en diferentes ríos. Fuente: (Peñaloza Rueda et al., 2015).	50

Figura 48. Material leñoso clasificado por tamaños con base en $Ltd = 30\text{ cm}$. Fuente: (Peñaloza Rueda et al., 2015).....	51
Figura 49. Perfil de muestreo. Fuente: (Nortek, 2012).	53
Figura 50. Ventana principal del software MIDAS.	53
Figura 51. Configuración general del Vectrino Profiler.	56
Figura 52. Instalación de pilas.	57
Figura 53. Instalación de dispositivo ADV.....	58
Figura 54. Tanque de almacenamiento lleno.	58
Figura 55. Forma de acumulación instalada y flujo circulando.....	59
Figura 56. Mecanismo de inyección de tinte para pruebas con trazador.	59
Figura 57. Condición de flujo sin obstrucciones ni acumulación, en el canal experimental y en un cauce natural.....	62
Figura 58. Pruebas con trazadores escenario PC-CPN_01.	63
Figura 59. Zonas de medición escenario PC-CPN_01.....	64
Figura 60. Dovelas escenario PC-CPN_01.	64
Figura 61. Adquisición de datos de velocidad escenario PC-CPN_01.....	65
Figura 62. Curvas de igual velocidad del escenario PC-CPN_01.....	65
Figura 63. Condición de flujo con pilas en el canal experimental y en un cauce natural.	66
Figura 64. Pruebas con trazadores escenario SC-CPN_01.	67
Figura 65. Zonas de medición escenario SC-CPN_01.....	68
Figura 66. Dovelas escenario SC-CPN_01.	69
Figura 67. Adquisición de datos de velocidad escenario SC-CPN_01.....	69
Figura 68. Curvas de igual velocidad a 0.05 m aguas abajo de las pilas del escenario SC-CPN_01.....	70
Figura 69. Curvas de igual velocidad a 0.10 m aguas abajo de las pilas del escenario SC-CPN_01.....	70
Figura 70. Curvas de igual velocidad a 0.15 m aguas abajo de las pilas del escenario SC-CPN_01.....	71
Figura 71. Condición de flujo con acumulación de material en pilas, en el canal experimental y en un cauce natural.....	72
Figura 72. Pruebas con trazadores escenario TC-CPN_01.	73

Figura 73. Pruebas con trazadores de unisel. Del inciso A al F la prueba se lleva a cabo en el lateral izquierdo, del inciso G al L en el lateral derecho y del inciso M al Q aguas abajo de la acumulación de material.....	76
Figura 74. Zonas de medición escenario TC-CPN_01.....	77
Figura 75. Dovelas escenario TC-CPN_01.....	77
Figura 76. Adquisición de datos de velocidad escenario TC-CPN_01.....	78
Figura 77. Curvas de igual velocidad a 0.05 m aguas abajo de las pilas del escenario TC-CPN_01.....	78
Figura 78. Curvas de igual velocidad a 0.10 m aguas abajo de las pilas del escenario TC-CPN_01.....	79
Figura 79. Curvas de igual velocidad a 0.15 m aguas abajo de las pilas del escenario TC-CPN_01.....	79
Figura 80. Curvas de igual velocidad a 0.15 m aguas arriba de la acumulación de material del escenario TC-CPN_01.....	80
Figura 81. Curvas de igual velocidad a 0.10 m aguas arriba de la acumulación de material del escenario TC-CPN_01.....	81
Figura 82. Curvas de igual velocidad a 0.05 m aguas arriba de la acumulación de material del escenario TC-CPN_01.....	81
Figura 83. Condición de flujo sin obstrucciones ni acumulación, en el canal experimental y en un cauce natural.....	83
Figura 84. Pruebas con trazadores escenario PC-CPN_02.	83
Figura 85. Zonas de medición escenario PC-CPN_02.....	84
Figura 86. Dovelas escenario PC-CPN_02.	84
Figura 87. Adquisición de datos de velocidad escenario PC-PCN_02.	85
Figura 88. Curvas de igual velocidad del escenario PC-CPN_02.....	85
Figura 89. Condición de flujo con pilas en el canal experimental y en un cauce natural.	86
Figura 90. Pruebas con trazadores escenario SC-CPN_02.	86
Figura 91. Visualización del flujo alrededor de la pila y el vórtice estela.	87
Figura 92. Zonas de medición escenario SC-CPN_02.....	88
Figura 93. Dovelas escenario SC-CPN_02.	88

Figura 94. Curvas de igual velocidad a 0.05 m aguas abajo de las pilas del escenario SC-CPN_02.....	89
Figura 95. Curvas de igual velocidad a 0.10 m aguas abajo de las pilas del escenario SC-CPN_02.....	89
Figura 96. Curvas de igual velocidad a 0.15 m aguas abajo de las pilas del escenario SC-CPN_02.....	90
Figura 97. Condición de flujo con acumulación de material en pilas, en el canal experimental y en un cauce natural.....	91
Figura 98. Pruebas con trazadores escenario TC-CPN_02.....	92
Figura 99. Zonas de medición escenario TC-CPN_02.....	93
Figura 100. Dovelas escenario TC-CPN_02.....	94
Figura 101. Curvas de igual velocidad a 0.05 m aguas abajo de las pilas del escenario TC-CPN_02.....	94
Figura 102. Curvas de igual velocidad a 0.10 m aguas abajo de las pilas del escenario TC-CPN_02.....	95
Figura 103. Curvas de igual velocidad a 0.15 m aguas abajo de las pilas del escenario TC-CPN_02.....	95
Figura 104. Curvas de igual velocidad a 0.15 m aguas arriba de la acumulación de material del escenario TC-CPN_02.....	96
Figura 105. Curvas de igual velocidad a 0.10 m aguas arriba de la acumulación de material del escenario TC-CPN_02.....	97
Figura 106. Curvas de igual velocidad a 0.05 m aguas arriba de la acumulación de material del escenario TC-CPN_02.....	97
Figura 107. Distribución de velocidades en un canal rectangular. Fuente: (Chow, 1994).	98
Figura 108. Ejemplo de perfiles de velocidad. A) Primer escenario, B) Segundo escenario con pilas y C) Tercer escenario con pilas y acumulación de material leñoso.....	100
Figura 109. Descripción del esquema de perfiles de velocidad.....	101
Figura 110. Perfiles de velocidad de la condición de flujo CPN_01.....	104
Figura 111. Perfiles de velocidad de la condición de flujo CPN_02.....	108
Figura 112. Diagrama de definición para el cálculo de rotación de un elemento fluido. Fuente: (Daily & Harleman, 1975)	110

Figura 113. Mallado (A) condición de flujo CPN_01 y (B) condición de flujo CPN_02.	113
Figura 114. Intensidad del vorticidad (A) condición de flujo CPN_01 y (B) condición de flujo CPN_02.	114
Figura 115. Grafica de relación número Froude y V_w/V_i , para una $\Delta A = 19.6$	117
Figura 116. Medidas de mitigación estructurales.	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Causas de falla de los puentes. Fuente (Hamill, 1999).	6
Tabla 2. Casos de socavación en puentes de México. Fuente: (Aguado Sandoval, 2012).8	
Tabla 3. Clasificación del material leñoso. Fuente: (Manners, Doyle, & Small, 2007). .12	
Tabla 4. Tipología básica de acumulación de residuos de material leñoso. Fuente: (Abbe & Montgomery, 2002).	19
Tabla 5. Dimensiones de los desechos en campo y en laboratorio. Fuente: Lagasse et al., (2010).	34
Tabla 6. Síntesis de los estudios experimentales.	40
Tabla 7. Características hidráulicas de las pruebas en laboratorio.....	47
Tabla 8. Dimensiones de las geometrías de acumulación rectangular.....	49
Tabla 9. Caracterización del material leñoso. Fuente: (Peñaloza Rueda et al., 2015).	51
Tabla 10. Volúmenes de modelación para laboratorio.....	52
Tabla 11. Condiciones de flujo simuladas en laboratorio.	61
Tabla 12. Escenarios de análisis para el caso CPN_01.....	62
Tabla 13. Escenarios de análisis para el caso CPN_02.....	82

NOMENCLATURA

$t_d, H =$	Altura de la acumulación de material leñoso
$d_d, W =$	Ancho de la acumulación de material leñoso
$A_c, b =$	Ancho de plantilla
$A =$	Área hidráulica
$A_w =$	Área sin material acumulado
$A_{sub} =$	Área sumergida del tronco
$D_w =$	Diámetro de la madera
$D, a =$	Diámetro de la pila
$Le =$	Escala de longitudes
$Q =$	Gasto
$L =$	Largo de la acumulación de material leñoso
$Lm =$	Longitud del modelo
$Lp =$	Longitud del prototipo
$L_{td} =$	Longitud del tronco de diseño
$y_w =$	Nivel sumergido del tronco
$Fr =$	Número de Froude
$d, h =$	Profundidad del agua
$\Delta A =$	Relación de bloqueo
$LWD =$	Restos largos de madera

$MWD =$	Restos medianos de madera
$SWD =$	Restos pequeños de madera
$S_p =$	Separación entre pilas
$t =$	Tiempo
$t_0 =$	Tiempo inicial
$t_1 =$	Tiempo posterior
$V =$	Velocidad
$V_i =$	Velocidad inicial del cauce
$V_e =$	Velocidad máxima con estructuras
$V_w =$	Velocidad máxima con material leñoso
$Vol =$	Volumen

RESUMEN

El arrastre de material leñoso en cauces y su acumulación en pilas de puentes es un tema que se ha venido estudiando en los últimos años, se han llevado a cabo diversos estudios acerca de los efectos que estos sólidos flotantes tienen en la dinámica fluvial del río. La mayoría de estos estudios se han centrado en cómo estas acumulaciones afectan al proceso de socavación local en pilas concluyendo que la socavación incrementa cuando existe acumulación de material, pero han dejado de lado el análisis del comportamiento del flujo en presencia de estas estructuras.

Por lo cual este trabajo de investigación está centrado en comprender y analizar las modificaciones que sufre la estructura del flujo bajo las siguientes condiciones: se llevaron a cabo pruebas de laboratorio con dos condiciones de flujo diferentes (una con un número de Froude de 0.40 y otra de 0.10) en cada una se analizaron tres escenarios (el primero sin obstáculos, el segundo con pilas y el tercero con pilas y acumulación de material leñoso) en cada escenario se llevaron a cabo pruebas con trazadores a fin de identificar la trayectoria de las líneas de traza y conocer su comportamiento además se realizaron mediciones de la velocidad en cada uno de los escenarios a fin de comparar los cambios que se generan por la acumulación de material leñoso, a partir de esta información se generaron las curvas de igual velocidad y los perfiles de velocidad con el fin de ilustrar de manera gráfica los resultados.

Los resultados obtenidos del desarrollo de las pruebas experimentales muestran modificaciones en los perfiles de velocidad en los escenarios con pilas y pilas con acumulación de material leñoso comparándolos con un escenario sin obstáculos y aumentos y descensos en la magnitud de velocidad que se muestran en las curvas de igual velocidad.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Desde el inicio de los tiempos el ser humano ha tenido una necesidad constante de trasladarse de un lugar a otro, con el paso del tiempo y gracias a los avances en la tecnología el hombre pudo construir medios de transporte más rápidos y seguros, estos a su vez requerían la infraestructura necesaria para su movimiento. Los cauces de los ríos y barrancas se convirtieron en un obstáculo que el hombre pudo sortear gracias a la construcción de puentes. Se sabe que el objetivo principal de un puente es la conexión rápida y funcional de dos espacios divididos entre sí, sin embargo, los ríos no siempre permiten que este objetivo se cumpla. En el campo de la ingeniería hidráulica, el tema de la hidráulica fluvial y sus problemas asociados, como el transporte de sedimentos, las inundaciones, la deformación del cauce, la socavación y el transporte y acumulación de material leñoso se consideran como los principales enemigos de los puentes.

Los ríos están sujetos a continuos cambios en su geometría debido a los procesos de transporte y depósito de sedimento como resultado de la acción erosiva del agua al remover y acarrear el material del fondo, presentándose una mayor alteración en el río cuando se construyen puentes dentro del cauce. De estas cuestiones, la dinámica fluvial en el sitio del puente es un área de interés para los ingenieros hidráulicos.

La causa más común de falla de los puentes se debe a la socavación en la base de las pilas y estribos y aunque es un proceso natural en los ríos este puede verse potenciado por precipitaciones intensas que generan fuertes avenidas provocando que la socavación en la base aumente afectando a los apoyos del puente, es decir, las pilas, los estribos y la cimentación, pudiendo tratarse de un daño pequeño y reparable o incluso de daños completos a toda la estructura.

Los fenómenos hidrometeorológicos sobre todo precipitaciones intensas y huracanes pueden causar grandes inundaciones, esto afecta en gran medida a los puentes, ya que los cauces funcionan como medio de transporte de estas grandes cantidades de agua arrastrando enormes cantidades de sedimentos y sólidos flotantes que se pueden depositar alrededor de las pilas del puente. La acumulación de este material puede modificar sustancialmente el proceso de socavación, incrementando la profundidad de socavación al pie de las pilas, y disminuyendo la seguridad de las estructuras de cruce.

Se han hecho diversos estudios sobre la acumulación de sólidos flotantes y como estos influyen en proceso de socavación local, sin embargo, no se ha analizado a detalle el comportamiento del flujo en presencia del material acumulado. Por lo que este trabajo de investigación consistió en: estudiar los cambios que presenta el flujo en su estructura por efecto de las pilas y la acumulación de material en ellas con pruebas de trazador y adquisición de datos de velocidad para su análisis; lo cual va a servir para comprender mejor las modificaciones en el patrón de flujo por efecto de estas estructuras y como soporte en el desarrollo de futuros trabajos de investigación.

En el primer capítulo de este trabajo se presenta la introducción al tema de investigación y sus objetivos principales.

En el segundo capítulo se describen de manera general los elementos que servirán para estudiar el cambio en el patrón de flujo; los puentes, el material leñoso su origen e incorporación al cauce, su transporte, acumulación y sus efectos adversos. Así mismo se hace un análisis del campo de flujo alrededor de las pilas y con material acumulado para conocer su comportamiento. Y se presentan estudios realizados en modelos físicos en los cuales se ha observado el efecto de los escombros en el proceso de socavación, si bien este trabajo no trata del estudio del fenómeno de la socavación si analiza el flujo que lo provoca.

El tercer capítulo explica la configuración experimental y la metodología a usar, se describen las instalaciones del modelo físico, la escala, las características de las pilas y formas de acumulación de material, las condiciones hidráulicas del experimento y los dispositivos que se utilizan para la adquisición de datos.

El cuarto capítulo se detallan los experimentos que se llevaron a cabo, las zonas de medición, el análisis de los resultados y sus graficas correspondientes.

Finalmente se hacen las conclusiones de los resultados obtenidos y las recomendaciones finales.

I.1 Objetivo de la investigación

El objetivo principal de este estudio es llevar a cabo una investigación experimental en un modelo físico sobre el patrón de flujo y sus cambios ante la presencia de pilas de puente y acumulación de material leñoso.

Para alcanzar este objetivo se llevarán a cabo las siguientes acciones:

- Identificar los cambios en las líneas de traza a través de pruebas con trazadores.
- Analizar la variación de las velocidades de flujo en presencia de estructuras y acumulación de sólidos flotantes.
- Análisis de la intensidad de vorticidad ante la presencia de acumulación de material leñoso.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

Este capítulo proporciona una descripción de los elementos que interaccionan dentro del fenómeno de la acumulación de material leñoso en pilas de puente e incluye una revisión de estudios llevados a cabo por diferentes investigadores que servirá de apoyo en el desarrollo de este trabajo.

II.1 Los puentes

Las oportunidades de interacción y cruce entre las redes de infraestructura y la red hidrográfica son numerosas. Diversas infraestructuras de transporte (autopista, carretera y ferrocarril) han de cruzar los cursos de agua por medio de puentes (ver Figura 1). Dentro del conjunto de infraestructura, los puentes son obras singulares, costosas y vitales para mantener el transporte. A menudo es el punto estratégico de una vía de comunicación (Martin Vide, 2003).



Figura 1. Puente ferroviario de Exwick. Fuente: (Hamill, 1999).

Los puentes son susceptibles de ser afectados por sismos, la acción del viento y en el caso de que se encuentren construidos sobre corrientes de agua será el fenómeno de la socavación el principal problema (Muñoz Visuet, 2000).

II.1.1 Principales elementos

La estructura de un puente está compuesta fundamentalmente por dos partes: subestructura y superestructura (ver Figura 2).

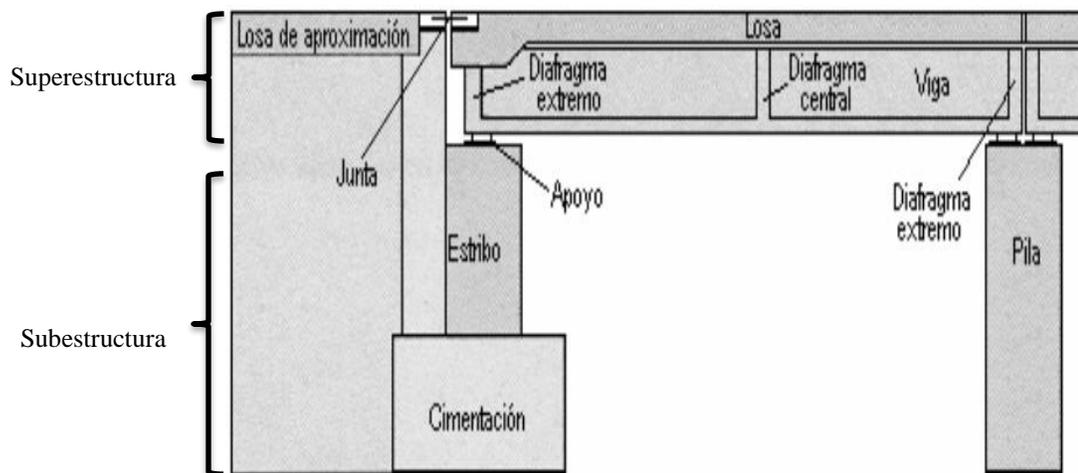


Figura 2. Elementos que forman la subestructura y superestructura de un puente. Fuente: (Reinoso Angulo, Rodríguez Rodríguez, & Betancourt Ribotta, 2000).

La superestructura comprende todos los elementos que se encuentran por encima de los elementos de soporte:

- Superficie de rodamiento sobre la cual circulan los vehículos. Puede ser de asfalto o de concreto.
- Losa cuya función principal es distribuir las cargas transversal y longitudinalmente en toda la extensión del puente.
- Vigas son los miembros principales del puente y se diseñan para resistir el trabajo a flexión.

La subestructura está formada por todos los elementos que requiere la superestructura para sustentarse, como son apoyos, columnas, pilas, estribos y cabezales. Su función es la de transmitir eficientemente las cargas de la superestructura a la cimentación (Reinoso Angulo *et al.*, 2000).

II.1.2 Problemas hidráulicos

Los ríos son sistemas naturales altamente dinámicos y complejos, existe una serie de factores que intervienen en ellos, tales como: la orografía que influye en la longitud, la pendiente, la velocidad de las aguas del río y en su capacidad erosiva, el clima que determina la temperatura de la zona y el nivel de precipitaciones, la vegetación de la zona cercana al cauce y el ser humano que hace uso del agua para su abastecimiento. Al ser afectados directamente por una gran cantidad de variables los problemas que pueden presentarse aumentan en cantidad y en variedad.

Smith (1976 y 1977) estudio las fallas de 143 puentes que ocurrieron en todo el mundo entre 1847 y 1975. Agrupo las causas que provocaron la falla en nueve categorías como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Causas de falla de los puentes. Fuente (Hamill, 1999).

Causa de falla	Número de fallas
Corrosión	1
Fatiga de materiales	4
Viento	4
Diseños inadecuados	5
Sismos	11
Mal procedimiento constructivo	12
Sobrecargas y choques de embarcaciones	14
Materiales defectuosos	22
Socavación por tránsito de avenidas	70
Número total de fallas	143

La información presentada en la Tabla 1, se presenta a continuación de manera estadística (ver Figura 3).

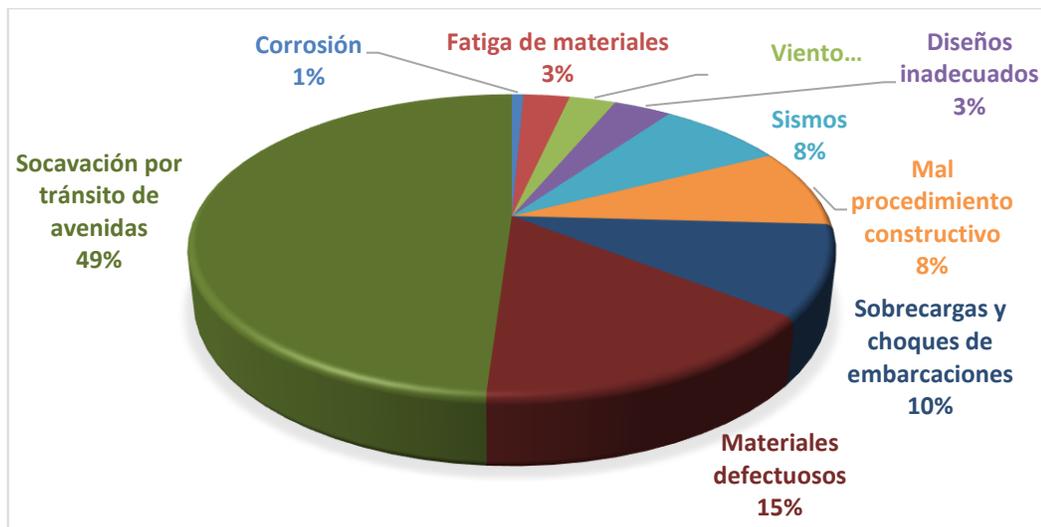


Figura 3. Estadística en fallas de puentes. Fuente: Elaboración a partir de Smith (1976, 1977).

De la información anterior se desprende que el 49% de los puentes fallaron por el tránsito de avenidas. Esto demuestra que los aspectos hidráulicos son fundamentales en los puentes fluviales: un buen conocimiento de estos aspectos hará el puente más seguro. También se entiende que lo que se ha avanzado en el conocimiento de las estructuras, las cargas, los materiales y los procedimientos de construcción es mucho más que lo conocido sobre las acciones del agua (Martin Vide, 2003).

White, Minor, & Derucher, (1992) comentaron sobre las fallas de los puentes en E.U.A., y observaron que la causa más común fue el tránsito de avenidas y otras acciones del agua. Mas específicamente, se identificaron dos factores: uno fue la socavación y el segundo fue la acumulación de escombros contra la estructura. A veces estos dos factores pueden estar interrelacionados. De los dos, el daño causado por la socavación del material del fondo alrededor de las cimentaciones tiende a ser el más frecuente.

Un estudio realizado en 1973 mostró que de 383 fallas en puentes causadas por inundaciones catastróficas, el 25% causó daños en el estribo y el 72% causó daños en la pila. Un estudio más extenso en 1978 demostró que la socavación en los estribos del puente era tan importante como la socavación en los pilares. En 1985, en Pensilvania, Virginia y Virginia Occidental, 73 puentes fueron destruidos por las inundaciones,

incluyendo la socavación. Durante las inundaciones en la primavera de 1987, 17 puentes en Nueva York y Nueva Inglaterra fueron dañados o destruidos por la socavación (Hamill, 1999).

México no es la excepción a estos problemas, pero sus estudios referentes a la socavación de sus puentes son pocos o nulos. Por esto, conocer la información de su estado actual o su vulnerabilidad a la socavación es difícil de conseguir.

Pese a que el estudio de Smith fue realizado entre 1976 y 1977, en el que se puede aseverar que la principal causa en la falla de los puentes se atribuye al tránsito de avenidas, hoy en día esta situación no se aleja mucho de la realidad, si se toma en consideración que en el sureste de la República Mexicana varios puentes han colapsado debido a fenómenos hidrometeorológicos extremos como el huracán Stan en 2005 o las depresiones tropicales del 2007 que afectaron a los puentes de los estados de Veracruz, Tabasco y Chiapas (Martínez Mejía, 2009), en la Tabla 2 se presentan algunos casos de puentes en México que fallaron o que sufrieron algún daño en su estructura y en las Figuras 4 – 13 se aprecian los daños ocasionados por el tránsito de avenidas.

Tabla 2. Casos de socavación en puentes de México. Fuente: (Aguado Sandoval, 2012).

Puente	Estado	Año del daño	Fenómeno presentado	Tipo de daño
Pijijiapan I	Chiapas	2010	Socavación local en pilas	Desplome que puede provocar un colapso parcial
Coatán	Chiapas	2005	Socavación local en pilas	Asentamiento
Tonalá	Veracruz y Tabasco	2009	Socavación local en pilas	Colapso total

Puente	Estado	Año del daño	Fenómeno presentado	Tipo de daño
Macuilxóchitl	Oaxaca	2010	Socavación local en los estribos	Asentamiento y derrumbe del estribo, colapso parcial
Nexpa	Morelos	2009	Socavación local en pilas	Asentamiento

Puente Pijjiapan I

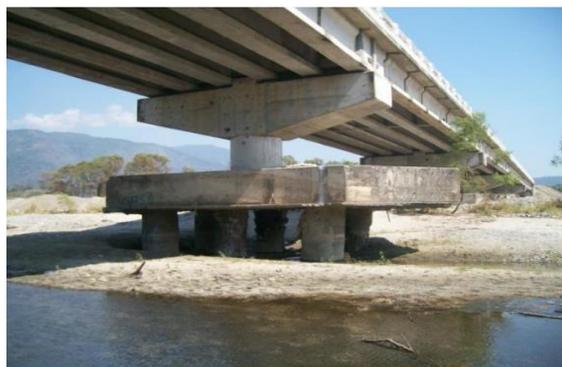


Figura 4. Socavación en la cimentación. Fuente: (Aguado Sandoval, 2012).



Figura 5. Exposición de la cimentación. Fuente: (Aguado Sandoval, 2012).

Puente y río Coatán



Figura 6. Cauce antes de la llegada del huracán Stan. Fuente: (Aguado Sandoval, 2012).



Figura 7. Cauce después del paso del huracán Stan. Fuente: (Aguado Sandoval, 2012).

Puente Tonalá



Figura 8. Colapso del puente. Fuente: (Barboza Sosa & Avila Perez, 2009).



Figura 9. Colapso del puente. Fuente: (Muñoz Sánchez, 2009).

Puente Macuilxóchitl



Figura 10. Separación de la superficie de rodamiento. Fuente: (Del Refugio Torrentera, 2010).



Figura 11. Separación de la superficie de rodamiento. Fuente: (Del Refugio Torrentera, 2010).

Puente Nexpa



Figura 12. Falla en pila de apoyo. Fuente: (Morquecho, 2009).



Figura 13. Falla en pila de apoyo. Fuente: (Morquecho, 2009).

II.2 Solidos flotantes

Se entiende por “solidos flotantes” o “material leñoso” a toda la vegetación transportada por los ríos como son troncos o árboles completos, ramas y raíces, material leñoso en general, (ver Figura 14) el transporte y depósito de restos de vegetación puede agravar las consecuencias de los eventos de avenida e inundación e incrementar su peligrosidad potencial. Las acumulaciones de material leñoso pueden obstruir, contraer o redirigir el flujo a través de los claros del puente, lo que provoca inundaciones, daños en la estructura o aumento de la socavación en los cimientos de los puentes (Ruiz Villanueva, Díez Herrero, Bodoque, & Blade, 2015).



Figura 14. (A) Restos de raíces y ramas; (B) Árbol completo; (C) Restos de material leñoso; (D) Acumulación de varios ramas y troncos. Fuente: (Ruiz Villanueva *et al.*, 2015).

El tamaño y la forma de las acumulaciones de solidos flotantes varía ampliamente, desde un pequeño grupo de desechos en una pila hasta un bloqueo casi completo entre claros (Zevenbergen, Lagasse, & Clopper, 2007).

Desde un punto de vista geomorfológico, las acumulaciones de material leñoso en el cauce afectan al comportamiento hidrodinámico y a la capacidad de transporte de sedimentos, condicionando por tanto la tipología y distribución de las formas de fondo (Gurnell, Piégay, Swanson, & Gregorys, 2002).

El material leñoso puede clasificarse en referencia con su tamaño según Manners, Doyle, & Small, (2007), como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación del material leñoso. Fuente: (Manners, Doyle, & Small, 2007).

Clasificación	Tamaño
SWD, small woody debris (restos pequeños de madera)	diámetro < 1 cm
MWD, medium woody debris (restos medianos de madera)	1 cm < diámetro < 10 cm
LWD, large woody debris (restos grandes de madera)	diámetro > 10 cm

II.2.1 Origen e incorporación a los ríos

La presencia y el transporte de restos de vegetación en los ríos influyen sobre varios aspectos de la dinámica fluvial (Montgomery & Piégay, 2003). Como se mencionó en el apartado anterior desde un punto de vista geomorfológico, las acumulaciones de material leñoso en el cauce pueden afectar al comportamiento hidráulico y al transporte de sedimentos, condicionando la tipología y distribución de las formas de fondo. Desde un punto de vista ecológico, las grandes acumulaciones de material leñoso pueden generar la formación de pequeños ecosistemas y mejorar las condiciones para el equilibrio de ciertas especies (Gurnell *et al.*, 2002).

Montgomery & Piégay (2003) indican que los efectos geomorfológicos de la madera en arroyos y ríos son altamente variables y se reflejan en las diferencias en tamaño, densidad y forma de la madera que son parcialmente controladas por la disponibilidad de madera,

dependiendo de factores externos que controlan la incorporación de madera, y el carácter del bosque circundante, así como el tamaño, las características y los procesos del arroyo.

Varios mecanismos pueden incorporar material leñoso al río (ver Figura 15), incluyendo movimientos del terreno (deslizamientos, flujos de tierras, etc.), migración o cambios bruscos en el cauce, erosión de los bancos de orilla, otros mecanismos aleatorios como vientos o incendios, o el propio deterioro y descomposición de los árboles de ribera (May & Gresswell, 2003); (Benda & Sias, 2003).



Figura 15. Representación esquemática de tres procesos de incorporación de madera al cauce. Fuente: (Ruiz Villanueva & Díez Herro, 2012).

Los mecanismos de incorporación de madera al cauce relacionados con procesos geomorfológicos repentinos (deslizamientos o avenidas) pueden provocar que en un solo evento lleguen al río gran cantidad de troncos y ramas. Es este tipo el que genera más problemas cuando el material leñoso se pone en movimiento en una inundación. A este tipo de transporte se le denomina `congestionado` del término anglosajón “congested” (Braudrick, Grant, Ishikawa, & Ikeda, 1997).

Para conocer la dinámica de incorporación de carga leñosa es necesario establecer las áreas contribuyentes que pueden aportar el material (ver Figura 16). Además, se requiere un conocimiento detallado de la tipología y distribución de la vegetación. De este modo, es posible estimar el volumen de madera potencialmente disponible. Para ello, son especialmente recomendables los sistemas de información geográfica (SIG). Además, debe ser estimado el volumen de material ya depositado en el cauce y la llanura y que se puede poner en movimiento durante la avenida (Ruiz Villanueva & Díez Herro, 2012).

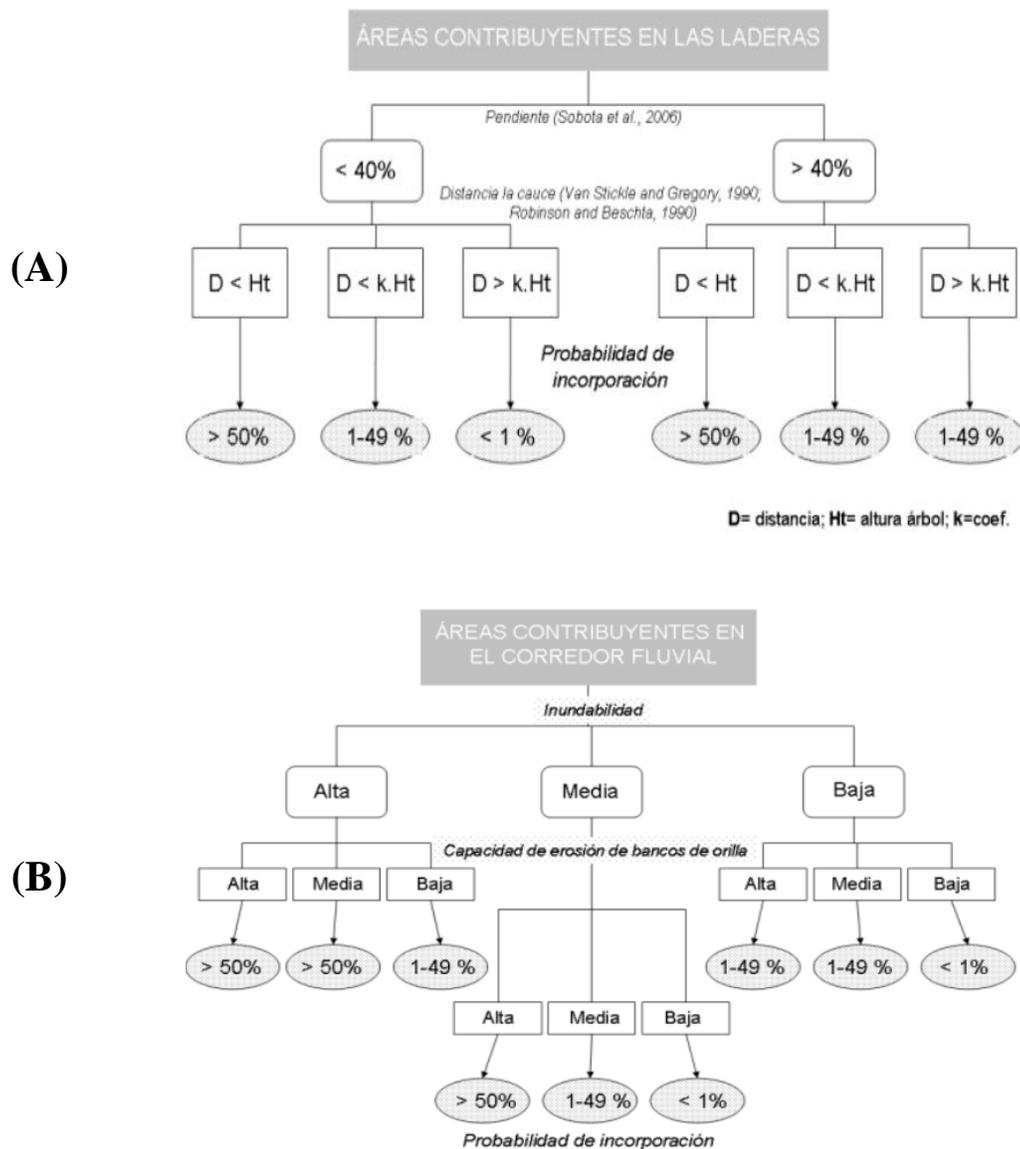


Figura 16. Los esquemas (A) y (B) muestran la probabilidad de que un árbol sea incorporado como material leñoso en el río desde las laderas o desde el corredor fluvial. Fuente: (Ruiz Villanueva & Díez Herro, 2012).

Wallerstein & Thorne (2004) notaron que la acumulación de troncos es el resultado de los siguientes mecanismos:

- 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% presas de castores.

Generalmente, en ríos de mayor orden y baja pendiente, los mecanismos predominantes de incorporación de madera son los procesos de erosión de orillas; mientras que en los ríos de menor orden tienen mayor importancia otros procesos gravitacionales como deslizamientos o flujos de derrubios (Comiti, Andreoli, Mao, & Lenzi, 2007).

II.2.2 Transporte

“La propagación o dinámica y transporte del material leñoso en el río es fundamental para poder entender cómo éste influirá en su morfología” (Ruiz Villanueva *et al*, 2015, p.15).

La física del transporte de la madera es muy diferente de la del sedimento, y muy compleja a causa de las diferencias de forma, densidad, volúmenes movilizados y de los procesos de incorporación del material al cauce (Piégay, Alber, Slater, & Bourdin, 2009).

El transporte de los sólidos flotantes depende de las características físicas de la pieza en relación con el ancho del canal; del diámetro de la pieza en relación con la profundidad del flujo; de la orientación de la pieza dentro del canal y, en menor grado, de la pendiente del canal (Lagasse, Clopper, Zevenbergen, Spitz, & Girard, 2010).

Ruiz Villanueva *et al.*, (2015) define tres tipos de movimiento del material en el río (ver Figura 17).

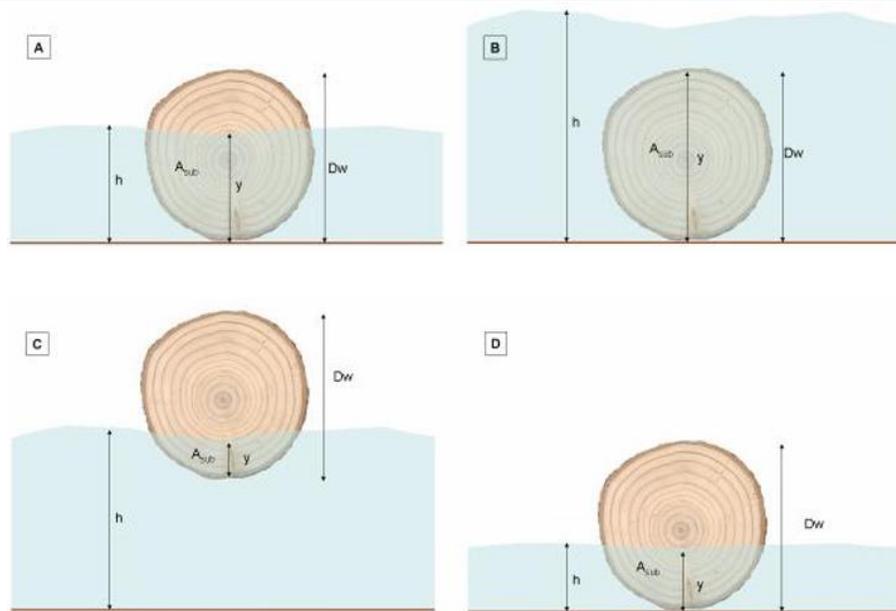


Figura 17. Regímenes de transporte de una pieza de material leñoso en función de su densidad y del tirante: A, B, D: rodadura o arrastre por el fondo; C: flotación. D_w = diámetro, h = profundidad, y_w = nivel sumergido A_{sub} = área sumergida. Fuente: (Ruiz Villanueva & Díez Herro, 2012).

Los mecanismos de transporte se definen a continuación:

1. Por arrastre y/o rodadura en el fondo: el material se desplaza rodando o arrastrándose sobre el lecho empujado por la corriente. Por ejemplo, cuando la densidad de la madera es mayor a la del agua, siendo el tirante mayor al diámetro del tronco; o bien con tirantes menores y densidad de la madera más cercana a la del agua.
2. Por flotación: cuando la densidad de la madera es inferior a la del agua; de tal modo que el empuje es mayor que el peso. También dependiendo de la densidad (aunque siempre siendo inferior a la del agua), el tirante necesario para poner en flotación dependerá de las dimensiones de la pieza. La flotación representa el movimiento más común.
3. Por un movimiento similar a la suspensión: cuando el tirante es mayor al diámetro y la densidad de la madera es bastante alta (cercana a la del agua), la pieza puede trasladarse parcialmente sumergida en el flujo, aunque sin contacto con el lecho.

Braudrick *et al.*, (1997) desarrollaron modelos teóricos de transporte de material leñoso en ríos. Llevaron a cabo experimentos en canales donde se observó que los troncos tienden

a orientarse paralelos al eje del río, determinaron tres formas de transporte de madera distintos: no congestionado, congestionado y semicongestionado (ver Figura 18).

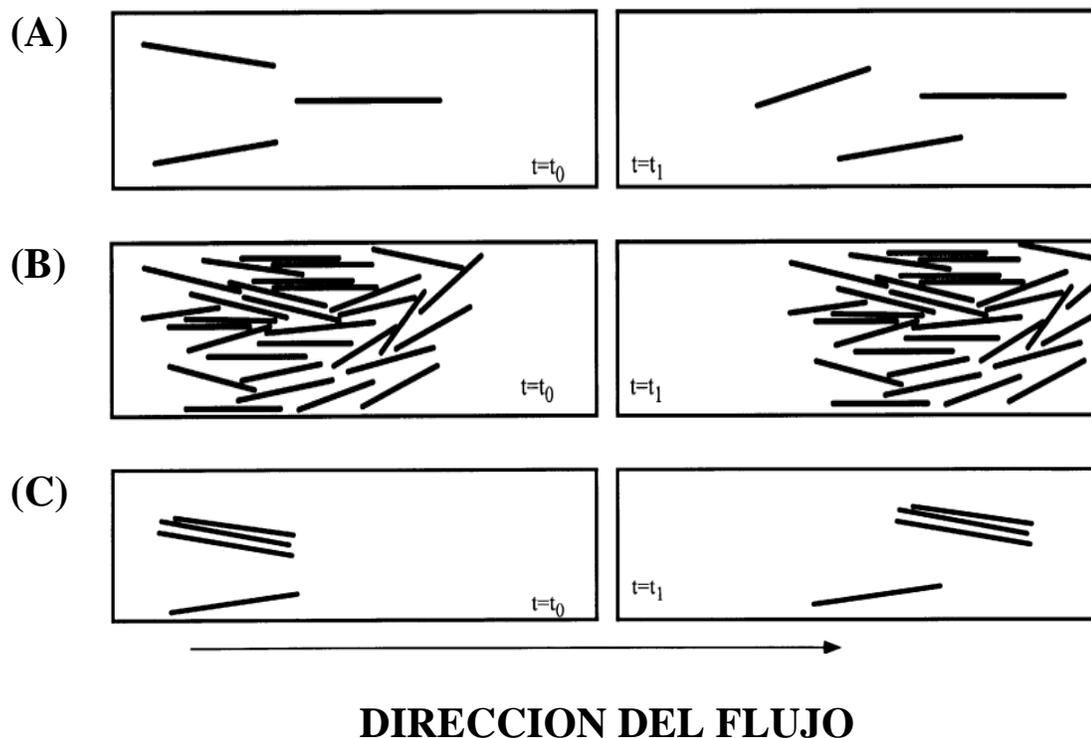


Figura 18. Régimen de transporte de madera (A) No congestionado, (B) Congestionado y (C) Semi congestionado. Las figuras de la izquierda son la posición en un tiempo inicial (t_0) y en las figuras de la derecha son los mismos troncos en un tiempo posterior (t_1). Fuente: (Braudrick *et al.*, 1997).

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 (Braudrick *et al.*, 1997).

Ruiz Villanueva *et al.*, (2015) comentan que la falta de observación directa en campo es la carencia más importante en el análisis de la dinámica del material leñoso. Existen escasos trabajos que aporten datos de campo, por ejemplo, mediante el monitoreo con transmisores (MacVicar B. J. *et al.*, 2009); o los trabajos pioneros de seguimiento del material mediante grabaciones con videocámaras (MacVicar & Piégay, 2012). Esta carencia en observaciones directas ha sido tradicionalmente solventada mediante ensayos de laboratorio (Braudrick & Grant, 2000), (Welber, Bertoldi, & Tubino, 2013), o aplicando

modelos hidráulicos para su análisis (Mazzorana, Hübl, Zischg, & Largiader, 2010), (Merten, y otros, 2010), (Comiti *et al.*, 2012).

II.2.3 Acumulación

La acumulación de LWD (ver Tabla 3. Clasificación de material leñoso) presenta problemas para el flujo a través de los claros de los puentes, lo que podría conducir a mayores riesgos de inundaciones, socavación local e incluso fallas en los puentes (Lyn, Cooper, Yi, Sinha, & Rao, 2003). Las pilas de puente, particularmente las del centro del canal, pueden recoger grandes cantidades de escombros (ver Figura 19).



Figura 19. Acumulación de material en un puente. Fuente: (Conservation Department of Environmental, s.f.).

Esto debe tenerse en cuenta en la fase de diseño, puentes con grandes claros centrales pueden estar libres de problemas, siempre que no haya atascos en toda la abertura. Para pequeños puentes de un solo tramo, el bloqueo puede llegar hasta el 90% de la abertura (Highways Agency, 1994). El peligro es mayor cuando la cuenca sobre el puente contiene una gran área boscosa con raíces poco profundas en pendientes pronunciadas. En el análisis y diseño de puentes fluviales, los escombros son siempre una de las complicaciones no cuantificables. Incluso si el análisis hidráulico se lleva a cabo con atención, la inundación puede ser mucho peor de lo previsto como resultado de los sólidos flotantes (Smith D. , 1976).

Basado en un estudio realizado en la cuenca del río Queets en el estado de Washington, Estados Unidos se determinó que piezas individuales de material leñoso en una acumulación o gran acumulación pueden separarse en “troncos clave”, estancados y sueltos Abbe y Montgomery, (2002) definen tres categorías principales de atascos de desechos de madera (en sitio, transporte y atascos combinados) basados en si los desechos constitutivos se transportaron fluvialmente o no. Los atascos de material en sitio se componen de desechos que han permanecido en su sitio después de la entrada al canal, aunque pueden haber girado o haberse movido en el mismo canal. Los atascos de transporte se componen de desechos que se han desplazado aguas abajo por procesos fluviales. Los atascos combinados están compuestos tanto de troncos clave en sitio como de miembros transportados fluvialmente y sueltos.

Dentro de estas categorías, Abbe y Montgomery, (2002) definen además 10 tipos de acumulación de residuos de madera basados en el modo de reclutamiento y la orientación de los troncos (ver Tabla 4).

Tabla 4. Tipología básica de acumulación de residuos de material leñoso. Fuente: (Abbe & Montgomery, 2002).

Tipos	Características distintivas
En sitio	El miembro clave no se ha movido hacia abajo.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entrada a la orilla 	Algunos o todos los miembros en el cauce.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Troncos 	Etapas de formación del tronco clave en la orilla del río.
Atascos combinados	Miembros en sitio con desechos de madera amontonados.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lecho 	El ancho de la acumulación excede el ancho del río e influye en el fondo del cauce.

Tipos	Características distintivas
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desvió del flujo 	Los troncos clave pueden girar, la acumulación desvía el flujo del río.
Transporte	Los miembros clave se movieron aguas abajo.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inundación/flujo de escombros 	La acumulación de material es caótica.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plataforma 	Troncos forman a lo largo del canal una plataforma de escombros.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Barrera 	Gran acumulación de material leñoso, asociado con el desarrollo de barreras o islas.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Meandro 	Se forma una gran acumulación de material aguas arriba. Normalmente se encuentra a lo largo de la curva del meandro.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Embalse 	Gran acumulación de escombros capaz de tapar incluso cauces muy anchos, causando un importante remanso.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inestable 	Acumulaciones inestables compuestas de restos de barreras u obstáculos preexistentes.

Las acumulaciones en pilas de puentes pueden ser de dos tipos: acumulaciones en una sola pila y claros obstruidos (ver Figura 20). 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, 1997).



Figura 20. (A) Acumulación en una sola pila, (B) Acumulación entre claros. Fuente: (Lagasse *et al.*, 2010).

II.2.3.1 Acumulación en una pila

El material leñoso que se acumula contra una sola pila a menudo contiene uno o más troncos que se extienden por toda la anchura de la acumulación perpendicular al flujo (ver Figura 21).

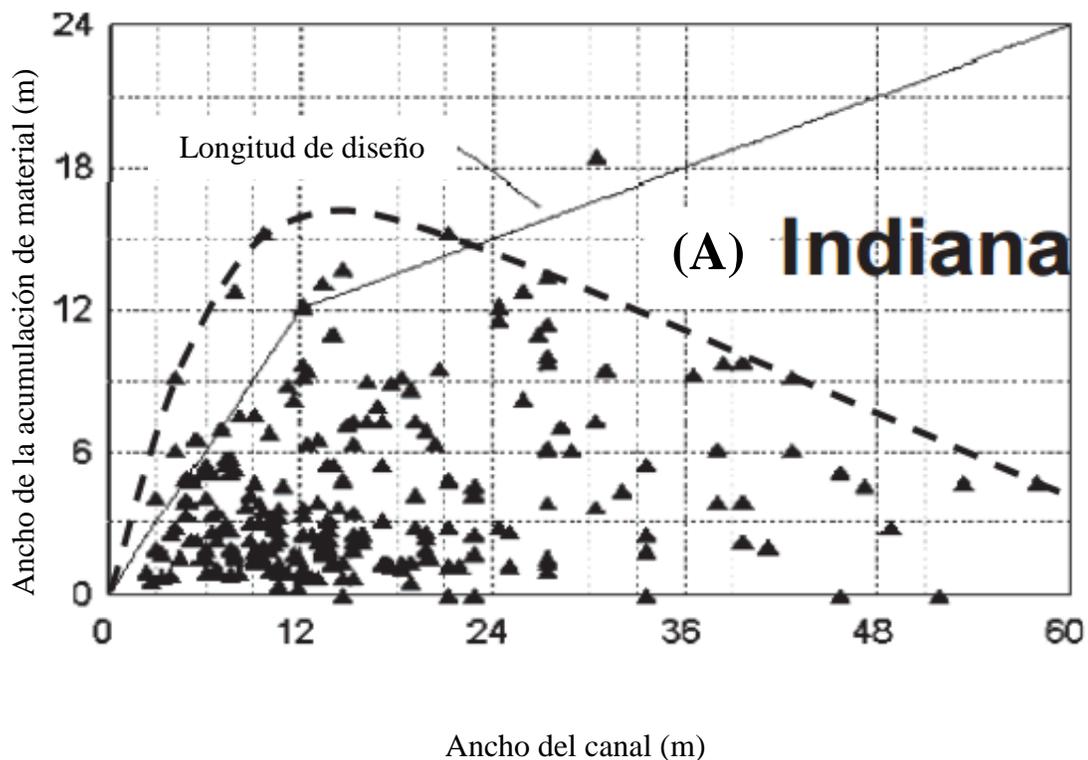


Figura 21. Acumulación en una pila. Fuente: (Peñaloza Rueda, González Verdugo, & Espinoza Ayala, 2015).

Las grandes acumulaciones de material leñoso se mantienen unidas por troncos largos que soportan el atasco contra las fuerzas hidráulicas laterales. Las acumulaciones de una sola pila tienen a menudo un aspecto curvado aguas arriba cuando se ven por encima, y el centro del lado aguas abajo, que descansa contra el muelle, contiene la parte más gruesa de la acumulación (Lagasse *et al.*, 2010).

Los nomogramas realizados por Diehl (1997) del ancho de la acumulación de escombros contra el ancho del canal para los sitios de estudio en Indiana y Tennessee (ver Figura 22) muestran que la mayoría de las acumulaciones de escombros en una sola pila tienen menos de 15 m de ancho.

Los datos también sugieren que los anchos de acumulación de material leñoso disminuyen cuando los anchos del cauce son a mayores de 15 a 18 m, probablemente como resultado del aumento de las fuerzas hidráulicas asociadas a un cauce mayor, que tendría una mayor fuerza para deshacer o impedir las acumulaciones de material.



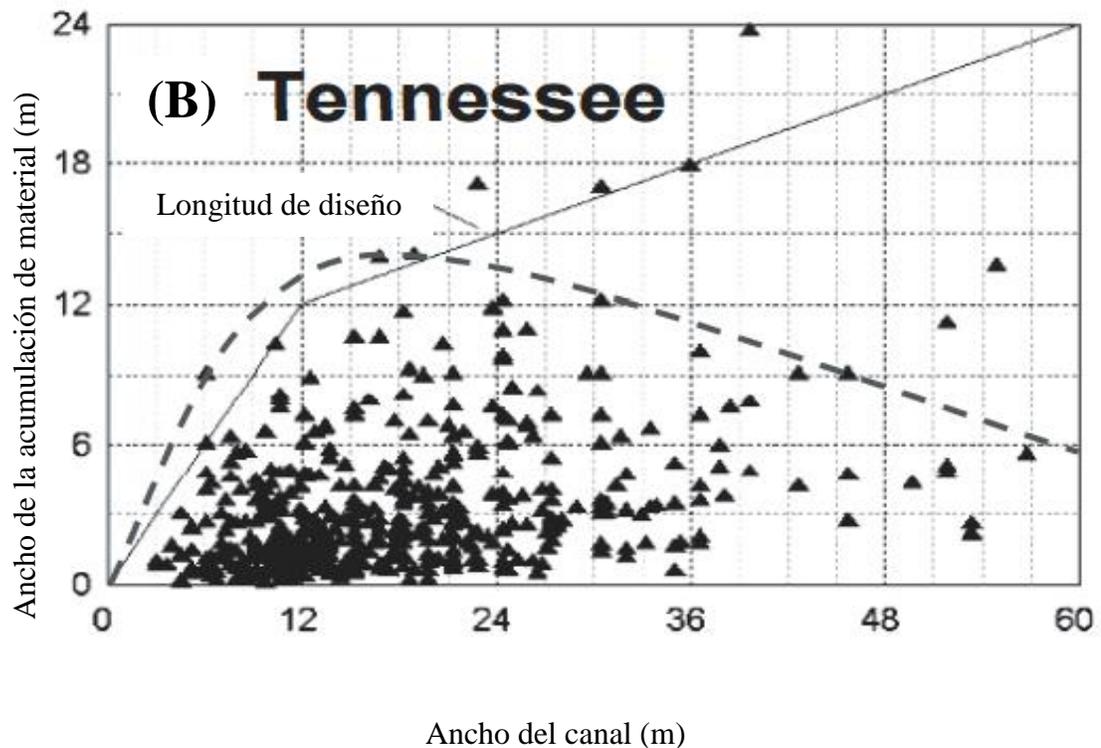


Figura 22. Ancho de las acumulaciones de material leñoso en una sola pila en sitios potenciales de socavación en (A) Indiana y (B) Tennessee. Fuente: Modificado a partir de Diehl, (1997).

II.2.3.2 Acumulación entre pilas de puente

Las acumulaciones de sólidos flotantes entre pilas ocurren de manera típica cuando la longitud de los troncos transportados excede el ancho efectivo de la separación entre pilas, dando como resultado una potencial formación de acumulación. El ancho efectivo entre pilas depende de su emplazamiento e inclinación (ver Figura 23). Pueden ocurrir acumulaciones de escombros cuando los troncos se encuentran acumulados en las pilas adyacentes (Lagasse *et al.*, 2010).

De acuerdo con Diehl (1997), la mayoría de los bloqueos de pila a pila son el resultado de un solo tronco que abarca el tramo. Cuando la distancia entre apoyos es lo suficientemente corta como para ser atravesados por los troncos, es posible que se produzcan varios bloqueos de claros.

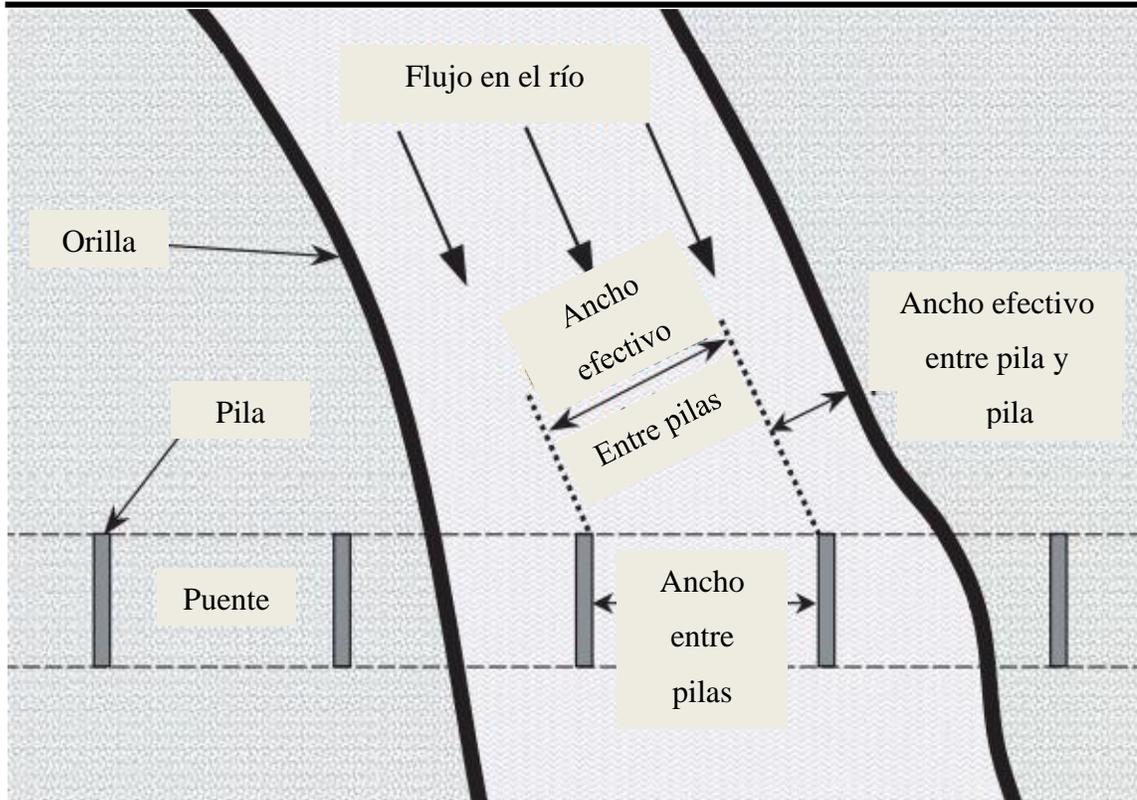


Figura 23. Esquema del ancho efectivo entre pilas de puentes. Fuente: Modificado a partir de Lagasse *et al.*, (2010).

Las investigaciones realizadas por Diehl (1997), indican que la longitud del tronco está estrechamente relacionada con el ancho del canal, es el factor más importante que influye en el ancho de las acumulaciones de escombros en los puentes.

En todos los casos de acumulaciones de troncos atravesadas en puentes, el ancho efectivo de los claros bloqueados era lo suficientemente corto como para ser atravesado por un único tronco. Según datos recopilados (ver Figura 24), se puede observar que los bloqueos de tramos disminuyen significativamente para aperturas mayores a 24 m para áreas fuera del Pacífico Noroeste en los Estados Unidos (Lagasse *et al.*, 2010).

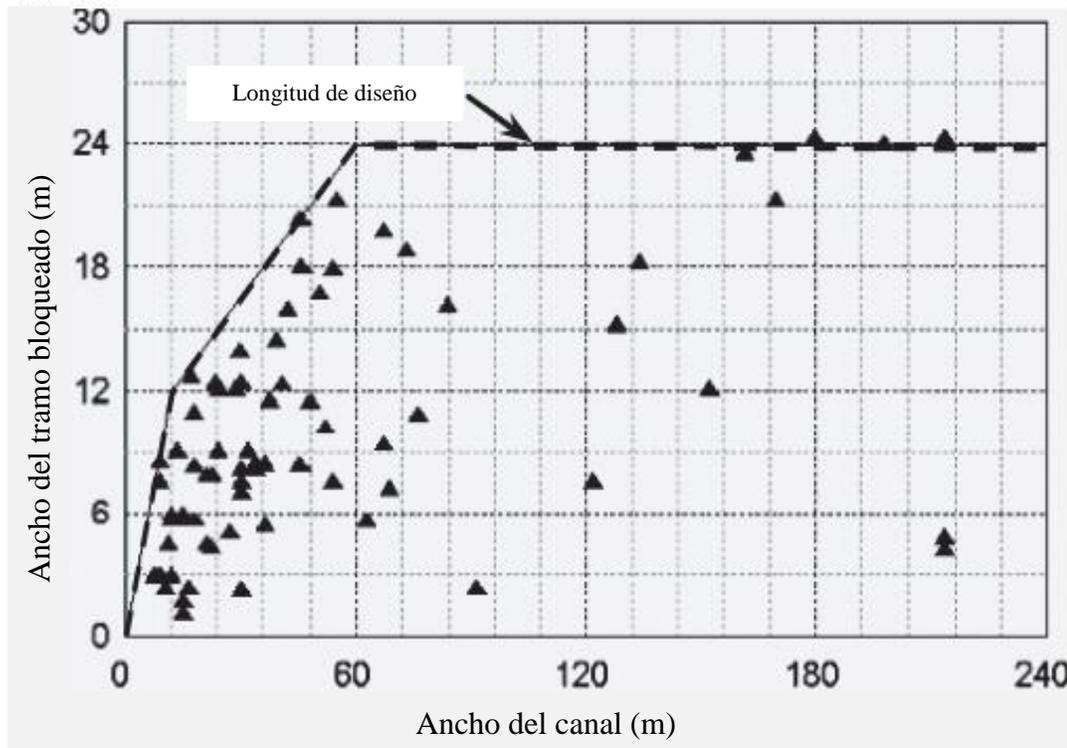


Figura 24. Ancho efectivo de las acumulaciones de material leñoso en el Pacífico Noroeste, Estados Unidos. Fuente: Modificado a partir de Lagasse *et al.*, (2010).

II.2.4 Longitud del tronco de diseño

Debido a que las acumulaciones entre claros se basan en troncos que se extienden más allá del ancho efectivo entre pilas, Diehl (1997) recomienda que la longitud del tronco de diseño (ver Figura 25) que debe utilizarse en el diseño de los puentes se infiera del ancho máximo de las acumulaciones de una sola pila y de los tramos bloqueados más largos al estimar el potencial de acumulación de escombros. Diehl hace énfasis que la longitud del tronco de diseño no representa a la longitud máxima que puede existir en una acumulación de desechos, sino que representa una longitud por encima de la cual los troncos no son lo suficientemente grandes para producir acumulaciones.

En el caso de la región del Pacífico Noroeste en Estados Unidos se recomienda una apertura entre claros de 24 m (como se observa en la Figura 24), y en el caso del Norte de California la apertura puede ser de hasta 45 m (Diehl, 1997).

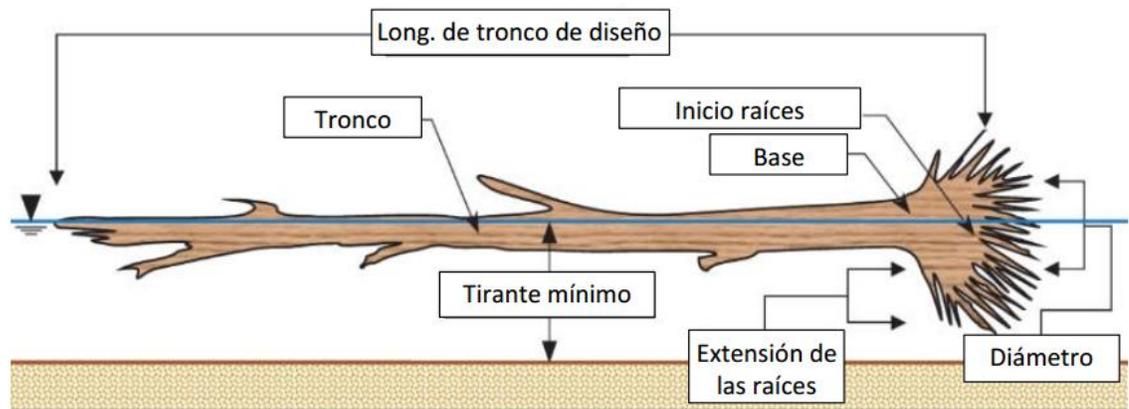


Figura 25. Esquema de la longitud del tronco de diseño. Fuente: Modificado a partir de Lagasse *et al.*, (2010).

II.2.5 Efectos de la acumulación de material leñoso

La cuenca de un río entrega grandes cantidades de troncos y otros escombros al cauce del río (Abbe & Montgomery, 2002), que puede acumularse en las alcantarillas y los cruces de puentes (Bradley, Richards , & Bahner , 2005). La acumulación de material leñoso tiene un efecto crítico en la socavación en pilas y estribos de puentes, que puede tener efectos catastróficos (ver Figura 26). El material acumulado 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 (Peñaloza Rueda *et al.*, 2015).

Aunque se han realizado numerosos y detallados estudios sobre la evolución de la socavación, la profundidad del foso de socavación y el campo de flujo en las pilas; pocos estudios han tratado el efecto de la acumulación de escombros en el proceso de socavación y el campo de flujo alrededor de la pila (Pagliara & Carnacina, 2012).



Figura 26. Puente Pellegrini colapsado en Gualeguay, Argentina. Fuente (El Día, 2013)

II.3 Campo de flujo

La descripción del comportamiento del flujo que pasa por un obstáculo resulta un problema muy complejo, más aún cuando la presencia del obstáculo genera socavación en su base. Cuando se coloca un obstáculo dentro de la corriente, se modifican localmente las condiciones hidráulicas de escurrimiento, y en consecuencia se modifica la capacidad de arrastre de la zona cercana a la obstrucción (Pérez Luna, 2012).

II.3.1 Campo de flujo alrededor de la pila

Las estructuras tales como, pilas de puentes, pueden modificar a largo plazo el fondo del canal de aguas corrientes. Las condiciones de flujo modificadas por la estructura pueden provocar la formación de socavación en el fondo del canal en el entorno directo de la estructura. Se puede producir socavación incluso cuando no existe un transporte de sedimentos en las aguas corrientes. En este caso hablamos de socavación en agua clara (Gunt Hamburg, 2017).

La socavación es un fenómeno natural causado por la acción de la erosión del agua que fluye en los lechos fluviales. La socavación local es la remoción de los sedimentos alrededor de los elementos estructurales que se encuentran en el flujo del agua. Esto significa el descenso del nivel del lecho del río por la erosión del agua, de tal manera que hay una tendencia para exponer la cimentación de los puentes como resultado de la acción

erosiva de las corrientes de agua, a medida que la erosión progresa continuamente, socava los cimientos de la estructura originando el colapso de ésta (Khwairakpam & Mazumdar, 2009); (Campa-Rodríguez & Astorga-Bustillos, 2015).

Melville (1975) reporta que el sistema de vórtices (herradura y estela) se desarrollan alrededor de la pila y son la principal causa de la socavación (ver Figura 27).

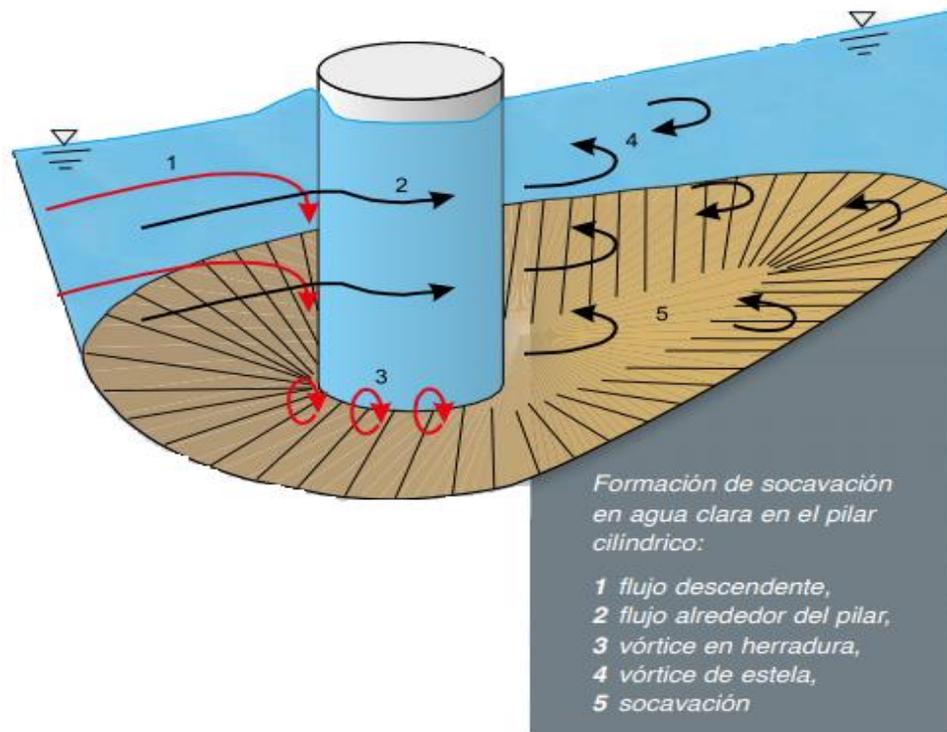


Figura 27. Campo de flujo alrededor de un pilar circular. Fuente: (Gunt Hamburg, 2017).

El vórtice en herradura aumenta las velocidades cerca del lecho, lo que resulta en un aumento de la capacidad de transporte del sedimento. El vórtice de estela mantiene la condición de sedimento suspendido, además de que actúa como una aspiradora levantando el material del fondo y luego transportándolo hacia aguas abajo.

Los vórtices de herradura se producen por el flujo dirigido hacia abajo en el lado de aguas arriba de la estructura. El flujo dirigido hacia abajo (ver Figura 27 línea roja) se origina debido al gradiente de presión (ver Figura 28). Los vórtices de estela se originan con la separación de la capa límite en los lados del cilindro expuestos a flujos (Gunt Hamburg, 2017).

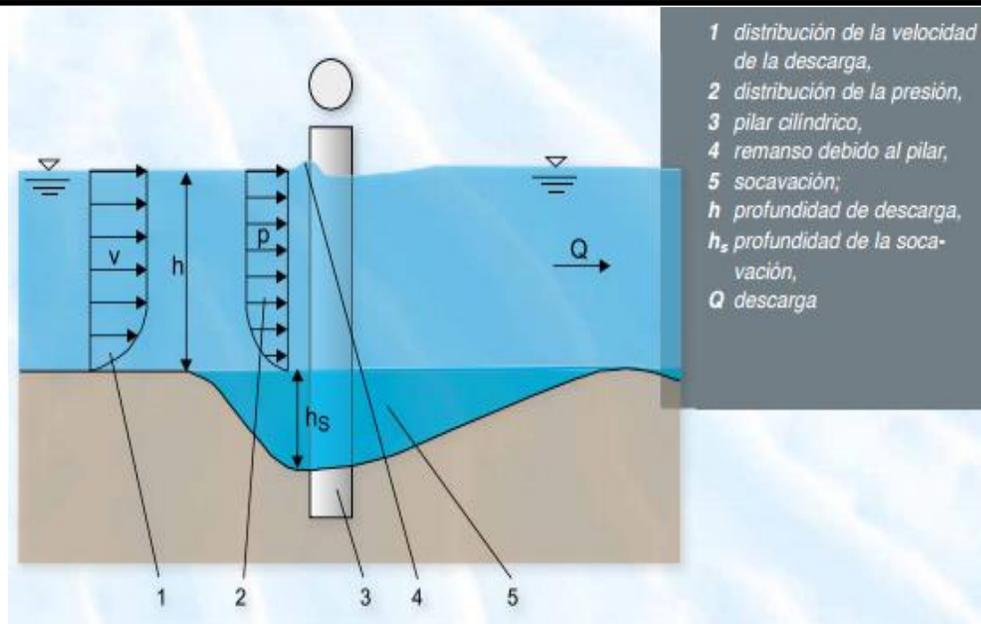


Figura 28. Perfil de velocidades y de presión en una pila circular. Fuente: (Gunt Hamburg, 2017).

Chiew (1984) informa que el sistema de vórtices tiene los siguientes componentes:

1. Flujo descendente
2. Vórtice en herradura
3. Vórtice de estela
4. Vórtice de arrastre (en el caso de una pila sumergida)

II.3.2 Campo de flujo en presencia de acumulación de material leñoso

La acumulación de escombros en las pilas de los puentes es un contribuyente significativo de falla, como en la cuenca del Alto Mississippi en 1993 (Parola, Hagerty, & Kamojjala, 1998).

Pagliara & Carnacina (2012) hacen referencia que varios autores coinciden en que la profundidad máxima del foso de socavación, la fuerza del vórtice y la morfología del foso de socavación se ven afectados por las características de la cuenca, las características del flujo y condiciones del cauce (p. ej., la intensidad del flujo, la rugosidad del sedimento, la geometría del cauce, etc.) y debido a que la acumulación de material leñoso influye de manera directa en las características del flujo, tales desechos representan un nuevo elemento de influencia para el campo de flujo.

Basta con ver los estudios realizados por Lagasse *et al.*, (2010), Pagliara & Carnacina, (2010), Plagiara & Carnacina, (2011) y Schmocker & Hager, (2011) en donde las acumulaciones de desechos de madera se han simulado y caracterizado utilizando diferentes parámetros, por ejemplo, dimensiones, forma, rugosidad, tamaño de los troncos y porosidad de la acumulación.

Lagasse *et al.*, (2010) analizó diferentes formas de acumulación (rectangular, triangular, cubo) y observo que la presencia de material acumulado en la pila genera un flujo de por debajo de la acumulación que genera un cambio del flujo cerca de la pila del puente lo que provoca cambios en el proceso de socavación. Sin embargo, Lagasse *et al.*, (2010) limito su estudio del campo de flujo a la visualización con inyección de tinta.

Lagasse *et al.*, (2010) dice que el proceso de socavación puede visualizarse comparando las líneas de traza idealizadas en una pila sin material leñoso acumulado (ver Figura 29A) con las de una pila o grupos de pilas que presentan una acumulación de solidos flotantes rectangular (ver Figura 29B).

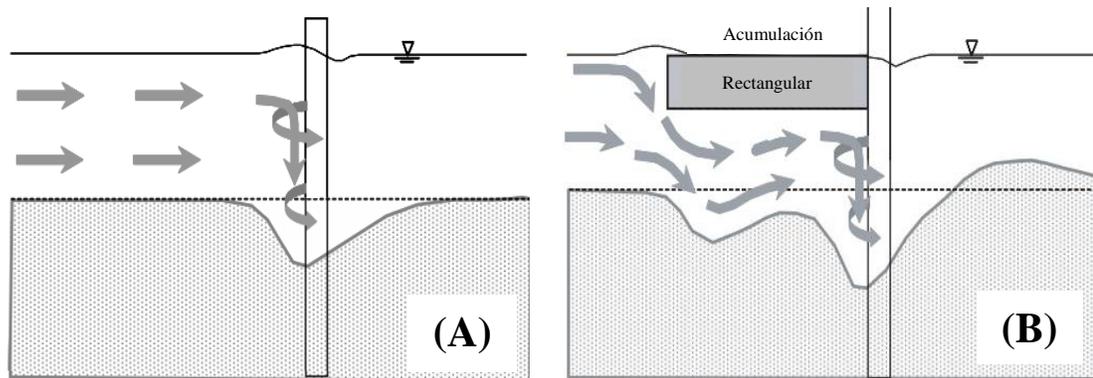


Figura 29. Campo de flujo idealizado (A) Una sola pila sin material acumulado, (B) Pila con acumulación de material. Fuente: Lagasse *et al.*, (2010).

Las líneas de traza en una pila sin obstrucción son esencialmente uniformes en la sección de aproximación. El flujo choca con la cara frontal de la pila y desciende formando espirales en el lecho de cauce el llamado vórtice de herradura. Por el contrario, en un flujo que presenta acumulación de escombros, el flujo choca con el material lo que obliga a la corriente a descender por debajo de la cara superior aguas arriba de los escombros como se muestra en la Figura 29B lo que genera socavación aguas arriba de las pilas. Debido a la obstrucción creada por los sólidos flotantes el flujo aumenta su velocidad en los laterales

de la acumulación, a medida que el flujo por debajo del material se acerca a la pila se observa el flujo descendente y el vórtice de herradura.

Dependiendo de la relación de bloqueo del material con respecto de la sección transversal del canal, la fuerza del flujo descendente y el vórtice de herradura puede ser mayor o menor con relación a un escenario sin acumulación de material leñoso.

En el caso de una pila que presenta una forma de acumulación triangular/cónica (ver Figura 30) se observa que el flujo se canaliza hacia la cara de la pila, creando una socavación mayor en comparación con la condición base (ver Figura 29A).

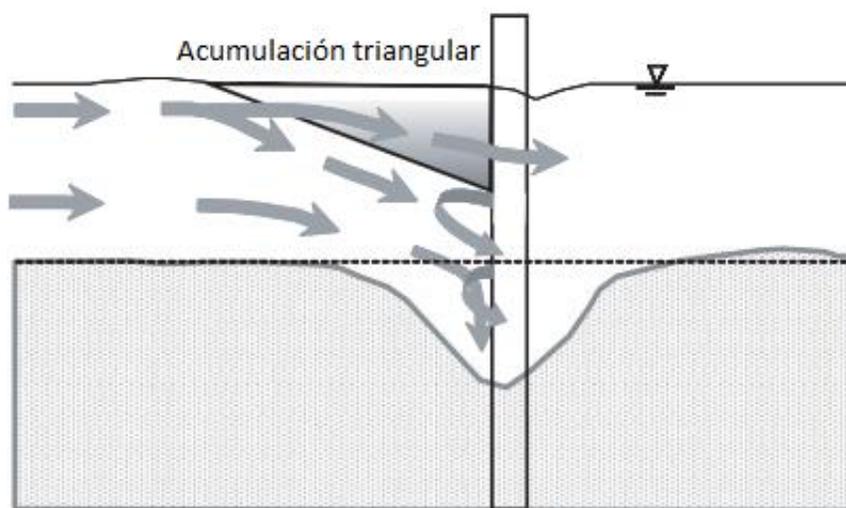


Figura 30. Campo de flujo idealizado en una pila con acumulación triangular. Fuente: Lagasse *et al.*, (2010).

II.4 Estudios experimentales

De la recopilación de información de estudios referentes a la acumulación de material leñoso en pilas de puentes, se presentan aquí los estudios más relevantes que sirvieron como base en la elaboración de este trabajo.

II.4.1 Efectos de los escombros en la socavación de pilas de puente

Lagasse *et al.*, (2010) como continuación de la obra original de Diehl (1997) para la Administración Federal de Carreteras (FHWA), realizaron una investigación con la que

lograron desarrollar pautas para predecir el tamaño y la geometría de las acumulaciones de sólidos flotantes en las pilas de puente y los métodos para cuantificar la socavación en las pilas de puente que resultan de las acumulaciones de material leñoso.

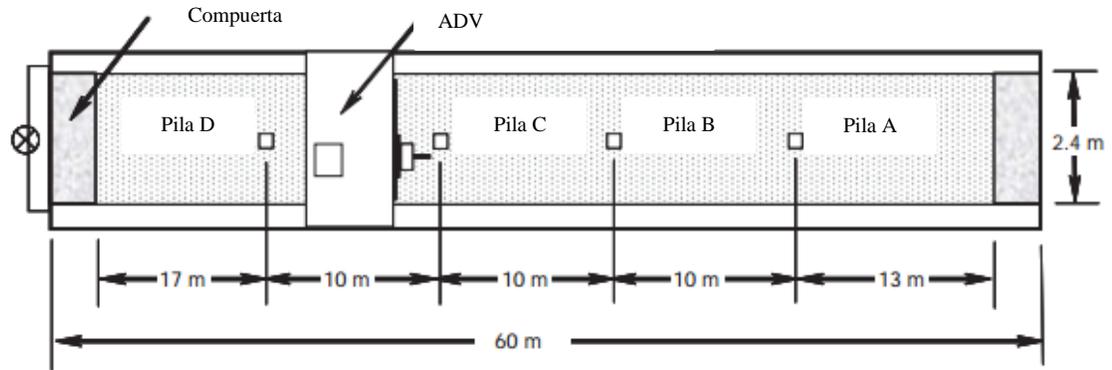
Con respecto a las pruebas de laboratorio que se describen en este trabajo, el objetivo de dichas pruebas fue generar un rango suficiente de datos de acumulación de troncos y con ellos desarrollar factores de ajuste para las ecuaciones de cálculo de socavación, utilizadas por HEC-18.

Modelo experimental. Las pruebas las realizaron en el canal de 2.4 m de ancho y 60 m de largo de la Universidad Estatal de Colorado (ver Figura 31) bajo condiciones de flujo de agua clara con un lecho de arena de 1.5 pies (0.46 m) de espesor con un diámetro $d_{50} = 0.7$ mm, utilizando pilas cuadradas de 10.2 cm.

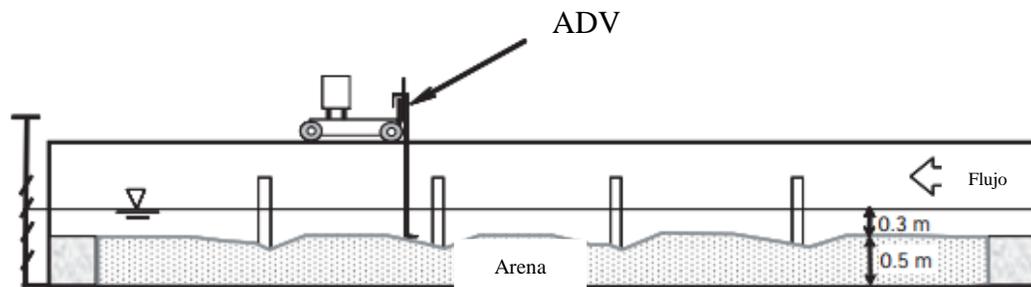


Figura 31. Canal de la Universidad de Colorado antes de la instalación de las pilas. Fuente: Lagasse *et al.*, (2010).

El agua la suministraron dos bombas de 125 caballos de fuerza, que podrían operar por separado o juntas para lograr máximo de $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (1500 l/s). Para todos los ensayos, la pendiente del canal se mantuvo constante a 0.1%. Las pilas se construyeron en dos partes, la inferior se fijó a la plantilla del canal. Los datos de velocidad se registraron con un Velocímetro Acústico Doppler SonTek (ADV) (ver Figura 32).



Vista en planta



Vista en perfil

Figura 32. Configuración del canal, Vista en planta y perfil. Fuente: Modificado a partir de Lagasse *et al.*, (2010).

Probaron diferentes formas de acumulación de troncos, rectangulares, triangulares/cónicas (ver Figura 33A y 33B).

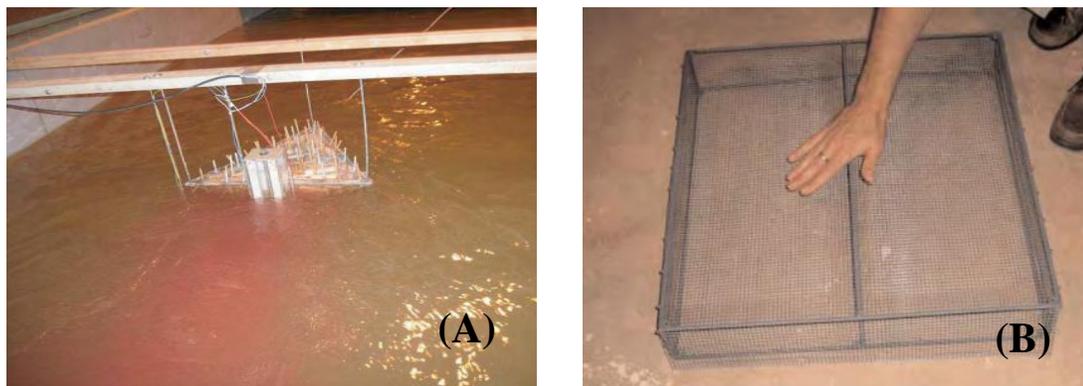


Figura 33. Formas de acumulación (A) Prueba con acumulación triangular, (B) Construcción de acumulación rectangular. Fuente: Lagasse *et al.*, (2010).

Las formas y tamaños de las acumulaciones las obtuvieron de un archivo fotográfico en un estudio realizado en varias cuencas de Estados Unidos de la acumulación de material leñoso. A partir del inventario fotográfico y de la medición del material leñoso en sitio, se obtuvieron las relaciones normalizadas al ancho de la pila del puente (a) de la longitud (L) y ancho (W) de la acumulación de escombros, se seleccionó el rango de dimensiones de escombros para abarcar el rango observado en el campo +/- una desviación estándar alrededor de la media ver Tabla 5.

Tabla 5. Dimensiones de los desechos en campo y en laboratorio. Fuente: Lagasse *et al.*, (2010).

	W / a	L / a	L / W
<u>Fotografía y mediciones en campo</u>			
Promedio	15.1	12.4	0.9
Intervalo	5.2 - 43	3 - 48	0.2 - 2.7
Desviación estándar	8.2	9.2	0.5
+ / - Des. Estándar	6.9 - 23.3	3.2 - 21.5	0.4 - 1.3
<u>Pruebas de laboratorio recomendadas</u>			
Intervalo	6 - 24	3 - 24	0.5 - 1.5

De los resultados de ese estudio, en la mayoría de los casos analizados, la presencia de acumulación de troncos generó una mayor socavación alrededor de la pila respecto a la condición de no tener acumulación de troncos.

II.4.2 Evolución temporal de la socavación en pilas de puente: Efecto de la rugosidad y la porosidad de la acumulación de madera

Pagliari & Carnacina, (2010) presentan un análisis experimental sobre el efecto de la acumulación de material leñoso en las pilas de puente y la evolución de la socavación relacionada. Las acumulaciones se caracterizaron por usar varios diámetros de troncos, rugosidad y porosidad de los desechos. También ensayaron las variaciones de caudal y la relación de bloqueo.

Modelo experimental. Utilizaron un canal de 7.6 m de largo, 0.61 m de ancho y 0.5 m de profundidad, construido de paredes de vidrio y acero. Con una capacidad de 100 l/s

midieron los caudales con un sensor de flujo electromagnético KROHNE® Optiflux 2000. En los ensayos se utilizó una pila cilíndrica de plexiglás de diámetro $D = 0.03 \text{ m}$. Una compuerta en el extremo del canal reguló la profundidad del flujo. El material usado tiene un diámetro $d_{50} = 1.0 \text{ mm}$ (ver Figura 34).

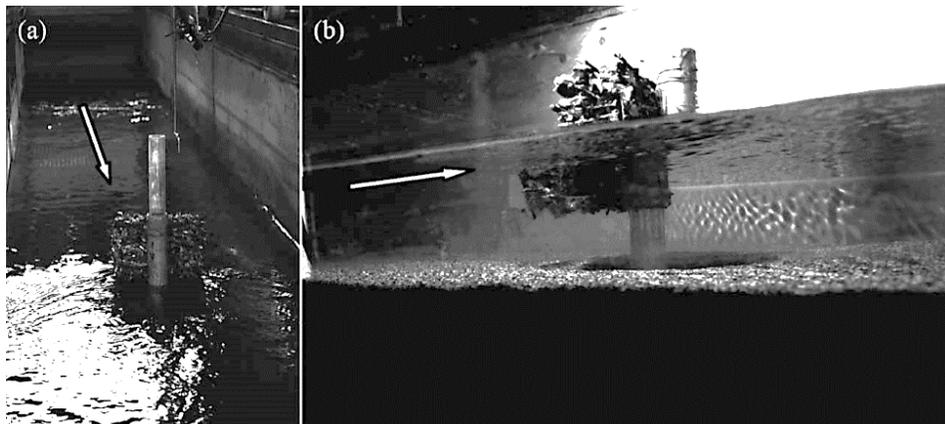


Figura 34. Canal de pruebas con acumulación de material. (A) Vista desde aguas abajo y (B) Vista lateral.

Fuente: (Pagliara & Carnacina, 2010).

Analizaron tres rugosidades de sólidos flotantes y por dos acomodos de troncos diferentes (ver Figura 35). Los diámetros de los troncos que utilizaron están en un rango de 0.63 a 1.06 cm. Las longitudes las midieron por medio de un vernier con una precisión de +0,1 mm.

Las rugosidades relativas que ensayaron fueron $d_f/D \approx 0$ para la acumulación lisa de los troncos comparable a la acumulación del hielo o de los escombros leñosos con una alta presencia de hojas y fango, $d_f/D \approx 0.21$ como acumulación de troncos de tamaño medio y $d_f/D \approx 0.35$ correspondiente a una acumulación de material leñoso grueso. La rugosidad lisa la simularon mediante material sintético, para reducir la rugosidad de la superficie cubrieron el material con cinta de plástico lisa (ver Figura 35E). Las acumulaciones ásperas a su vez están compuestas por un núcleo sintético impermeable, cubierto por dos capas de material leñoso (ver Figura 35A y 35B). obtuvieron la condición permeable a partir de colocar el material en una jaula de metal (ver Figura 35C). Una segunda condición permeable la obtuvieron a partir de amarrar el material con una simple cadena metálica (ver Figura 35F) y una tercera y última condición permeable la consiguieron a partir de pegar los troncos con una disposición al azar (ver Figura 35D).

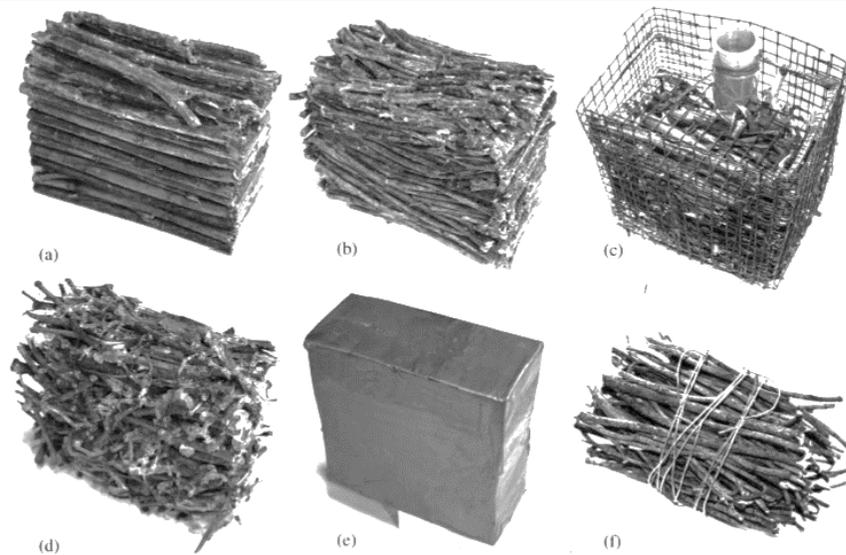


Figura 35. Acumulaciones de material para las pruebas de rugosidad. (A) Disposición paralela impermeable, (B) Disposición cuasi-paralela impermeable, (C) Acumulación permeable con jaula de metal, (D) Disposición al azar permeable, (E) Acumulación impermeable lisa y (F) Disposición cuasi-paralela permeable. Fuente: (Pagliara & Carnacina, 2010).

De la experimentación y el análisis de los datos obtuvieron lo siguiente:

1. La profundidad del foso de socavación en presencia de acumulación de material leñoso puede ser 3 veces más grande que sin la acumulación de material.
2. Los parámetros principales que afectan la evolución temporal de la socavación son la intensidad de flujo y la relación de bloqueo.
3. El efecto de la porosidad es despreciable en términos de geometría del foso de socavación, aunque la porosidad es importante al evaluar la sobrecarga hidrodinámica en las pilas del puente.
4. La forma del foso de socavación no se ve afectada por la rugosidad relativa de los troncos, mientras que la forma del foso de socavación no dimensional depende principalmente de la intensidad del flujo.

II.4.3 Estudio experimental para caracterización de efectos del arrastre de sólidos sobre estructuras de cruce en ríos de zonas urbanas

Peñalosa Rueda *et al.*, (2015) llevaron a cabo un estudio experimental con modelos físicos en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica Enzo Levi en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) con el fin de analizar el efecto de la acumulación de material (madera) en estructuras de cruce (pilas de puente). 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.

Modelo experimental. Utilizaron dos canales uno de pendiente variable y uno de pendiente nula. El canal de pendiente nula funciona como sistema de recirculación, tiene una longitud de 20.5 m, ancho de 0.97 m y una altura de 0.50 m, cuenta con un depósito de 3.35 x 3.15 m y con una zona de visualización en la parte central del canal. El caudal máximo es de 50 l/s a partir de dos bombas una centrífuga y una sumergible con capacidad de 30 l/s y 20 l/s respectivamente. Para medir el flujo colocaron un medidor de flujo de funcionamiento electromagnético en la línea de conducción. La línea de conducción del gasto tiene un diámetro de 6" es de PVC. Para amortiguar la llegada del gasto y redireccionar el flujo colocaron una serie de tubos de PVC de ½". Los tirantes se controlan a partir de una compuerta abatible colocada al final del canal, en la zona de descarga colocaron una canasta y unas mamparas con el fin de retener el material leñoso que no quedara atrapado en las pilas y así evitar su llegada a la zona de succión de las bombas (ver Figura 36). Midieron las velocidades con un Velocímetro Acústico Doppler marca SONTEK. Midieron los tirantes con sensores de nivel de funcionamiento ultrasónico. Todas las pruebas las filmaron en dos tomas una lateral y en planta para lo cual instalaron dos cámaras.



Figura 36. Canal de pendiente nula en funcionamiento. Fuente: (Peñaloza Rueda *et al.*, 2015).

El canal de pendiente variable 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 (ver Figura 37). 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 instalaron un medidor de flujo ultrasónico en su línea de alimentación.



Figura 37. Canal de pendiente variable. Fuente: (Peñaloza Rueda *et al.*, 2015).

Los modelos de material leñoso los fabricaron con madera natural, de ramas y raíces de diferentes tipos de árboles y arbustos, cortados en diferentes longitudes. Midieron los volúmenes para cada rango de tamaños (ver Figura 38).



Figura 38. Clasificación de material por tamaños. Fuente: (Peñalosa Rueda *et al.*, 2015).

Posterior a la clasificación de material, realizaron la calibración y ensayos preliminares. A partir de estas pruebas determinaron que con un $y = 8$ cm el material tiene fricción con la plantilla del canal, por otra parte, observaron que al reutilizar el material los troncos presentan algún grado de saturación que provocó que el material leñoso de menor tamaño transite de manera sumergida, por lo que optaron por realizar las pruebas con el material seco, que de acuerdo con los ensayos preliminares es cuando el material presenta una mayor acumulación en las pilas que sería el escenario más desfavorable. Manejaron una separación entre pilas de $1/3$ del claro. Analizaron condiciones para tres números de Froude (0.37, 0.51 y 0.64) distintos.

Las variables que consideraron en el estudio son longitud del tronco de diseño, volumen de la muestra, tiempo de la prueba y número de Froude. Obtuvieron gráficas para cada número de Froude, graficaron 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}).

De este estudio dieron las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. Se debe tener cuidado con los números de Froude bajos dado que el potencial de acumulación es mayor, en las zonas urbanas las pendientes y números de Froude son bajos por lo que son más propensas a inundaciones. Por otra parte, los números de Froude altos se encuentran en zonas altas, donde se recomienda no usar pilas intermedias como apoyo.
2. Debido a que cada caso tiene características muy particulares es complicado generalizar una metodología, por lo que en caso especiales se recomienda que se realice un estudio en modelo físico a escala, el cual deberá ser calibrado y validado con datos de campo.
3. 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.

II.4.4 Conclusiones

Los estudios experimentales que se describen anteriormente sirven como apoyo en el desarrollo del presente trabajo de investigación. De cada uno de los estudios se tomó la información más relevante, la cual se resume en la siguiente tabla.

Tabla 6. Síntesis de los estudios experimentales.

Estudio y autor	Aporte
Efectos de los escombros en la socavación de pilas de puente. Lagasse <i>et al.</i> , (2010).	<ul style="list-style-type: none"> • Se toman las relaciones normalizadas al ancho de pila (a) de la longitud (L) y ancho (W) de la acumulación de escombros, estos datos sirven para dimensionar las formas de acumulación.
Evolución temporal de la socavación en pilas de puente: Efecto de la rugosidad y la porosidad de la	<ul style="list-style-type: none"> • De las conclusiones del estudio se entiende que el material de construcción de las formas de

Estudio y autor	Aporte
acumulación de madera. Pagliara & Carnacina, (2010).	acumulación y el acomodo del material leñoso son variables despreciables. A partir de estos resultados se construyen las formas de acumulación.
Estudio experimental para caracterización de efectos del arrastre de sólidos sobre estructuras de cruce en ríos de zonas urbanas. Peñaloza Rueda <i>et al.</i> , (2015).	<ul style="list-style-type: none">• Canal de pendiente nula adecuado para estudios experimentales con sólidos flotantes, disponible para futuros estudios.• Modelos de material leñoso disponible para futuros estudios.• Recopilación del marco teórico y estado del arte sobre el tema de generación, arrastre y acumulación de material leñoso en ríos, así como medidas de mitigación de la afectación en puentes.• Resultados sobre la caracterización del material leñoso y el flujo, y la interacción de estos con la separación de las pilas de puentes.

CAPÍTULO III

CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

En este capítulo se describen los arreglos experimentales, el modelo físico, el equipo de medición y la metodología para llevar a cabo los experimentos. Todas las pruebas se realizaron dentro de las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica Enzo Levi en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

III.1 Configuración y diseño experimental

III.1.1 Instalaciones

Se utilizó el canal que se adecuó para el estudio que realizó Peñaloza Rueda *et al.*, (2015), entre las principales características del canal destaca el sistema de recirculación de gasto, un sistema propio de bombas y una pendiente nula. El canal tiene una longitud y una sección transversal rectangular con 20.5 m, un ancho de 0.97 m y una profundidad de 0.50 m. El canal cuenta con una zona de visualización con paredes de cristal al centro del canal. Aguas abajo el canal descarga en un depósito de 3.35 x 3.15 m, desde el cual se bombea el flujo por una línea de conducción de 6" de diámetro hasta el tanque de amortiguación del canal, el cual contiene rocas en su interior para disipar la turbulencia con que llega el flujo, a 1.00 m del tanque de amortiguación se encuentran unos tubos de PVC de ½" de diámetro y 0.60 m de longitud que sirven para dirigir el flujo. Al final el canal tiene una compuerta abatible para controlar los tirantes (ver Figuras 39 y 40).



(A) Canal



(B) Zona de visualización



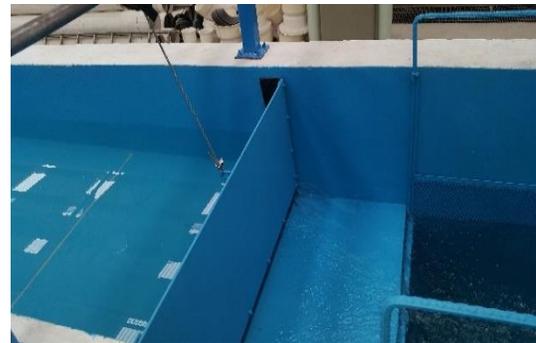
(C) Deposito



(D) Línea de conducción



(E) Rocas y tubos de PVC



(F) Compuerta abatible

Figura 39. Estructura del canal de pendiente nula.

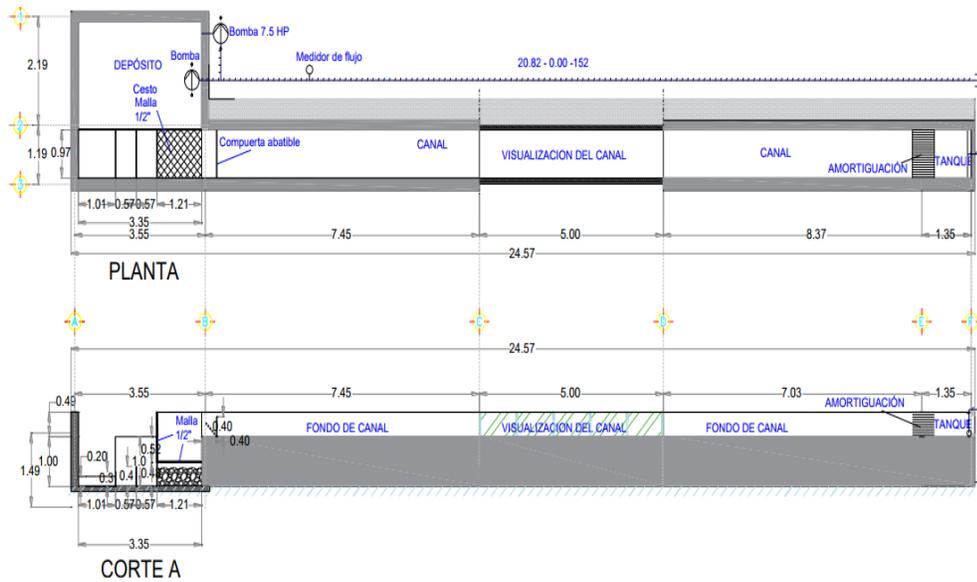


Figura 40. Plano del canal de pendiente nula con vistas en planta y corte. Fuente: Modificado a partir de Peñaloza Rueda *et al.*, (2015).

III.1.2 Sistema de bombas

El canal cuenta con 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 hasta 50 l/s. Para variar el gasto de la bomba sumergible se utiliza el baipás, y para variar el gasto de la bomba centrífuga el sistema cuenta con un variador de frecuencia (ver Figura 41).



(A) Bomba sumergible



(B) Bomba centrífuga y baipás

Figura 41. Sistema de bombas.

III.1.3 Medidor de flujo electromagnético

El Q4000 medidor de flujo electromagnético se utilizó para medir el caudal que pasa por la línea de conducción. La precisión de medición es de $\pm 5\%$. A medida que el gasto fluye el instrumento registra la información en una pantalla digital, dando el dato en m^3/h (ver Figura 42).



Figura 42. Medidor de flujo electromagnético.

III.1.4 Pilas

A partir de un análisis de varios proyectos de puentes construidos en México se llega a la conclusión de que las pilas de sección circular son las más utilizadas como soporte, su diámetro varía según los requerimientos estructurales de cada proyecto, aunque el promedio se encuentra entre los 1.50 a 2.50 m para puentes localizados en zonas urbanas.

Los experimentos se realizaron con dos barrotes circulares de madera con un diámetro de $\frac{3}{4}$ " (0.02 m), con una separación de un tercio del ancho del canal y en el sentido longitudinal están colocadas en la parte central de la zona de visualización (ver Figura 43). Las consideraciones que se tomaron en este estudio para el diámetro, número de pilas y separación entre ellas, son las consideraciones que propuso Peñaloza Rueda *et al.*, (2015).

De acuerdo con Melville & Coleman, (2000) con la finalidad de evitar el efecto de contracción, el ancho del canal debe ser al menos diez veces el diámetro de la columna.

La relación del ancho del canal con el diámetro de la pila $\frac{A_c}{D} = \frac{0.97}{0.02} = 48.5$, que cumple con la condición recomendada por (Melville & Coleman, 2000).

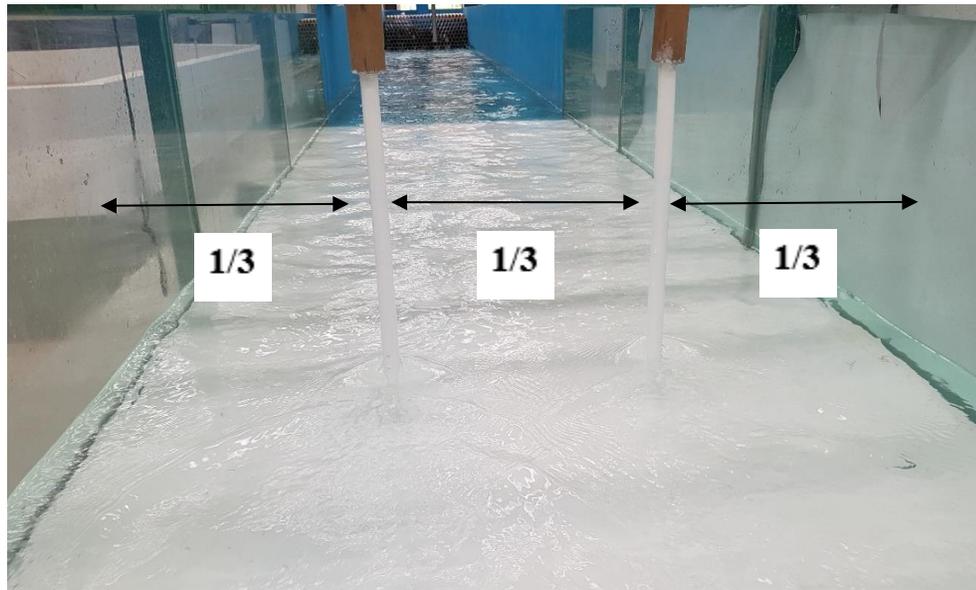


Figura 43. Instalación de las pilas en el canal de pendiente nula.

III.1.5 Escala

Muchos de los fenómenos en la naturaleza son tan complejos que no es sencillo analizarlos solamente con métodos matemáticos. Por lo que es conveniente el uso de los modelos hidráulicos (o físicos) que corresponden a un sistema que simula un objeto real llamado prototipo, el cual se emplea en el estudio de problemas de la ingeniería civil tales como: transporte de sedimentos, socavación en ríos, acción del oleaje, obras hidráulicas (presas, vertedores, etc.), conducción de agua a presión, cárcamos de bombeo, etc.

En la actualidad se dispone de avanzadas técnicas de modelación que, junto con los progresos de la tecnología en el ámbito de la medición, permite describir con una alta precisión la conducta del fenómeno en prototipo a partir de un modelo a escala reducida.

Escala, es la relación que existe entre una magnitud del prototipo y su correspondiente en modelo. La escala de longitudes se define como:

$$L_e = \frac{L_p}{L_m}$$

Donde las características del prototipo se identifican con el subíndice “*p*” y del modelo con subíndice “*m*”.

Como se mencionó en la sección III.1.4 Pilas “*el diámetro promedio de las pilas de los puentes en México se encuentra dentro del rango de 1.50 a 2.50 m*”. Tomando un diámetro promedio de 2.00 m y un ancho de pila de 0.02 m, la escala de longitudes es:

$$L_e = \frac{L_p}{L_m} = \frac{2.00}{0.02} = 100$$

III.1.6 Condiciones de flujo

El arrastre de sólidos flotantes en ríos se encuentra asociado a la dinámica fluvial de la cuenca, sin embargo, este proceso se incrementa cuando se presenta un evento hidrometeorológico, al existir un mayor nivel de precipitación se pueden presentar avenidas más fuertes por el aumento del gasto, lo que genera tirantes y velocidades mayores favoreciendo el potencial de arrastre y una mayor acumulación de material de escombros en las pilas de puente.

Con el objetivo de analizar el cambio en el patrón de flujo por la interacción del cauce con las pilas y la acumulación de material, se desarrollaron ensayos con dos velocidades diferentes asociados a sus respectivos números de Froude. Los tirantes se lograron con el uso de la compuerta de regulación localizada aguas abajo del canal.

Como se busca analizar el escenario más desfavorable el gasto se mantiene al máximo de la capacidad de bombeo instalada en el modelo que es de hasta 50 l/s. En la Tabla 7 se presentan las condiciones de flujo.

Tabla 7. Características hidráulicas de las pruebas en laboratorio.

Condiciones de flujo							
Condición	<i>b</i> (m)	<i>h</i> (m)	<i>A</i> (m)	<i>Q</i> (m ³ /h)	<i>Q</i> (m ³ /s)	<i>V</i> (m/s)	<i>Fr</i>
1	0.97	0.12	0.12	180.00	0.05	0.43	0.40
2	0.97	0.30	0.29	180.00	0.05	0.17	0.10

III.1.7 Geometrías de acumulación de material leñoso

Las formas de acumulación analizadas por Lagasse *et al.*, (2010) se obtuvieron a partir de un inventario fotográfico y la medición del material leñoso en sitio. En México no se

dispone de la información relacionada con la acumulación de material leñoso en las pilas de puente, por lo que el presente trabajo tomó como base las dimensiones obtenidas por Lagasse *et al.*, (2010) para el dimensionamiento de las formas de acumulación (ver Tabla 5, pág. 34).

Se construyeron dos geometrías con forma rectangular, el material empleado fue malla tejida con alambres de acero galvanizado con una abertura de 0.70 x 0.60 mm y espesor de 0.28 mm; se seleccionó este material por el tamaño de la abertura para impedir que el material por muy pequeño que sea se escape (ver Figura 44).

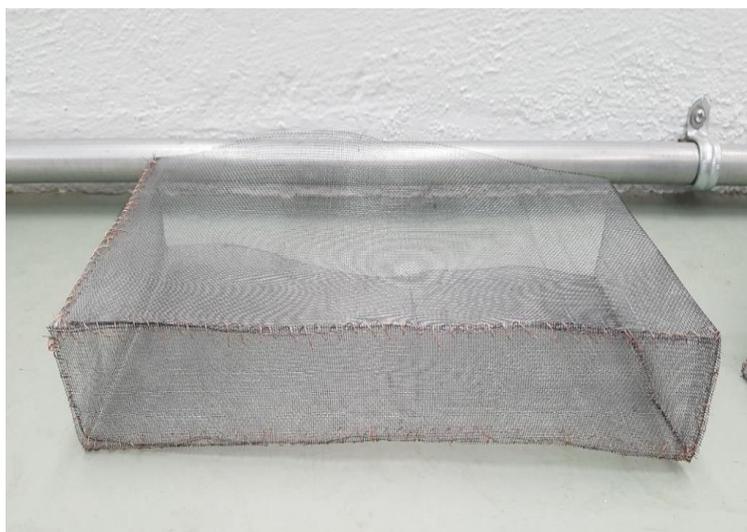


Figura 44. Geometría rectangular de acero galvanizado con medidas 0.40x0.20x0.06 metros.

Es de resaltar el experimento hecho por Pagliara & Carnacina, (2010) descrito en la sección “II.4.2 Evolución temporal de la socavación en pilas de puente: Efecto de la rugosidad y la porosidad de la acumulación de madera”, concluye que tanto la rugosidad y la porosidad de la forma de acumulación no afecta el proceso de socavación, los parámetros que si afectan son la relación de bloqueo y la intensidad del flujo, por lo que independientemente del material de construcción lo que se tiene que cuidar es la estabilidad de la forma y que el material mantenga su posición.

Con las relaciones de la Tabla 5 (pág. 34), se elaboraron las geometrías para representar la acumulación de material. La Figura 45 proporciona una descripción de la geometría rectangular y de sus variables asociadas.

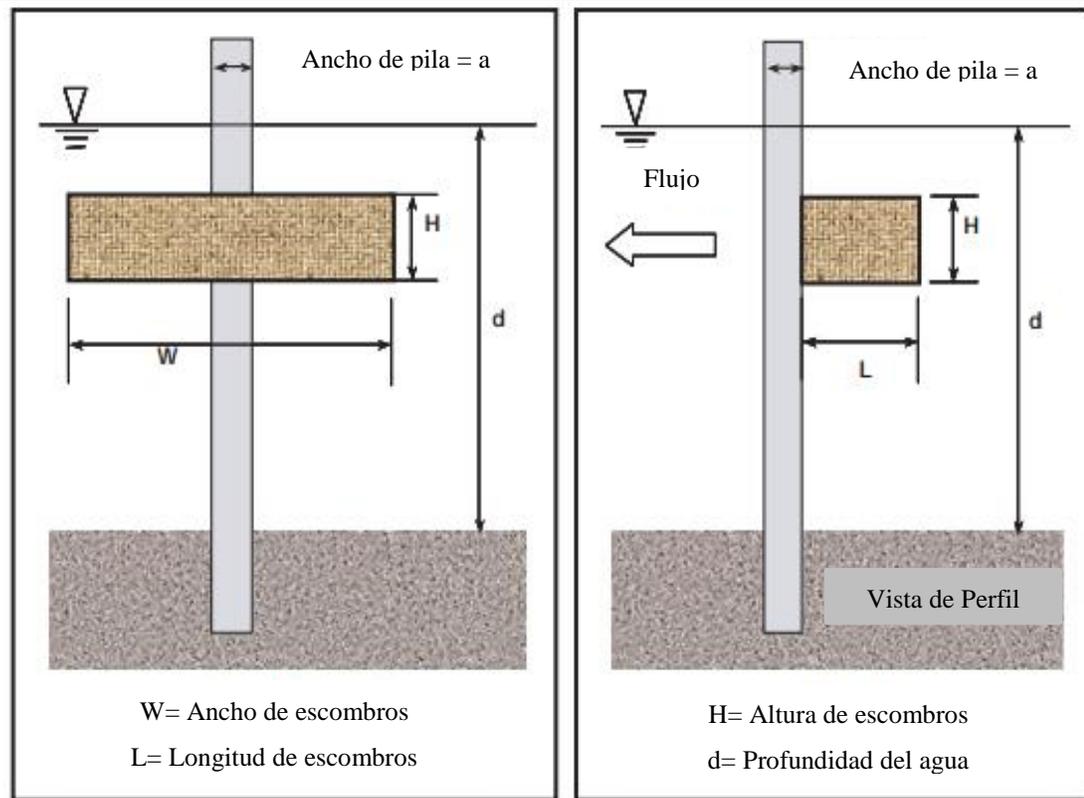


Figura 45. Geometría rectangular de escombros y sus variables asociadas. Lagasse *et al.*, (2010).

La Tabla 8 muestra las dimensiones de las dos formas de acumulación rectangular que se emplearon en las pruebas de laboratorio.

Tabla 8. Dimensiones de las geometrías de acumulación rectangular.

Pila circular con acumulación rectangular								
Geometría	W (m)	L (m)	H (m)	a (m)	d (m)	W/a	L/a	L/W
1	0.40	0.20	0.06	0.02	0.12	20.00	10.00	0.50
2	0.40	0.20	0.15	0.02	0.30	20.00	10.00	0.50

Variable asociada			
W=	Ancho de la acumulación		a= Diámetro de la pila
L=	Largo de la acumulación		d= Profundidad de la lámina de agua
H=	Altura de la acumulación		

La Figura 46 muestran las formas de acumulación terminadas.



(A) Geometría de acumulación con medidas
0.40x0.20x0.06 metros.



(B) Geometría de acumulación con medidas
0.40x0.20x0.15 metros.

Figura 46. Geometría de acumulación.

III.1.8 Material leñoso

Peñaloza Rueda *et al.*, (2015), con base en varias fotografías de acumulaciones de diferentes publicaciones comenta que a pesar de que los troncos más fuertes y de mayor tamaño son los que inician y sostienen las acumulaciones en las pilas, 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 (ver Figura 47).

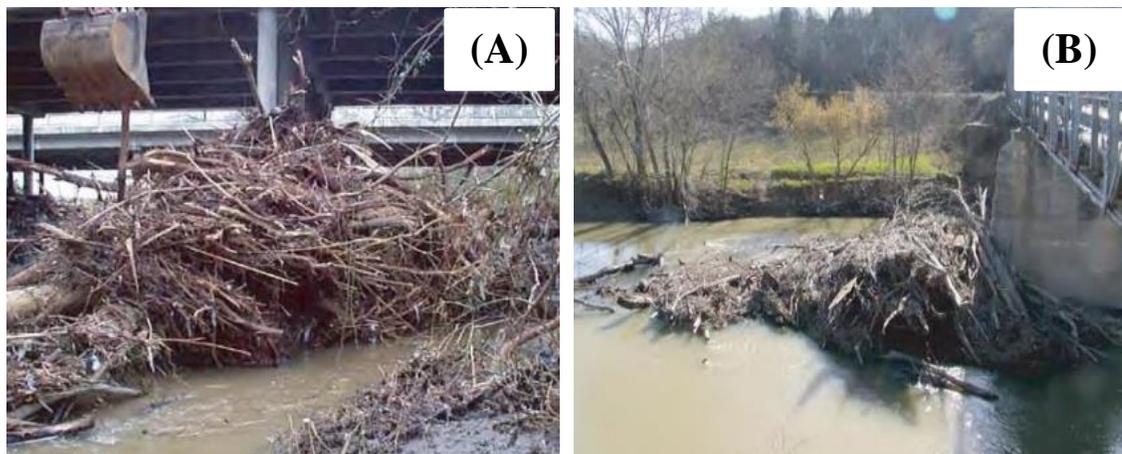


Figura 47. Acumulación de material leñoso en diferentes ríos. Fuente: (Peñaloza Rueda *et al.*, 2015).

Como se mencionó en la sección anterior México no dispone de la información acerca del material que se deposita en las pilas de puente sea longitud, volumen o forma. Por lo tanto, a falta de información sobre la caracterización del material acumulado en estos eventos se

utilizó la caracterización del material leñoso que propone Peñaloza Rueda *et al.*, (2015), en la que se considera diferentes porcentajes del volumen total para cada rango de longitud y diámetro de tronco en función de L_{td} . Específicamente se utilizó la caracterización para un $L_{td} = 30\text{cm}$ en modelo, la cual se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Caracterización del material leñoso. Fuente: (Peñaloza Rueda *et al.*, 2015).

Longitud de troncos	Rango de longitud (cm)		Diámetros (cm)	
L_{td}	30.00		1.20	1.50
0.60 L_{td} – 0.90 L_{td}	18.00	27.00	0.70	1.40
0.30 L_{td} – 0.60 L_{td}	9.00	18.00	0.40	0.90
0.15 L_{td} – 0.30 L_{td}	4.50	9.00	0.20	0.50

En la figura 48 se presenta un ejemplo de material clasificado por longitud y diámetro.



Figura 48. Material leñoso clasificado por tamaños con base en $L_{td} = 30\text{ cm}$. Fuente: (Peñaloza Rueda *et al.*, 2015).

Por lo tanto, el material leñoso que se utilizó para llenar los moldes de acero galvanizado (descritos en la sección III.1.7) es el mismo material que se utilizó en el trabajo de investigación hecho por Peñaloza Rueda *et al.*, (2015).

Los volúmenes de material leñoso usados en las pruebas de laboratorio para el desarrollo de este trabajo, se muestran a continuación (ver Tabla 10).

Tabla 10. Volúmenes de modelación para laboratorio.

Volúmenes de material leñoso					
Geometría	W (m)	L (m)	H (m)	Volumen (m³)	Volumen (cm³)
1	0.40	0.20	0.06	0.0048	4800
2	0.40	0.20	0.15	0.012	12000

Variable asociada	
W=	Ancho de la acumulación
L=	Largo de la acumulación
H=	Altura de la acumulación

Todas las pruebas se realizaron con el material en estado seco sin ningún grado de saturación. Lo que corresponde a un evento climático sin lluvias antecedentes.

III.1.9 Velocímetro Acústico Doppler (ADV)

Durante el desarrollo de los experimentos se utilizó la técnica de velocimetría acústica de efecto Doppler (ADV) para medir la componente de velocidad tridimensional. El dispositivo ADV para medir la velocidad es el Vectrino Profiler de la marca NORTEK AS®. En esta sección se describen las características principales del equipo y la configuración del mismo para la adquisición de datos durante las pruebas de laboratorio.

III.1.9.1 Características principales

El Vectrino Profiler está diseñado para uso en laboratorio, pero ha demostrado un excelente comportamiento en aplicaciones de campo como es la medida de velocidades en zona de swash en playas. La tecnología usada se basa en el contrastado procesamiento Doppler coherente, caracterizada por una alta precisión a altas tasas de medida sin offset apreciable.

El Vectrino Profiler permite nuevas aproximaciones a una gran cantidad de estudios científicos dada su capacidad para perfilar las tres componentes de la velocidad (U, V, W) en un rango vertical de hasta 30 mm localizado 40 mm debajo de la probeta emisora, con una resolución tan fina como 1 mm y con una frecuencia de muestreo de hasta 100 Hz (ver Figura 49). El Vectrino Profiler puede medir la distancia hasta el fondo a velocidades de hasta 10 Hz mediante intercalación de pings de detección de fondo y pings de perfilado de velocidad.

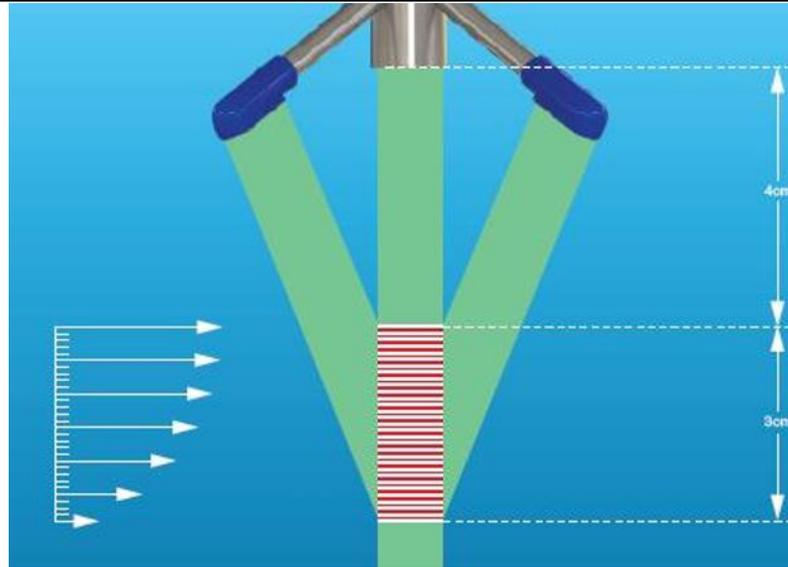


Figura 49. Perfil de muestreo. Fuente: (Nortek, 2012).

El software MIDAS (Sistema de adquisición de datos de instrumentos múltiples) se utiliza para controlar y recopilar datos de la instrumentación acústica Doppler de NORTEK AS® (ver Figura 50).

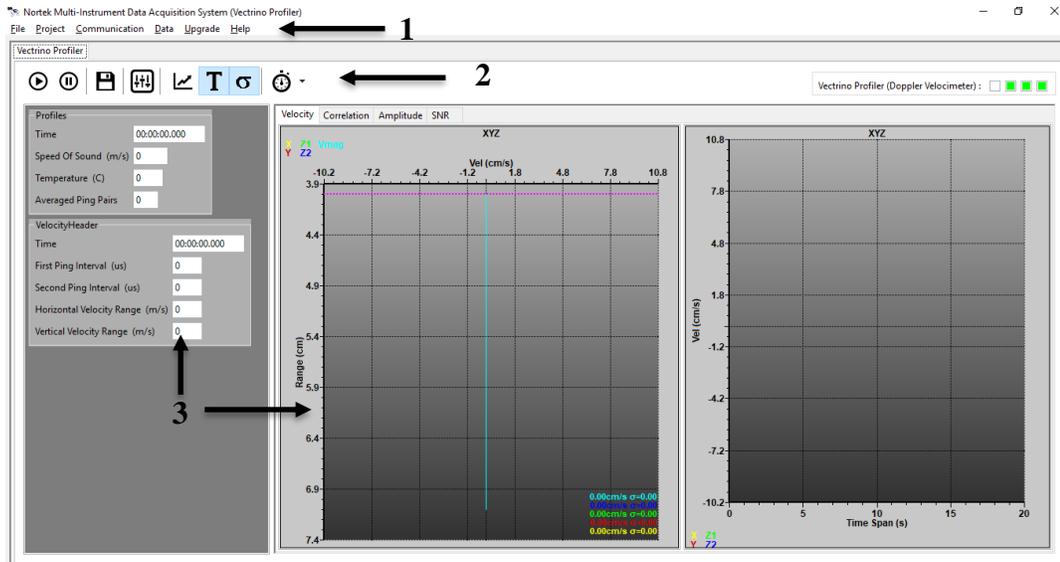


Figura 50. Ventana principal del software MIDAS. .

La ventana principal del software consta de tres secciones principales como se aprecia en la Figura 50, que se describen a continuación:

1. Menú.

- Archivo (File): Contiene las opciones para leer y guardar las configuraciones del/los aparato(s), las configuraciones de impresión, configuración predeterminada y salir.
- Proyecto (Project): Este menú permite al usuario ingresar información (un título de proyecto, ubicación y comentarios generales) que luego se guarda junto con todos los archivos de datos que posteriormente se crean durante el curso de la recopilación de datos.
- Comunicación (Communication): Sirve para conectar el/los instrumento(s) al ordenador, cuando se conectan varios aparatos cada uno tiene su propio panel en una pestaña separada.
- Datos (Data): Exporta los datos binarios que genera el equipo a otro formato de archivo.
- Actualizar (Upgrade): Actualiza el firmware del instrumento.
- Ayuda (Help): Contiene el manual de usuario, guía de inicio rápido, manual del software, etc.

2. Herramientas.



Inicia la recopilación de datos.



Pausa la visualización de datos, pero la recolección de datos sigue en segundo plano sin actualizar la pantalla de resultados.



Detiene la recopilación de datos.



Habilita o deshabilita la creación de archivos en el ordenador.



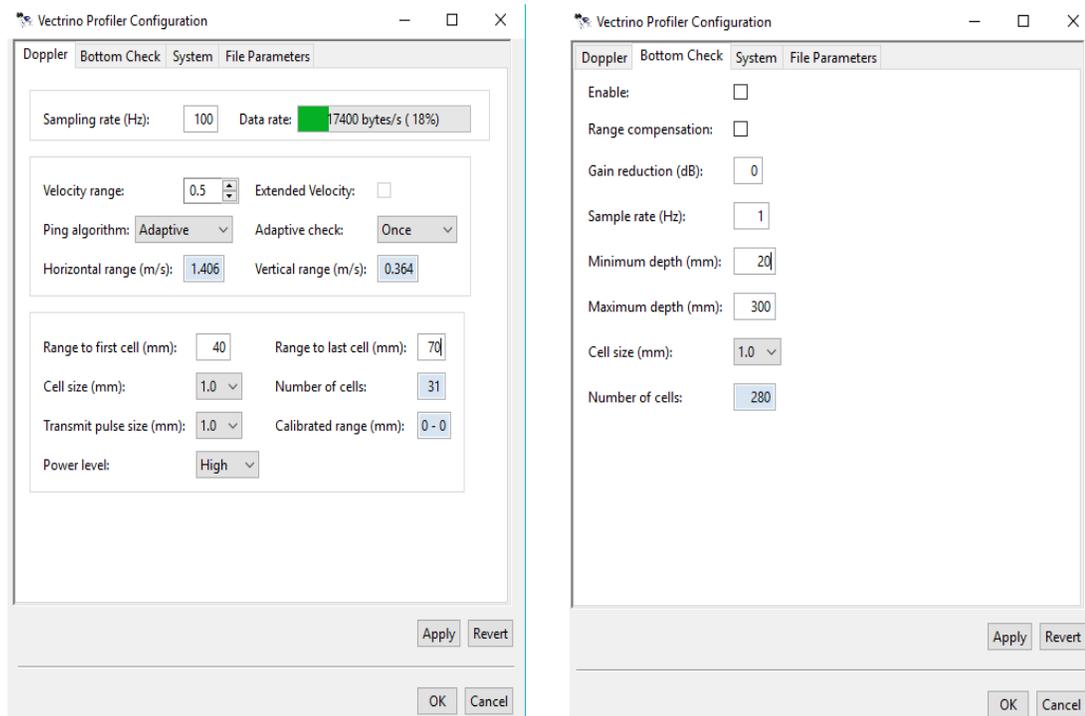
Configuración del Vetrino Profiler.

3. Resultados. Muestra los datos y graficas en tiempo real del:

- Tiempo de muestreo.
- Temperatura.
- Perfil de velocidades.
- Correlación.
- Amplitud.
- SNR.

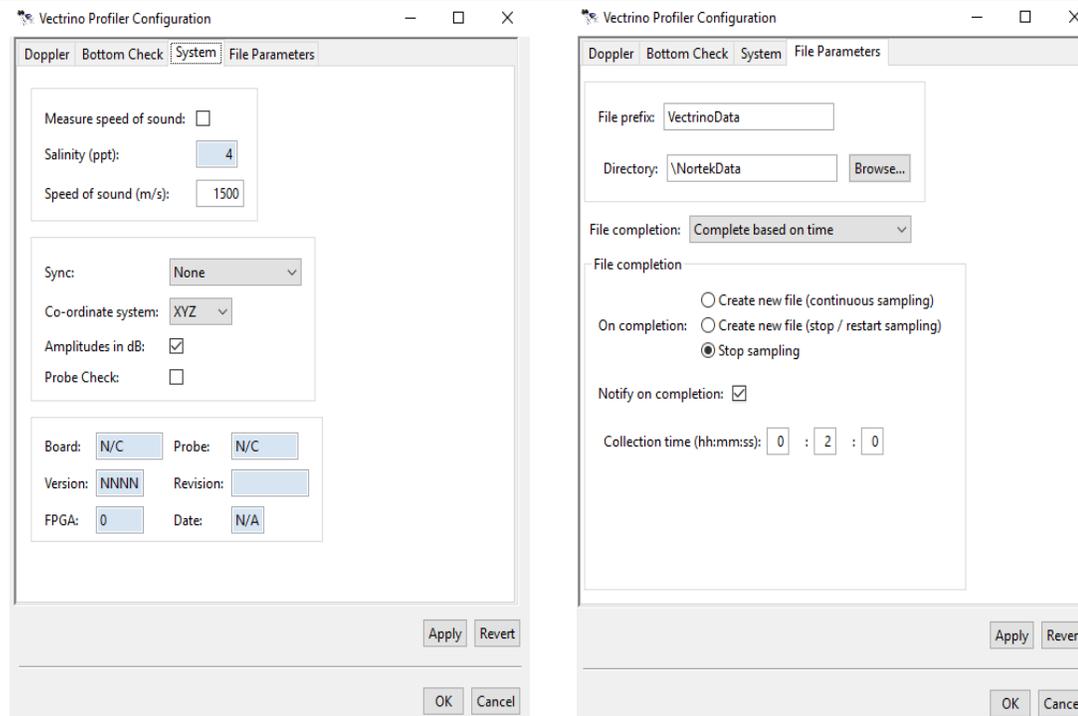
III.1.9.2 Configuración del ADV

La configuración del ADV es parte esencial en la fiabilidad de adquisición de los datos para su posterior análisis y presentación de resultados. Como se describió en la sección anterior el acceso a las opciones de configuración se hace desde el menú de herramientas. La configuración del equipo queda indicada en la Figura 51, es de mencionar que la configuración varia en algunos parámetros dependiendo del escenario a medir el cual se basa en la acumulación de material leñoso que estemos utilizando.



(A) Configuración principal

(B) Configuración de medición del fondo



(C) Configuración del sistema coordinado.

(D) Configuración del almacenamiento de los archivos.

Figura 51. Configuración general del Vectrino Profiler.

En la configuración principal (ver Figura 51A) se establece la frecuencia de muestreo que en todos los ensayos se mantiene en 100 Hz, la magnitud de la velocidad esperada se ajusta dependiendo del experimento que se lleve a cabo, el rango de muestreo que va de los 40 mm a los 70 mm y por último el algoritmo que va a depender de la condición de flujo que se tenga, en el caso del adaptativo se recomienda cuando se presentan puntos débiles en el perfil, el intervalo mínimo se recomienda en el análisis de estructuras turbulentas y el intervalo máximo es recomendable en flujos laminares.

En la configuración de medición del fondo (ver Figura 51B) se hacen los ajustes para la medición de la distancia al fondo, la frecuencia de muestreo se puede seleccionar de 1 a 10 Hz, la distancia del fondo varía dependiendo el tirante que se tenga, en la sección “III.1.6 Condiciones de flujo” se establecen los tirantes usados en la modelación física.

En la configuración del sistema coordinado (ver Figura 51C) se puede seleccionar el sistema coordinado, sin embargo, no es recomendable realizar cambios en esta sección por cuestiones de estabilidad en el funcionamiento del equipo.

En la configuración del almacenamiento de los archivos (ver Figura 51D) se configura la ruta de almacenamiento de los archivos y la condición de guardado que puede ser: detener manualmente, basado en un tiempo, en un número de muestras o en un tamaño del archivo.

III.2 Metodología

- **Paso 1:** Se instalan las pilas de manera longitudinal en el centro de la zona de visualización y de manera transversal a 1/3 tercio del claro. Se verifica la posición de las pilas con ayuda de un flexómetro y la inclinación con un nivel de burbuja, para obtener mejores resultados la posición y la verticalidad de las pilas es un tema muy importante. Con la ayuda de un travesaño en la parte superior se fijan las pilas a fin de evitar adicionar alguna otra estructura al interior del canal (ver Figura 52).

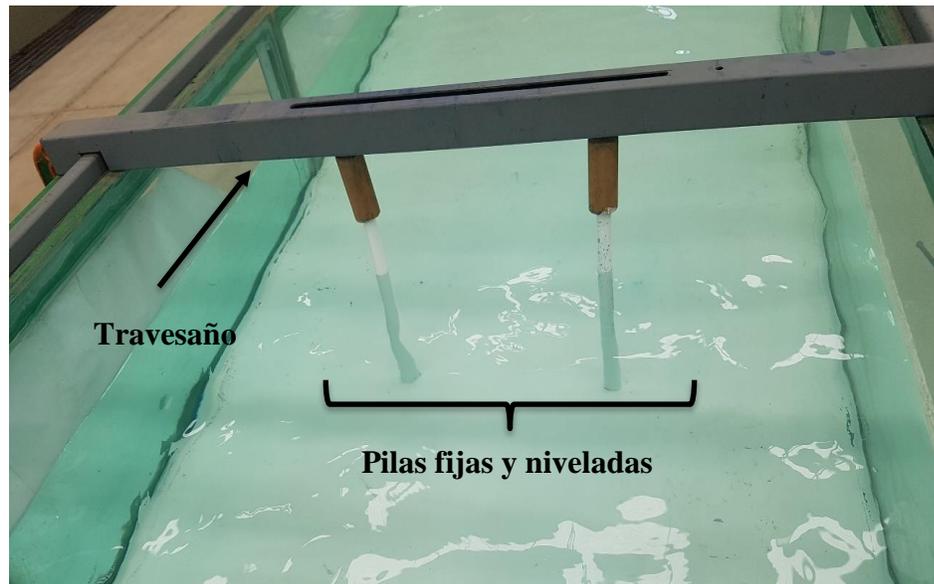


Figura 52. Instalación de pilas.

- **Paso 2:** Se coloca el dispositivo ADV en su base, se revisa su nivelación con la ayuda de un nivel de burbuja, el sensor se sujeta a un soporte que tiene en su parte superior una manivela con la que se regula su altura. El dispositivo se envolvió en una tela suave con la finalidad de que los cinchos no dejen marcas en el aparato (ver Figura 53).

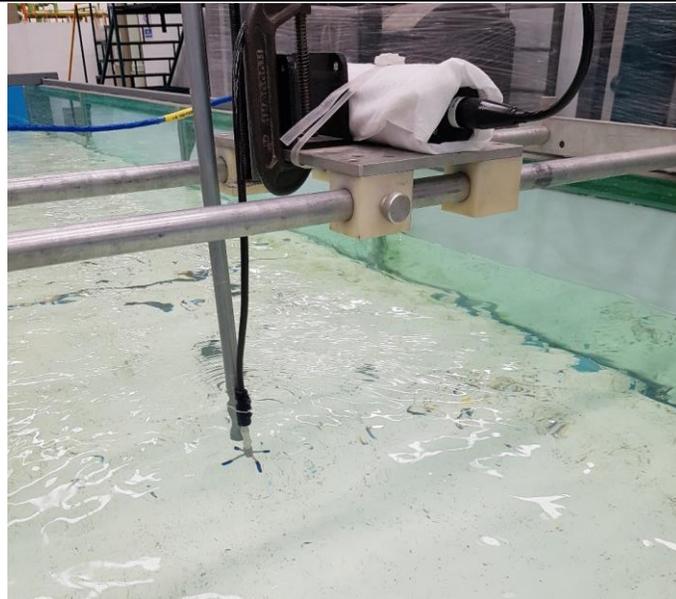


Figura 53. Instalación de dispositivo ADV.

- **Paso 3:** Se abren las válvulas para el llenado del tanque de almacenamiento una vez alcanzado el nivel de plantilla se cierran las válvulas para evitar que el flujo entre al canal. Se encienden las bombas para que el caudal comience a circular por el sistema de tuberías y llegue al canal. Se ajustan los tirantes con ayuda de la compuerta (ver Figura 54).



Figura 54. Tanque de almacenamiento lleno.

- **Paso 4:** Dependiendo del caso de estudio que se vaya a analizar (ver sección IV.1) se instalan las pilas y la forma de acumulación. Esperamos 5 minutos a que el flujo se normalice antes de iniciar con las mediciones (ver Figura 55).

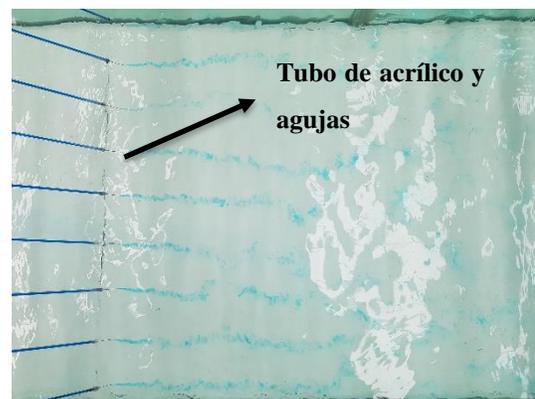


Figura 55. Forma de acumulación instalada y flujo circulando.

- **Paso 5:** Se llevan a cabo las pruebas con trazador (azul de metileno) con el fin de visualizar las líneas de trayectoria. El azul de metileno fluye a través de unas agujas adaptadas en tubos de acrílico que están unidos a unos tubos de PVC que permiten el flujo del trazador desde un recipiente que lo almacena (ver Figura 56).



(A) Mecanismo de inyección de tinta.



(B) Visualización de líneas de trayectoria.

Figura 56. Mecanismo de inyección de tinte para pruebas con trazador.

- **Paso 6:** La adquisición de datos de velocidad se lleva a cabo en diferentes zonas de medición definidas en la sección IV.1 (revisar las zonas de medición de acuerdo

con el caso de estudio). El dispositivo ADV se configura para medir un perfil de 30 mm, con un tiempo de grabación de 3 minutos a una frecuencia de 100 Hz, teniendo 18,000 datos en cada 1 mm de perfil. La configuración se determinó a partir de pruebas preliminares donde con una menor cantidad de datos se presentaban zonas de inconsistencia al momento de graficar los datos ocasionado por el ruido que ingresa al sistema las pilas y la acumulación de material.

- **Paso 7:** Los datos se exportan a un archivo “. mat”.
- **Paso 8:** Los datos se filtran con un análisis estadístico para eliminar los valores más alejados de la media de la muestra, a fin de asegurar un nivel de confianza del 95% en la muestra.
- **Paso 9:** Se utilizó el software MATLAB R2013a para el procesamiento de los datos filtrados y su representación en graficas.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS

Para el desarrollo de las pruebas en laboratorio en la sección “III.1.6. Condiciones de flujo”, se describen las condiciones de gasto, velocidad y tirante asociados a sus respectivos números de Froude. Para cada número de Froude se realizaron tres escenarios de análisis el primero sin obstáculos, el segundo con pilas y el tercero con pilas y acumulación de material leñoso en la sección “III.1.7 Geometrías de acumulación de material leñoso”, se explica el dimensionamiento de las formas de acumulación con base en el estudio hecho por Lagasse *et al.*, (2010), se destaca que la relación entre el alto de la acumulación de material leñoso está en función de la mitad del tirante.

Se llevaron a cabo en total 100 pruebas para ambas condiciones de flujo, para identificar los valores de velocidad más representativos en cada uno de los puntos de medición. En la Tabla 11 se muestran las características hidráulicas de las dos condiciones de flujo simuladas.

Tabla 11. Condiciones de flujo simuladas en laboratorio.

Identificador	Tirante (m)	Gasto (m ³ /s)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Fr
CPN_01	0.12	0.05	0.12	0.43	0.40
CPN_02	0.30	0.05	0.29	0.17	0.10

IV.1 Descripción de las pruebas

IV.1.1 Condición de flujo $Fr=0.40$

Para la primera condición de flujo se presentan los escenarios de análisis que se resumen en la Tabla 12.

Tabla 12. Escenarios de análisis para el caso CPN_01.

Escenario	CPN_01		Forma de acumulación
	Tirante (m)	Pilas (piezas)	
PC-CPN_01	0.12	N.A.	N.A.
SC-CPN_01	0.12	2	N.A.
TC-CPN_01	0.12	2	Rectangular

* N.A.=No aplica

IV.1.1.1 Escenario PC-CPN_01

El primer escenario corresponde a un cauce sin estructuras de cruce o alguna obra que interfiera el flujo y sin problemas de acumulación de material leñoso, similar al flujo del cauce que se muestra en la Figura 57.



Cauce natural. Fuente: (Wikipedia, Río Pardo (São Paulo), 2014)



Canal experimental.

Figura 57. Condición de flujo sin obstrucciones ni acumulación, en el canal experimental y en un cauce natural.

Se llevaron a cabo pruebas de trazador con inyección de tinta para visualizar las líneas de traza a lo largo del canal. Anteriormente la plantilla del canal estaba pintada de color azul,

pero al llevar a cabo las pruebas el azul de metileno no se apreciaba por el color del fondo, por lo que se optó por pintar la plantilla de color blanco para que este hiciera contraste con el trazador. En la Figura 58 se visualiza la prueba con trazador para el escenario PC-CPN_01.

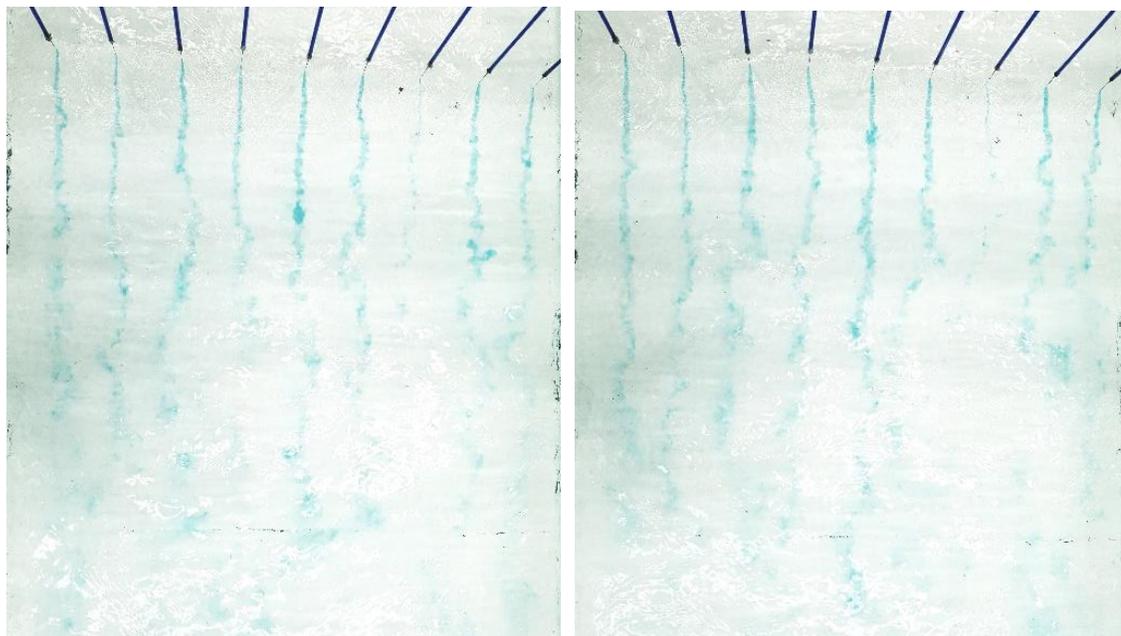


Figura 58. Pruebas con trazadores escenario PC-CPN_01.

En la Figura 58 se observa un flujo uniforme ya que el tirante es el mismo en cada sección del canal y se aprecia que no existe una mezcla del trazador por lo que las partículas tienen una trayectoria perfectamente definida.

Se llevo a cabo la adquisición de datos de velocidad en cinco zonas de medición localizadas en la zona central del canal experimental y separadas a una distancia de 0.20 m, esto con el fin de comparar las velocidades en diferentes secciones (ver Figura 59).

De manera trasversal el canal se dividió en una serie de dovelas donde se midieron los perfiles de velocidad, las dovelas tienen una separación de 0.10 m entre ellas y hay una separación de 0.035 m con respecto de la pared del canal, esto se debe a que los sensores del ADV no permiten colocarlo más pegado a la pared (ver Figura 60).

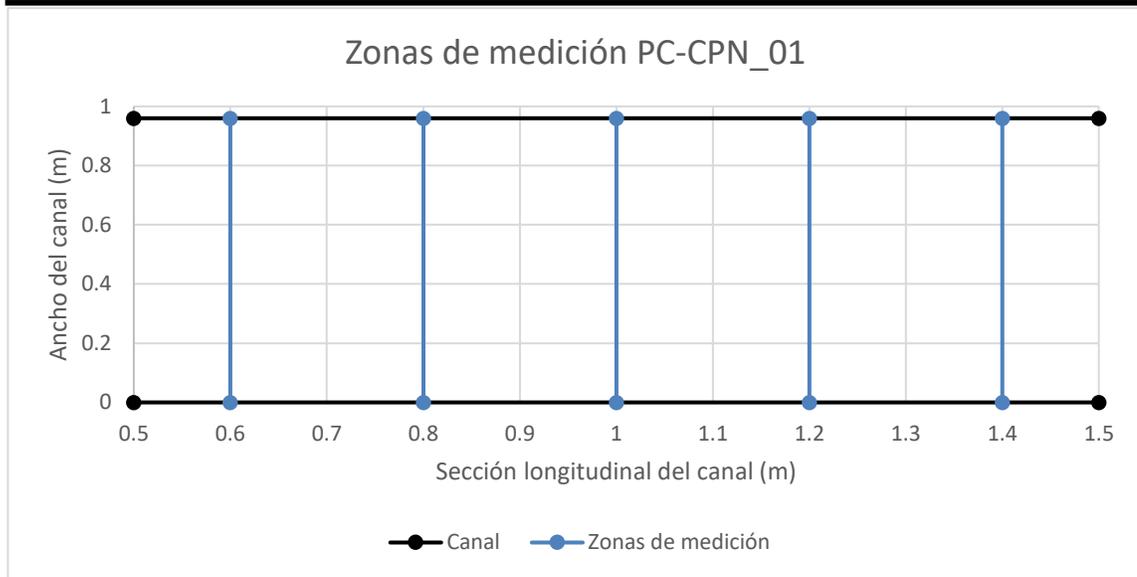


Figura 59. Zonas de medición escenario PC-CPN_01.

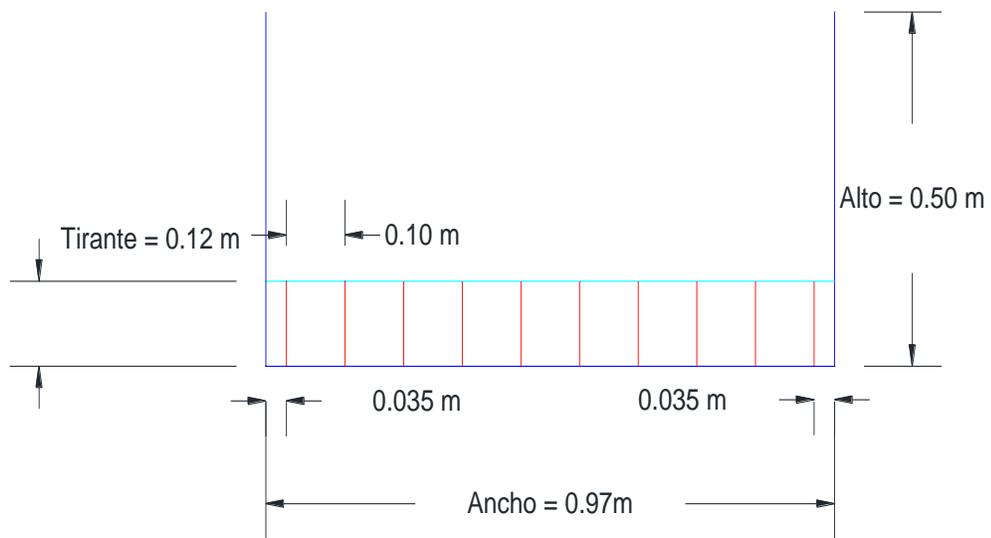


Figura 60. Dovelas escenario PC-CPN_01.

Se midieron los datos de velocidad en cada una de las dovelas (ver Figura 61).



Figura 61. Adquisición de datos de velocidad escenario PC-CPN_01.

Los datos obtenidos se exportaron en extensión “.mat” para su análisis, se generaron las curvas de igual velocidad del escenario PC-CPN_01 (ver Figura 62).

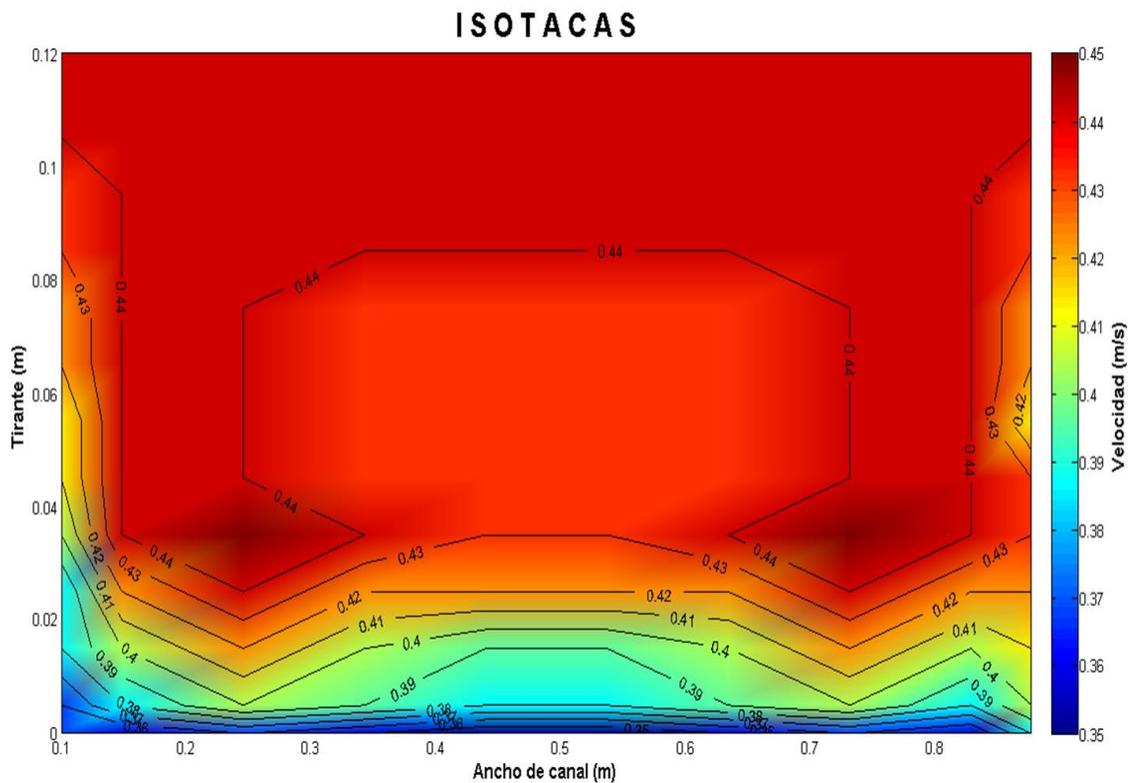


Figura 62. Curvas de igual velocidad del escenario PC-CPN_01.

De acuerdo con la Figura 62 se observa que la $V_i = 0.43 \text{ m/s}$. Se aprecia el efecto de las fronteras, la velocidad decrece conforme nos vamos acercando a la plantilla y a las paredes del canal. Las velocidades cercanas a la plantilla rondan los 0.35 m/s un descenso del 23% comparándola con la velocidad media del canal y cerca de las paredes se tiene una diferencia del 8%, esta diferencia entre las velocidades en la frontera se debe a que podemos medir los datos de velocidad cercanos a la plantilla del canal mientras que en las paredes los sensores del ADV evitan que nos acerquemos a medir en esta zona.

IV.1.1.2 Escenario SC-CPN_01

El segundo escenario se colocan dos barros en el canal experimental simulando las pilas de un puente (ver Figura 63).



Cauce natural con un puente con pilas. Fuente:
(Masmarr, 2017)

Canal experimental y modelo de pilas de puente.

Figura 63. Condición de flujo con pilas en el canal experimental y en un cauce natural.

Se llevaron a cabo pruebas con trazadores con el objetivo de visualizar los cambios en las líneas de traza por el efecto de las pilas (ver Figura 64).

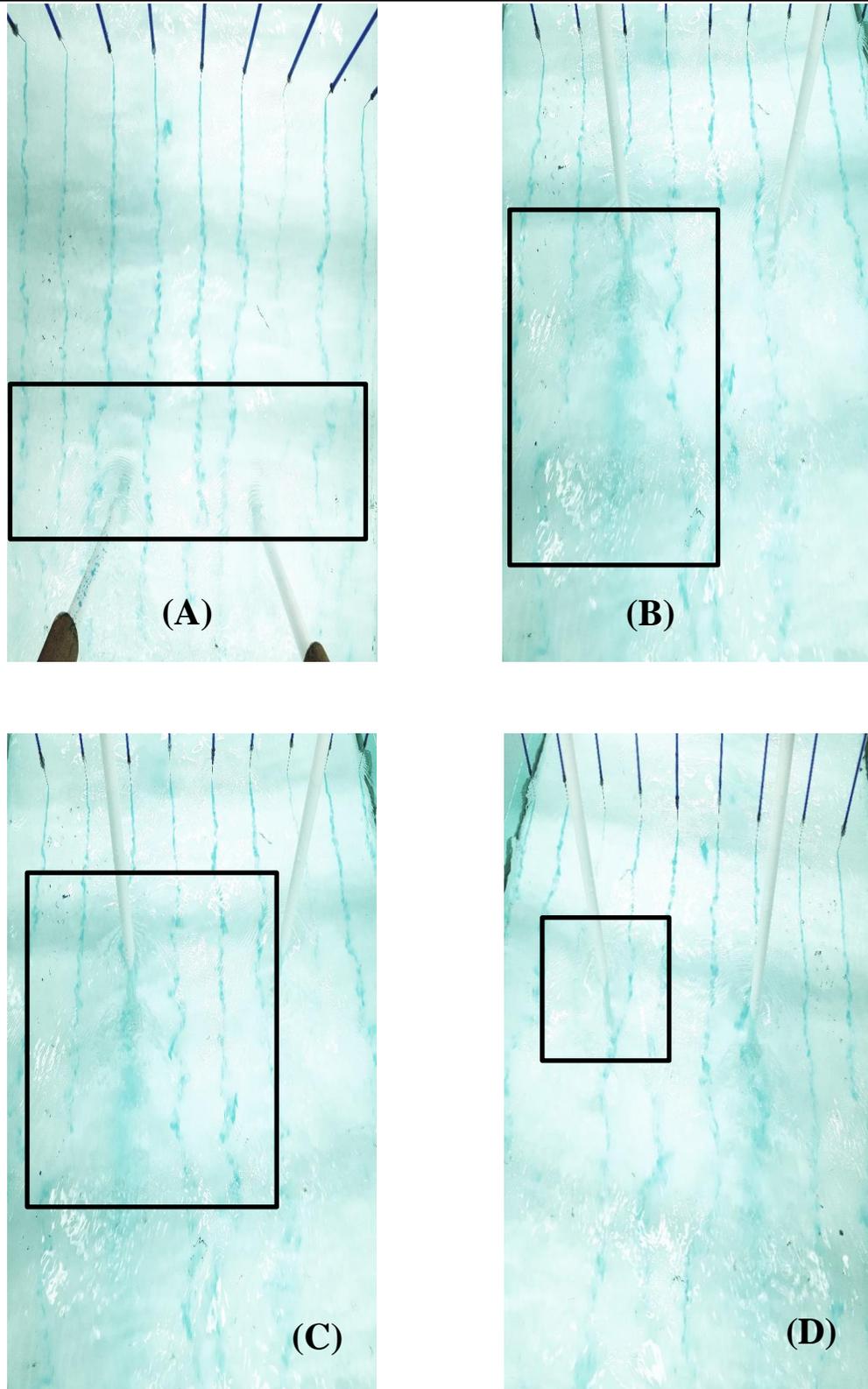


Figura 64. Pruebas con trazadores escenario SC-CPN_01.

Como se aprecia en la Figura 64A aguas arriba el efecto de las pilas es mínimo siendo que los efectos más fuertes se generan aguas abajo. El flujo al chocar con la cara de la pila se divide, lo que genera velocidades superficiales mayores como se observa en la Figura 64B y gráficamente en la Figura 68 - 70. En la Figura 64C se observa que superficialmente la división de flujo se extiende varios centímetros aguas abajo y la figura 64D muestra con ayuda del trazador como el flujo tiende a rodear la pila.

Se establecieron las zonas de medición a una distancia de 0.05, 0.10 y 0.15 m aguas abajo de las pilas (ver Figura 65).

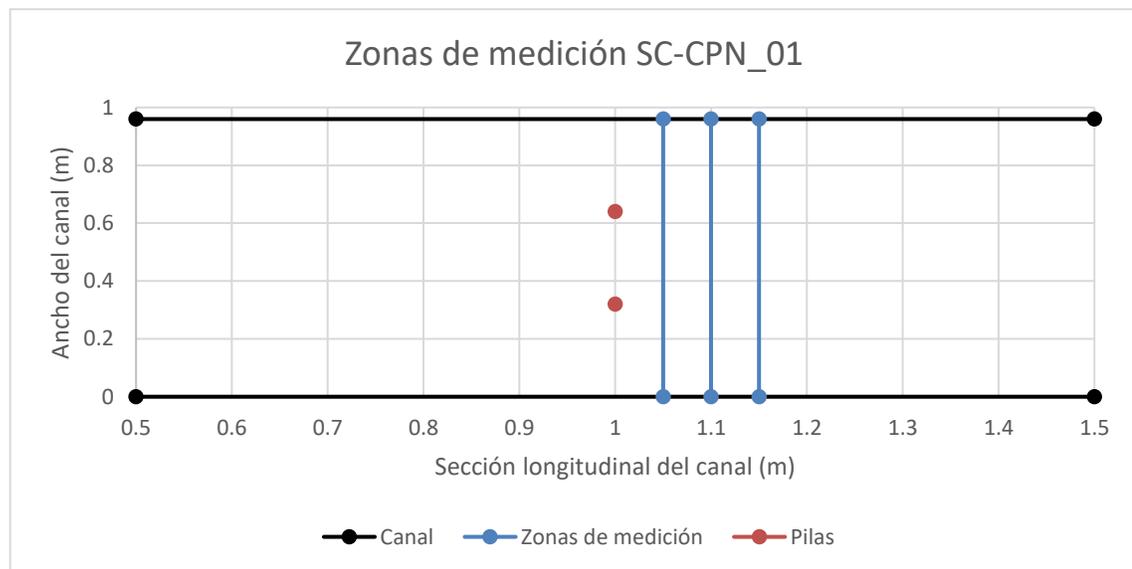


Figura 65. Zonas de medición escenario SC-CPN_01.

Con las zonas de medición definidas se procedió al seccionamiento por dovelas (ver Figura 66) para la adquisición de datos con ayuda del ADV Vectrino Profiler (ver Figura 67). Como se puede apreciar en la Figura 66 la cuarta y séptima dovela quedan frente a la cara aguas abajo de las pilas.

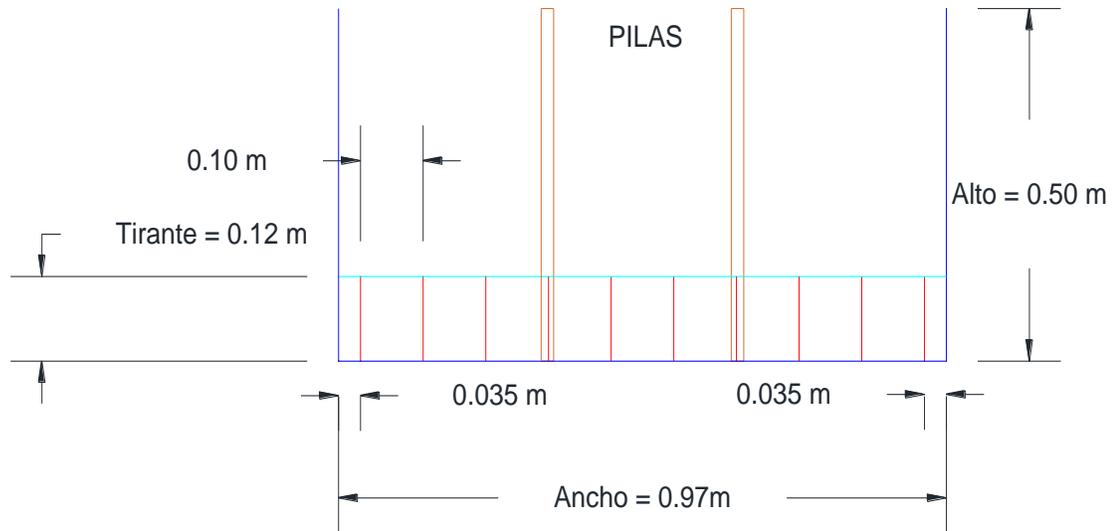


Figura 66. Dovelas escenario SC-CPN_01.



Figura 67. Adquisición de datos de velocidad escenario SC-CPN_01.

Se procesan los datos y se generan las curvas de igual velocidad de las tres secciones (ver Figura 68, 69 y 70), las pilas se añaden a las imágenes como referencia (línea blanca punteada).

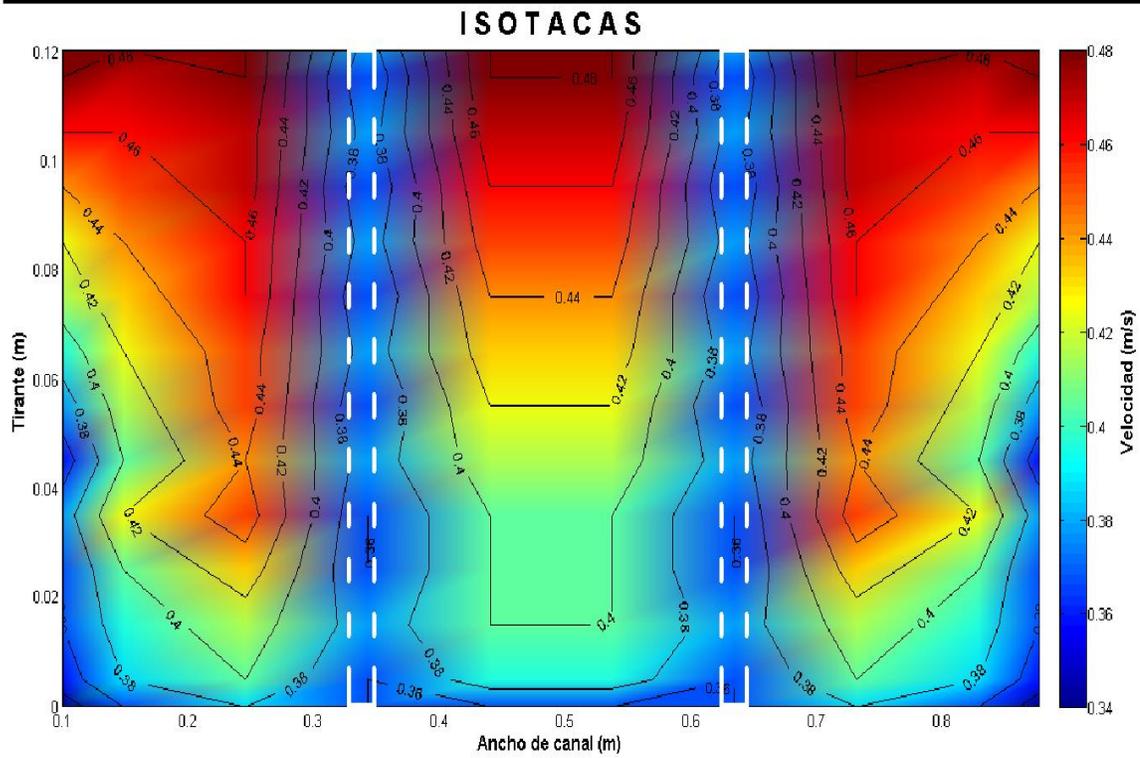


Figura 68. Curvas de igual velocidad a 0.05 m aguas abajo de las pilas del escenario SC-CPN_01.

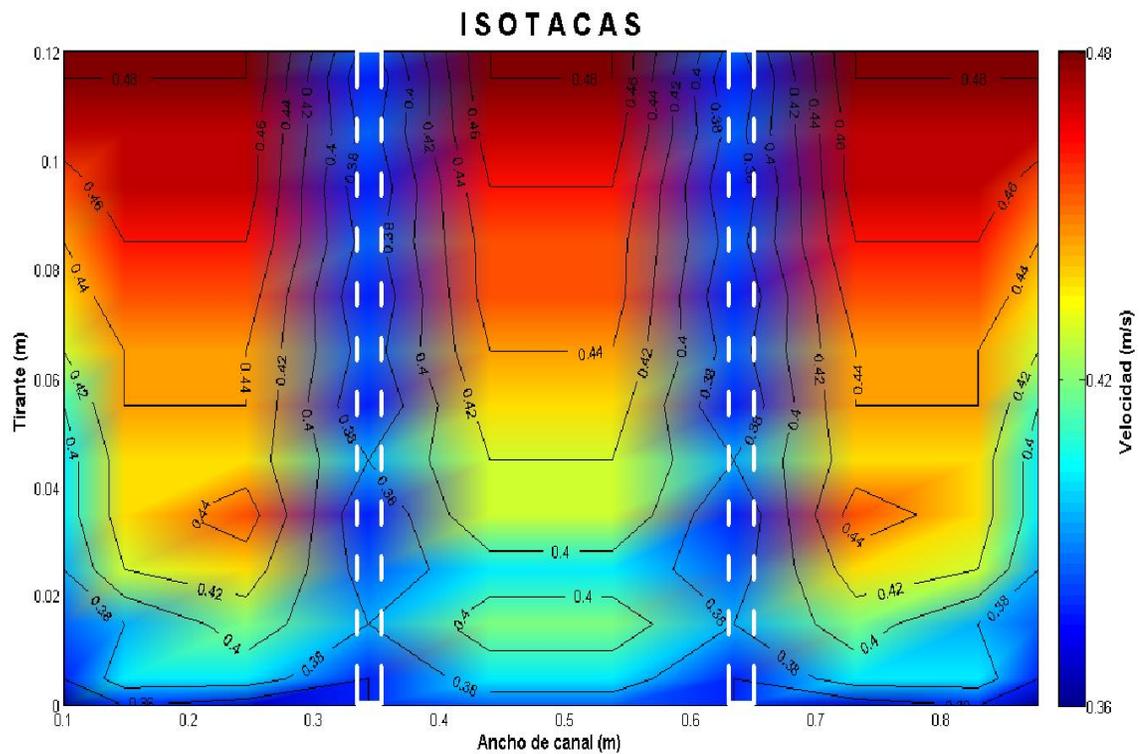


Figura 69. Curvas de igual velocidad a 0.10 m aguas abajo de las pilas del escenario SC-CPN_01.

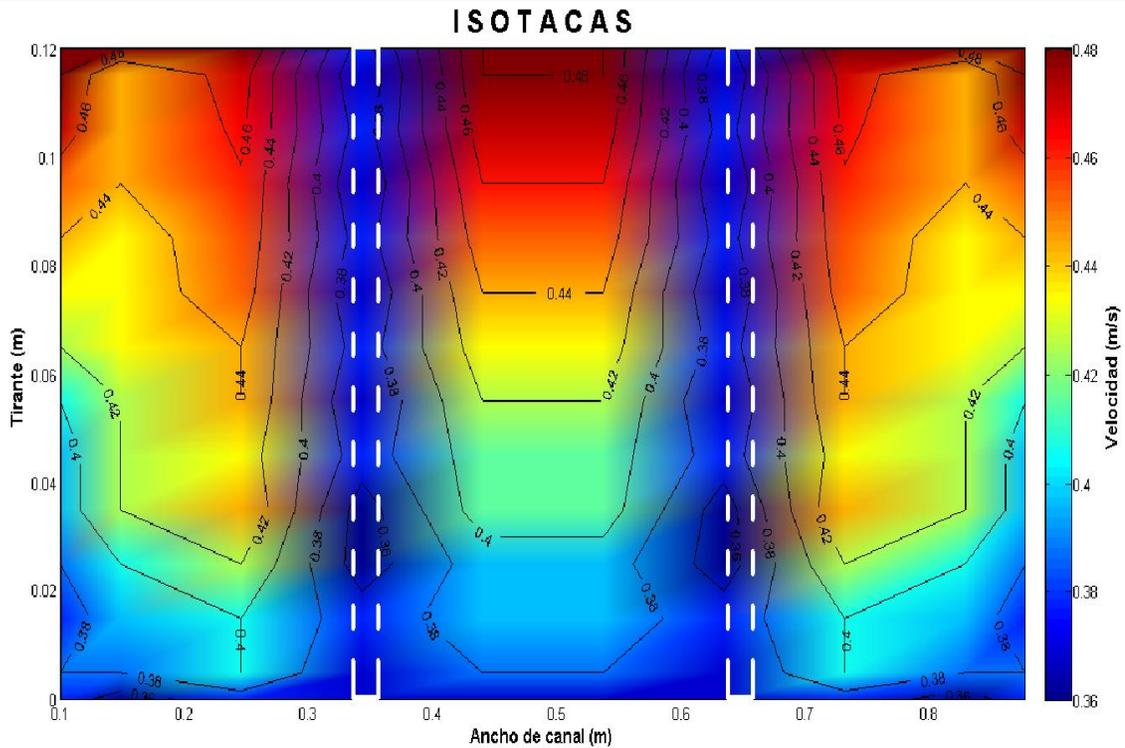


Figura 70. Curvas de igual velocidad a 0.15 m aguas abajo de las pilas del escenario SC-CPN_01.

Como se puede apreciar en las Figuras 68, 69 y 70 conforme se va alejando de la zona de influencia de las pilas las velocidades decrecen; por ejemplo, en la zona lateral en la Figura 68 se puede visualizar que las velocidades del orden de los 0.44 m/s se pueden localizar a una profundidad de hasta 0.04 m de la plantilla, mientras que para las secciones aguas abajo (ver Figuras 69 y 70) las mismas velocidades las encontramos a una profundidad de 0.06 y 0.08 m respectivamente. En las tres zonas de medición es evidente el efecto de las fronteras tanto de las paredes como de la plantilla, donde se observan velocidades de menor magnitud. Se aprecia que en la zona aguas abajo de las pilas se tienen velocidades que varían en un rango de 0.36 a 0.40 m/s, esto se puede relacionar al efecto de los vórtices estela que se forman aguas abajo de la pila y que modifican la velocidad en la zona. La velocidad creció hasta los $V_e = 0.48 \text{ m/s}$, lo que significa un aumento del 12% con respecto de la $V_i = 0.43 \text{ m/s}$, del escenario PC-CPN_01 (sin pilas).

IV.1.1.3 Escenario TC-CPN_01

El tercer escenario se coloca la geometría de material leñoso en los barrotes simulando una acumulación en pilas de puente (ver Figura 71).

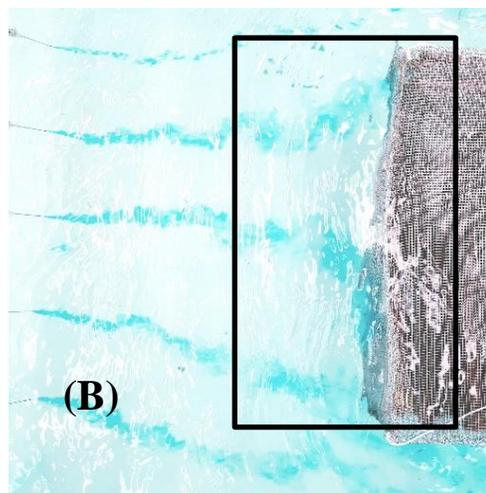
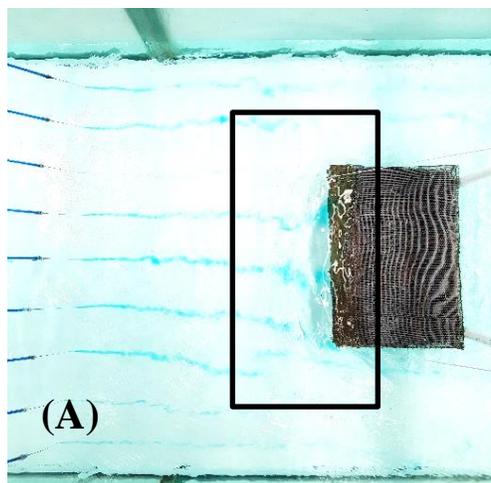


Cauce natural con acumulación de material leñoso en pilas de puente. Fuente: (Wikipedia, 2017)

Canal experimental y modelo de pilas de puente con acumulación de material.

Figura 71. Condición de flujo con acumulación de material en pilas, en el canal experimental y en un cauce natural.

Se efectuaron las pruebas con trazador para observar los cambios en las líneas de traza cuando se simula el material acumulado en las pilas (ver Figura 72).



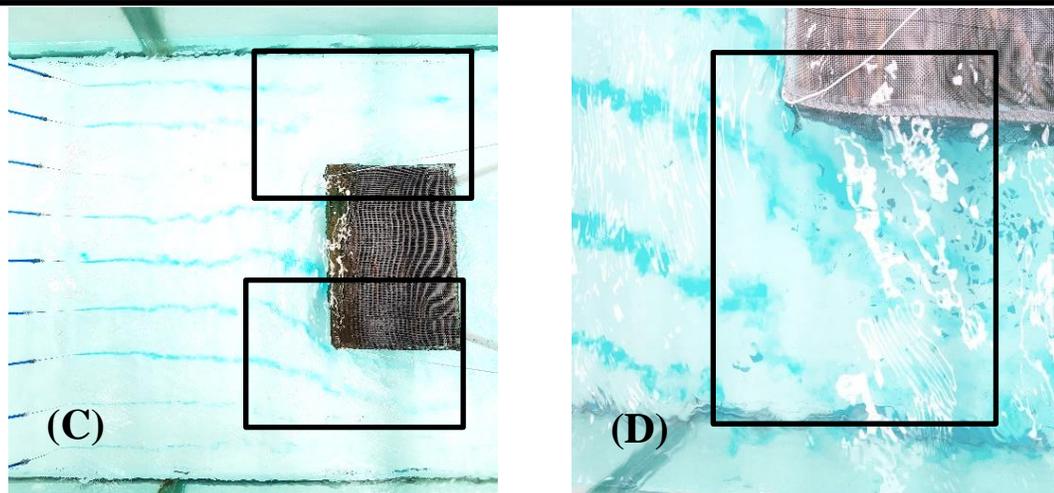
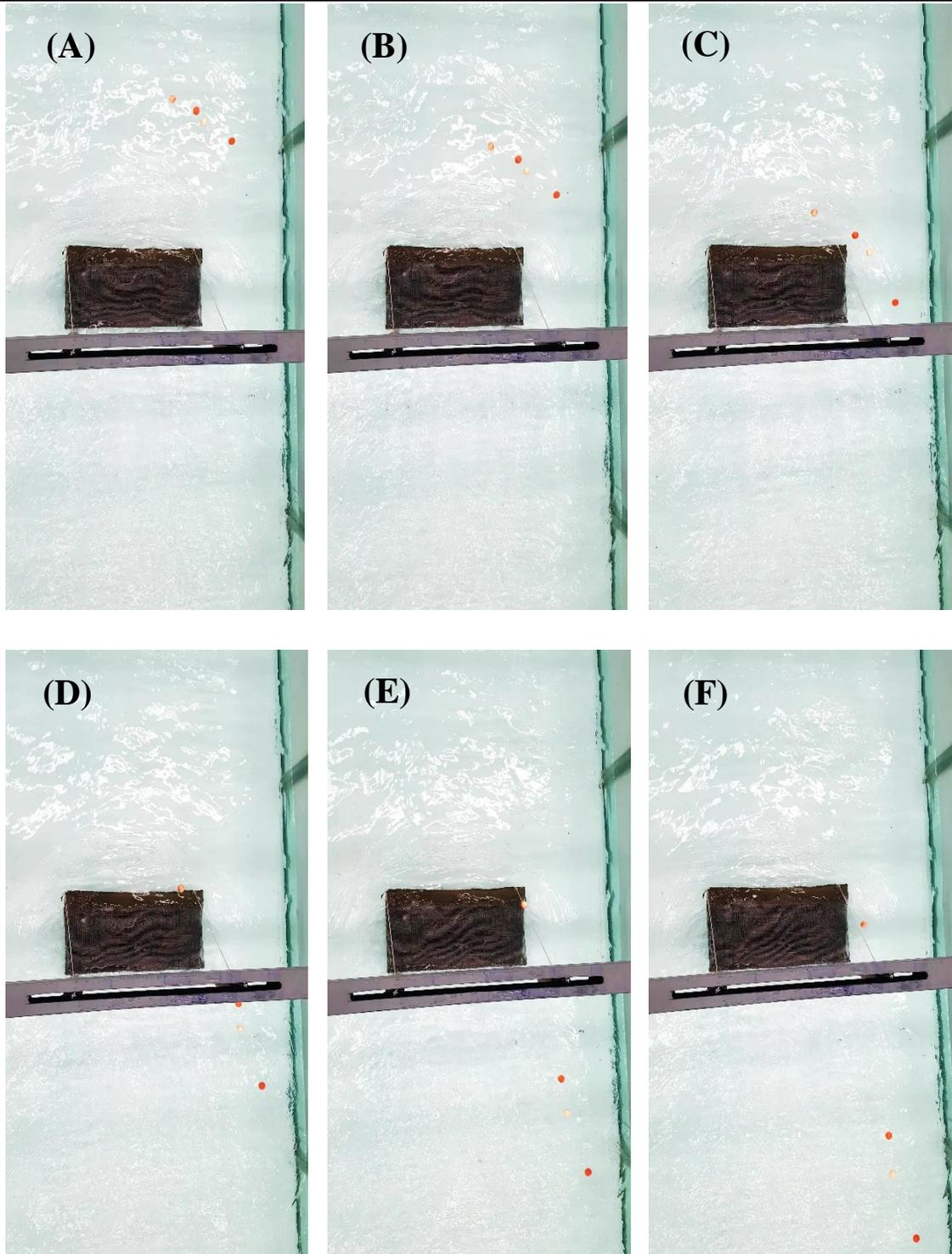
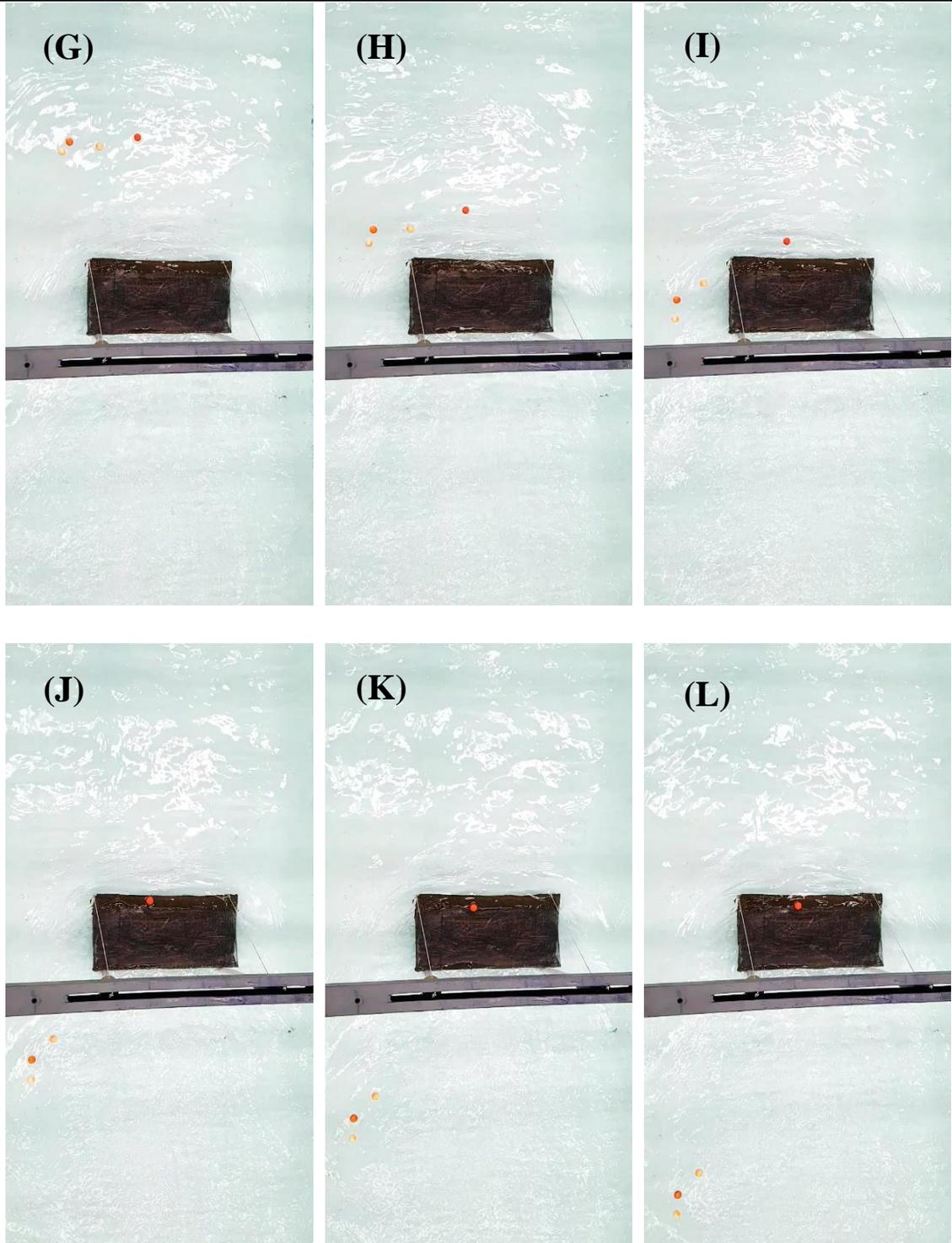


Figura 72. Pruebas con trazadores escenario TC-CPN_01.

Se observa en la Figura 72A como el flujo choca con la cara aguas arriba de la acumulación de material lo que provoca un descenso en la velocidad este efecto se hace más visible en la Figura 72B en donde se aprecia un estancamiento del flujo, caso contrario en los costados del material acumulado (ver Figura 72C) se aprecia un aumento considerable de la velocidad del flujo (ver Figura 72D) debido a la reducción del área hidráulica que provoca el material leñoso acumulado. Aguas abajo el flujo presenta una condición similar a la descrita aguas arriba, la zona frente a la cara aguas abajo presenta velocidades inferiores comparadas con los costados, esto se debe a que el flujo pierde velocidad como consecuencia por su paso a través del material.

Con la finalidad de observar el comportamiento del flujo desde aguas arriba hasta aguas abajo se llevaron a cabo pruebas con un trazador diferente, esferas de unicel, las cuales se adicionaron aproximadamente a 0.40 m aguas arriba de la cara aguas arriba de la acumulación de material leñoso a fin de observar su recorrido desde la sección aguas arriba hasta aproximadamente 0.60 m aguas abajo de las pilas (ver Figura 73).





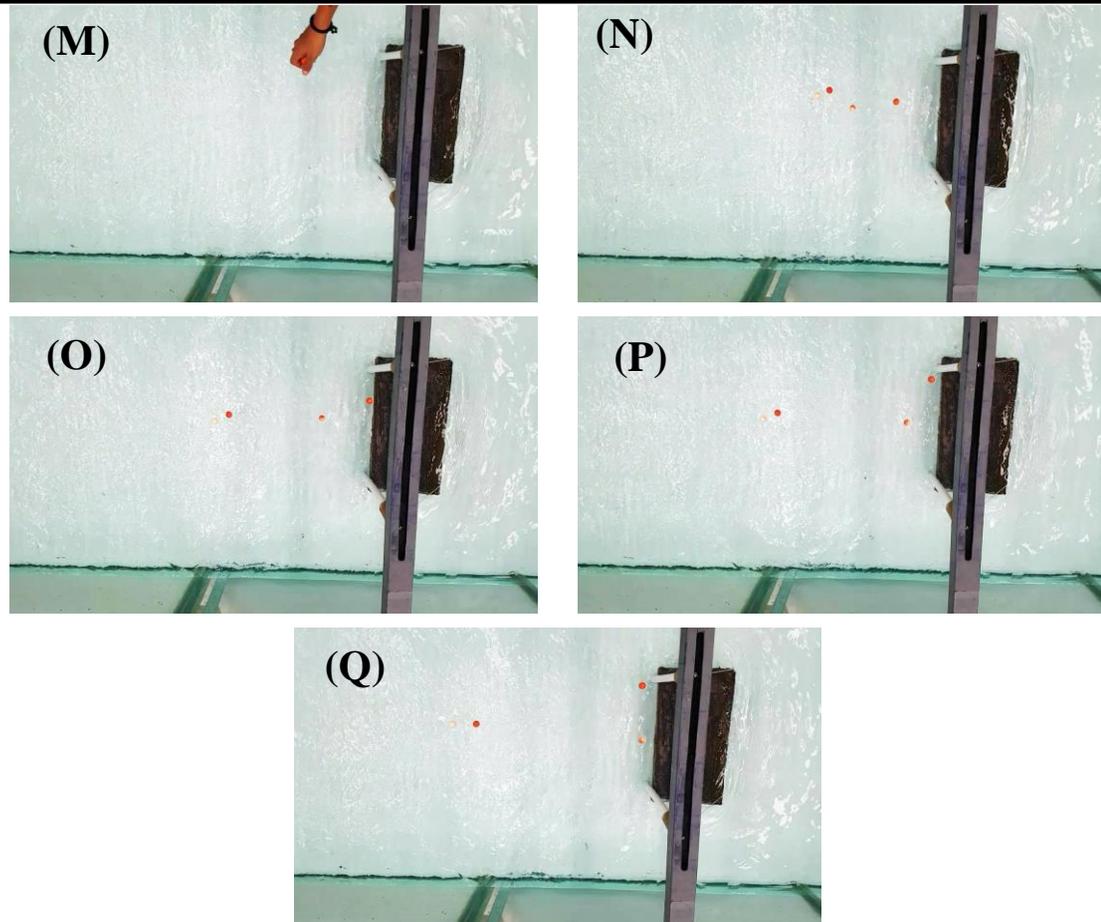


Figura 73. Pruebas con trazadores de unicel. Del inciso A al F la prueba se lleva a cabo en el lateral izquierdo, del inciso G al L en el lateral derecho y del inciso M al Q aguas abajo de la acumulación de material.

En la Figura 73 se observa como las esferas adquieren una mayor velocidad como consecuencia del flujo que se divide al chocar con la acumulación de material leñoso. Se observa que el flujo en los laterales tiene una velocidad mayor que la parte central. Se adicionaron las esferas a una distancia de 0.15 m aguas abajo de las pilas; dos de las esferas fueron llevadas aguas abajo por el flujo, pero con una velocidad mucho menor que si se encontraran en los laterales, por otro lado, las dos esferas restantes fueron retenidas por la vorticidad que hay en la zona (ver Figura 73 M – Q).

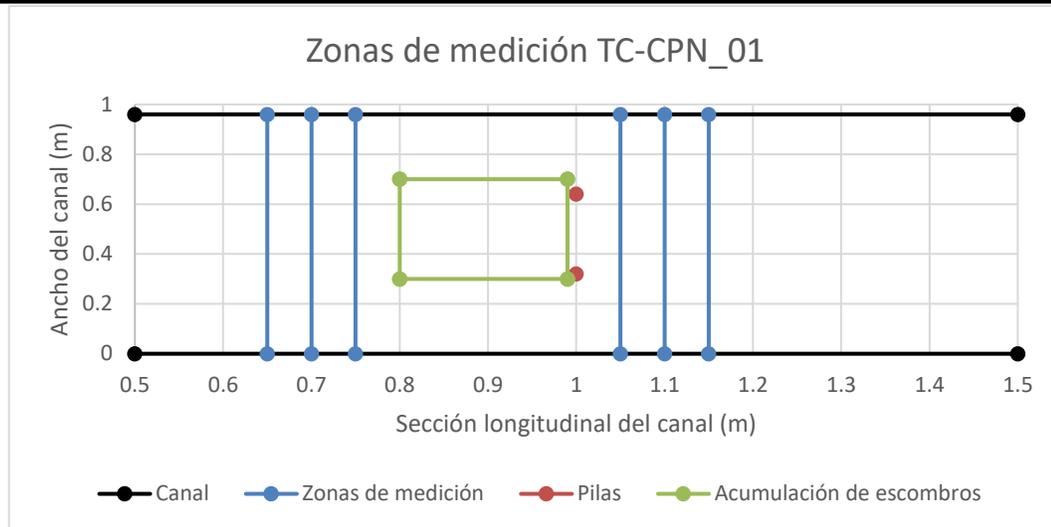


Figura 74. Zonas de medición escenario TC-CPN_01.

Las zonas de medición se establecieron 0.05, 0.10 y 0.15 m aguas abajo de las pilas y a 0.05, 0.10 y 0.15 m aguas arriba de la cara aguas arriba del material acumulado (ver Figura 74). En la Figura 75 se muestran las dovelas del escenario TC-CPN_01.

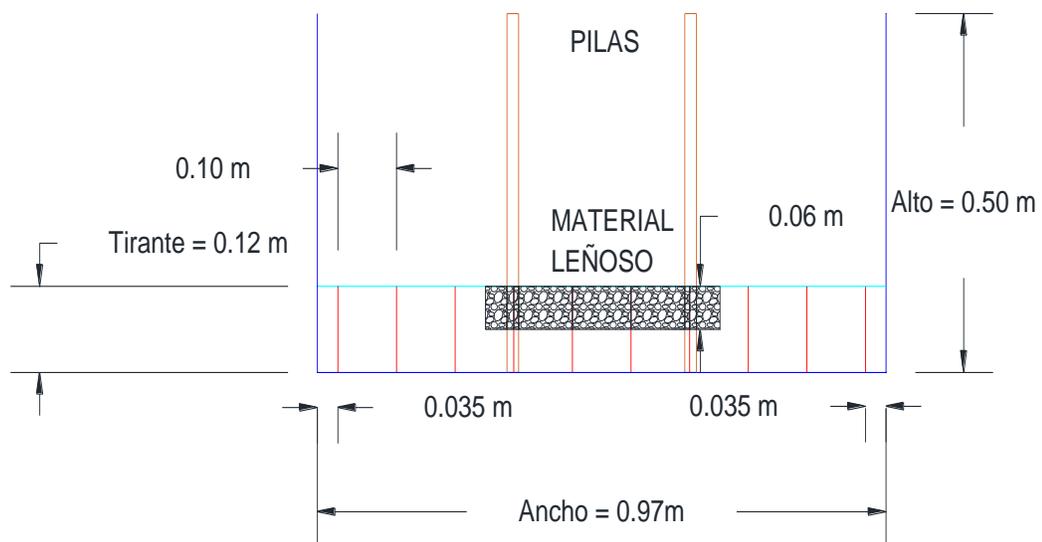


Figura 75. Dovelas escenario TC-CPN_01

Se procede a la medir los perfiles de velocidad como se muestra en la Figura 76.

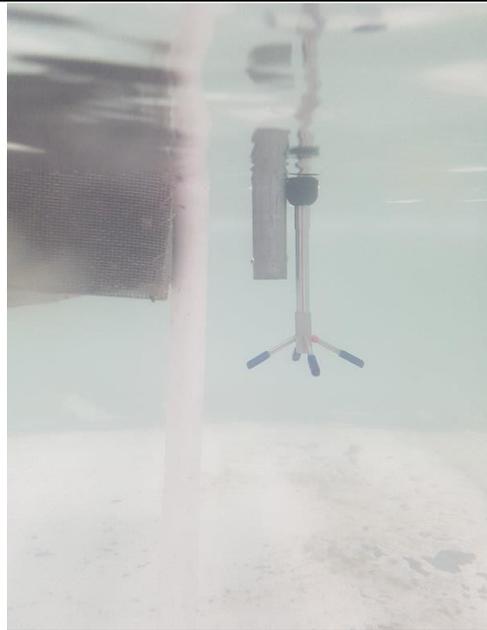


Figura 76. Adquisición de datos de velocidad escenario TC-CPN_01.

Una vez adquiridos los datos se procede a su análisis en MATLAB, de donde se obtienen las curvas de igual velocidad para las zonas de medición aguas arriba y aguas abajo (ver Figura 77 - 82), se añaden las pilas y la acumulación como referencia (línea punteada).

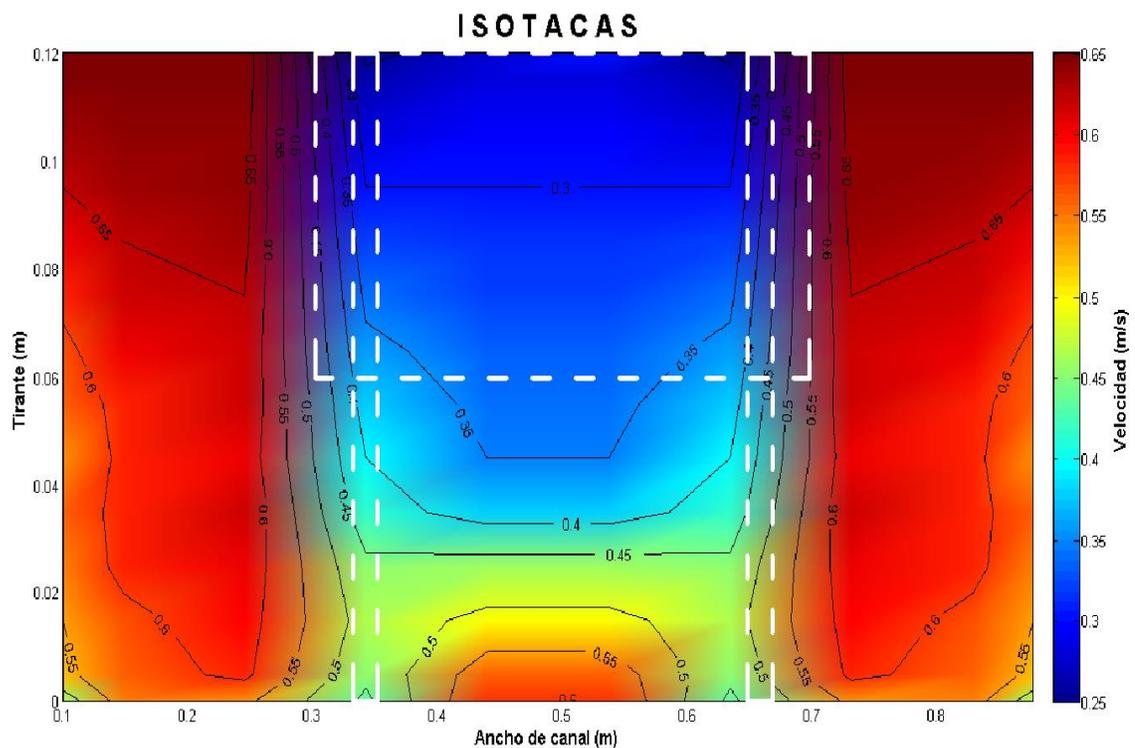


Figura 77. Curvas de igual velocidad a 0.05 m aguas abajo de las pilas del escenario TC-CPN_01.

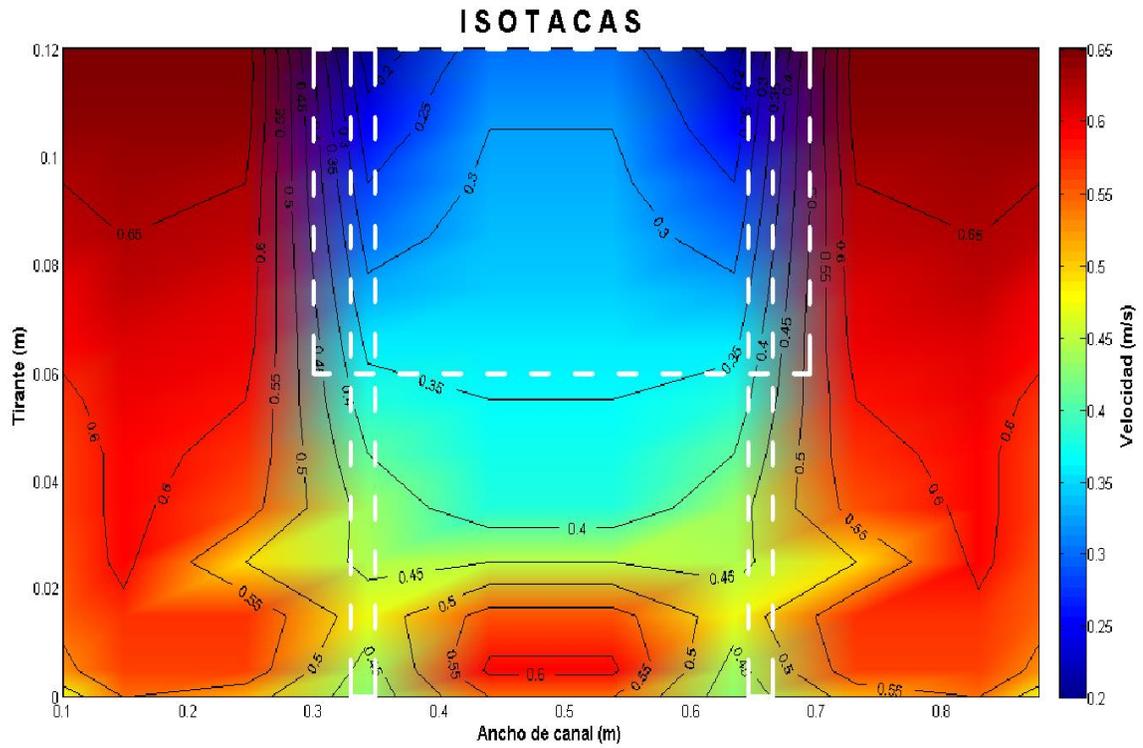


Figura 78. Curvas de igual velocidad a 0.10 m aguas abajo de las pilas del escenario TC-CPN_01.

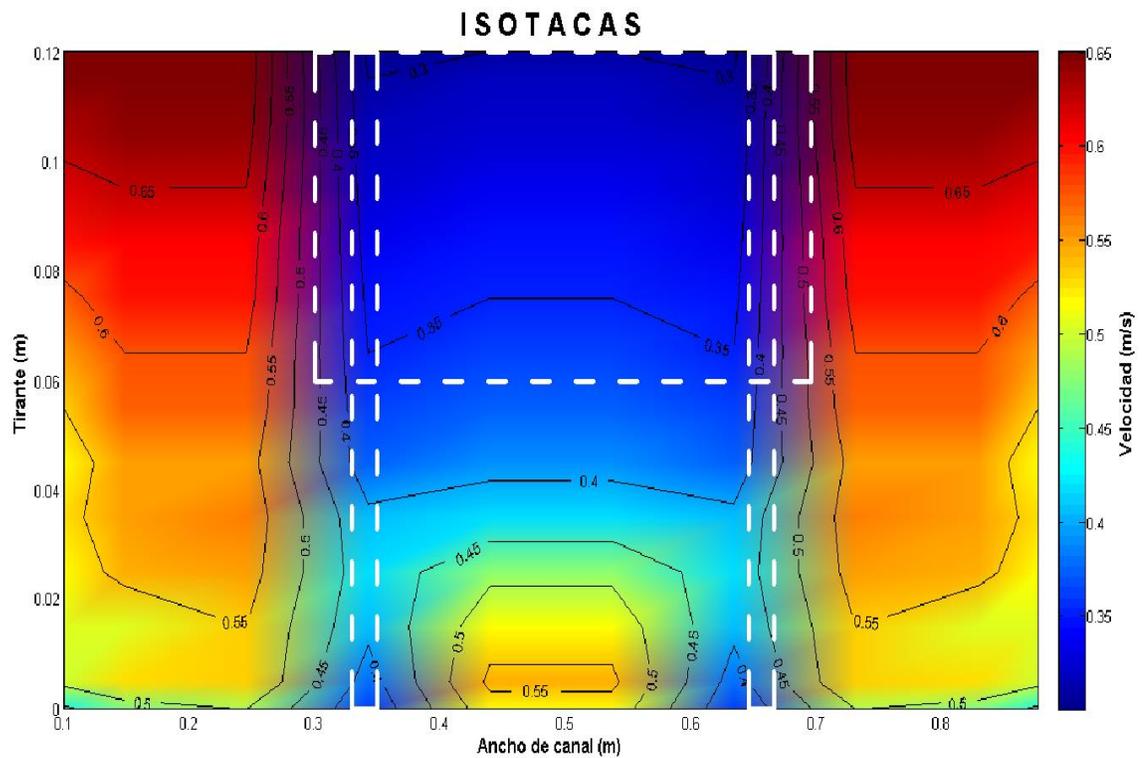


Figura 79. Curvas de igual velocidad a 0.15 m aguas abajo de las pilas del escenario TC-CPN_01.

Se puede observar que en los costados de la acumulación de material se presentan velocidades máximas de $V_w = 0.65 \text{ m/s}$, comparando con la $V_i = 0.43 \text{ m/s}$, el aumento es de un 51%, la V_w permanece sin alterarse incluso en la zona cercana a la pared del canal, donde el efecto de rugosidad influye menos como consecuencia de las altas velocidades. Si se compara la velocidad cercana al fondo que se tiene en este escenario contra el primer escenario de análisis se tiene una diferencia de hasta un 37%, esto denota por qué varios autores advierten que el proceso de socavación se ve potenciado por la acumulación de material.

Si comparamos el área hidráulica de la condición inicial ($A = 0.1164 \text{ m}^2$) con el área con material acumulado ($A_w = 0.0924 \text{ m}^2$), se tiene una reducción del 26% mientras que las velocidades aumentan en promedio un rango del 37 al 51%. Conforme se hacen mediciones aguas abajo se observa que las velocidades van disminuyendo, por ejemplo, en la Figura 77 la velocidad de 0.60 m/s se localiza arriba del 0.01 m de profundidad, en la Figura 78 la misma velocidad se encuentra arriba de los 0.02 m y en la Figura 79 hasta los 0.06 m de profundidad.

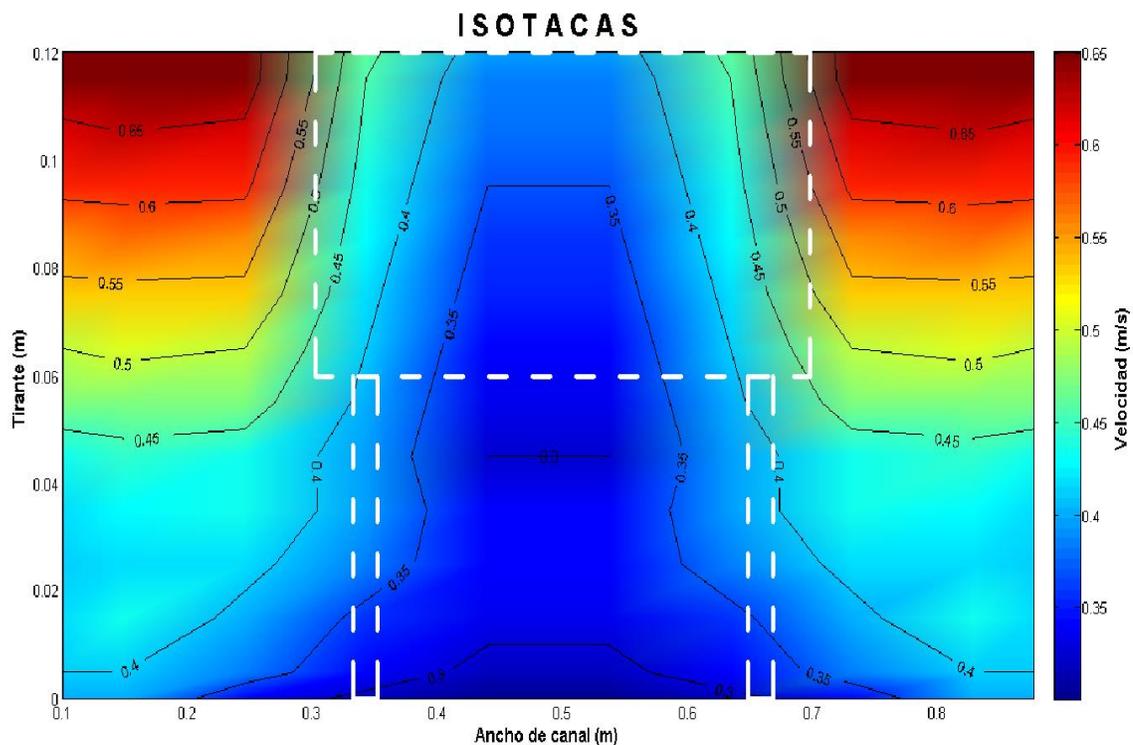


Figura 80. Curvas de igual velocidad a 0.15 m aguas arriba de la acumulación de material del escenario TC-CPN_01.

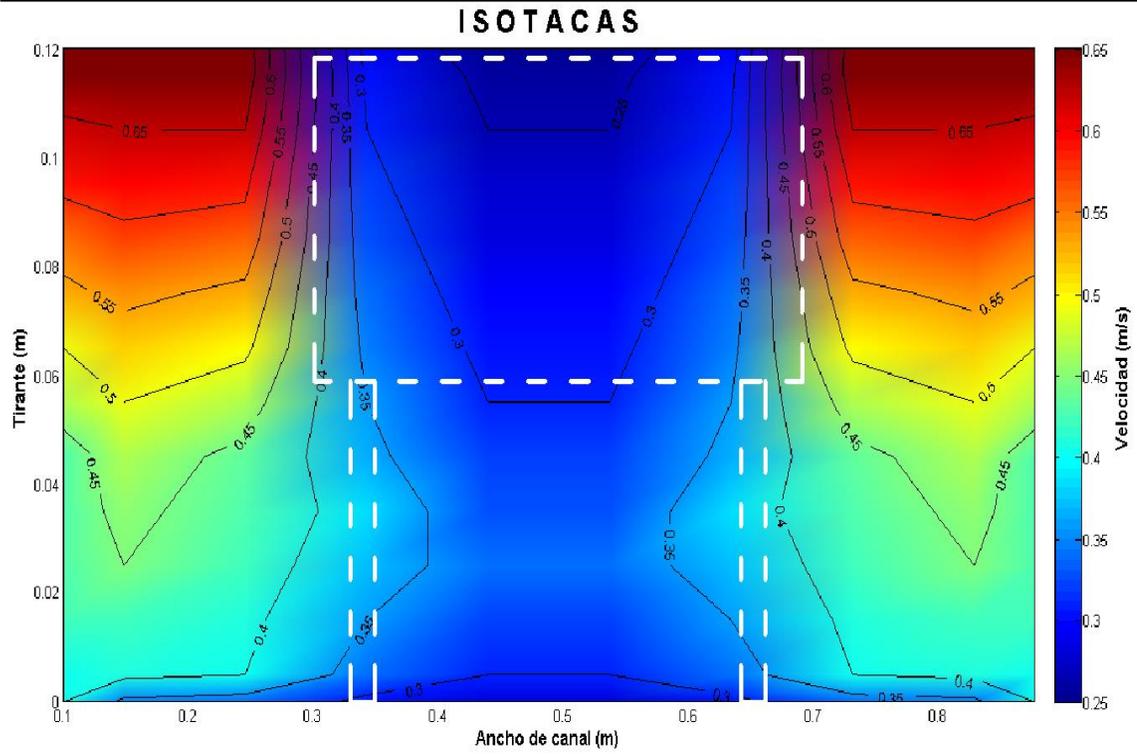


Figura 81. Curvas de igual velocidad a 0.10 m aguas arriba de la acumulación de material del escenario TC-CPN_01.

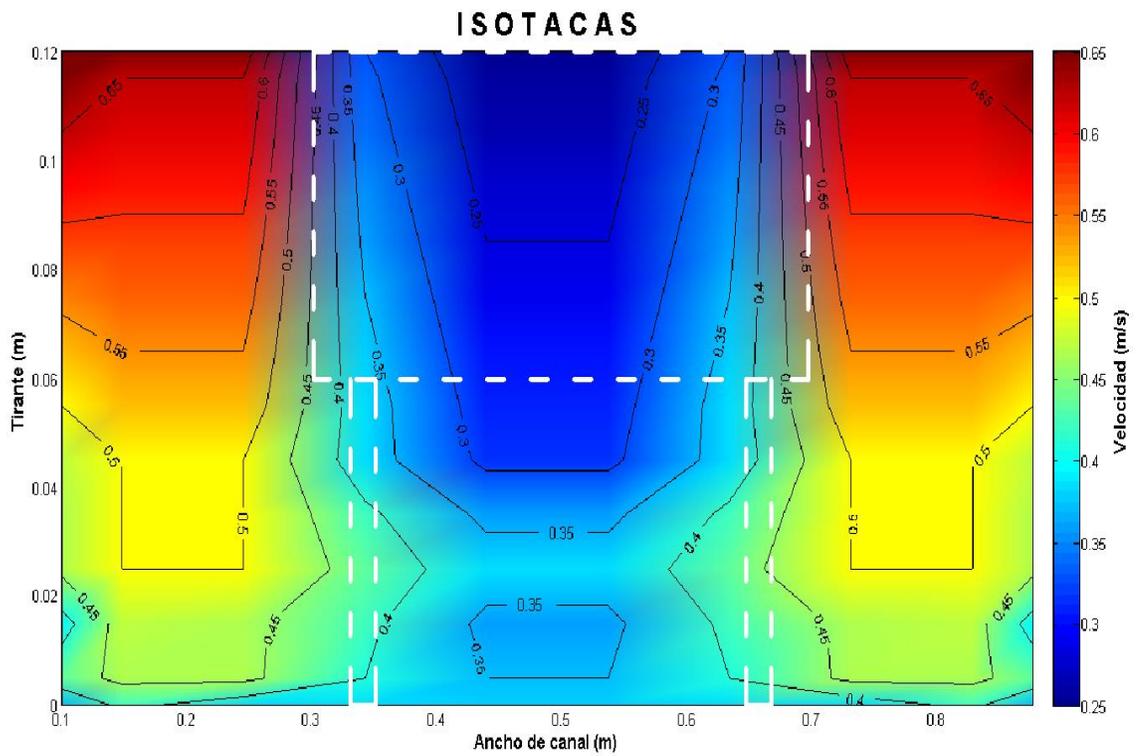


Figura 82. Curvas de igual velocidad a 0.05 m aguas arriba de la acumulación de material del escenario TC-CPN_01.

Aguas arriba a medida que el flujo se acerca a la acumulación de material va perdiendo velocidad, en la parte central se observa que las velocidades se concentran conforme el flujo está más cerca de los escombros, en la Figura 80 se aprecia que las velocidades que se localizan a la altura de la acumulación de material están en el rango de 0.40 – 0.45 m/s y decrecen a 0.25 – 0.30 m/s (ver Figura 82) conforme el flujo se aproxima cada vez más al material leñoso.

Aguas arriba el caudal que se aproxima en los costados de la acumulación va aumentando su velocidad, consecuencia de la reducción del área hidráulica. Por mencionar un caso se tiene que a una profundidad de 0.03 m de la plantilla (ver Figura 80) se presenta una velocidad del orden de 0.43 m/s, conforme el flujo avanza aguas abajo (ver Figura 81) la velocidad aumenta a 0.45 m/s y a la misma profundidad a una distancia de 0.05 m de la acumulación de material (ver Figura 82) esta velocidad crece hasta los 0.50 m/s. Es decir, en 0.15 m de distancia de una sección a otra la velocidad aumento un 16%.

IV.1.2 Condición de flujo $Fr=0.10$

Para la segunda condición de flujo se presentan los escenarios de análisis que se resumen en la Tabla 13.

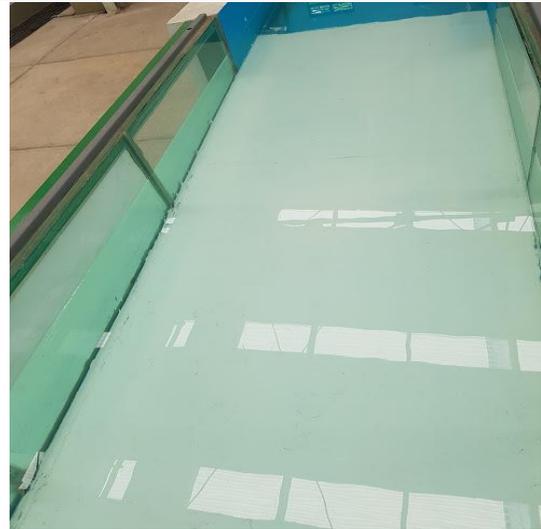
Tabla 13. Escenarios de análisis para el caso CPN_02.

Escenario	CPN_01	Fr=0.12	Forma de acumulación
	Tirante (m)	Pilas (piezas)	
PC-CPN_02	0.30	N.A.	N.A.
SC-CPN_02	0.30	2	N.A.
TC-CPN_02	0.30	2	Rectangular

* N.A.=No aplica

IV.1.2.1 Escenario PC-CPN_02

El primer escenario corresponde a un cauce sin estructuras de cruce o alguna obra que interfiera el flujo y sin problemas de acumulación de material leñoso, similar al flujo del cauce que se muestra en la Figura 83.



Cauce natural. Fuente: (Wikipedia, 2017)

Canal experimental.

Figura 83. Condición de flujo sin obstrucciones ni acumulación, en el canal experimental y en un cauce natural.

Las pruebas con trazador muestran un flujo uniforme sin cambios en su trayectoria (ver Figura 84).



Figura 84. Pruebas con trazadores escenario PC-CPN_02.

Se establecieron las zonas de medición (ver Figura 85) para obtener las velocidades del escenario sin estructuras de cruce en el canal experimental.

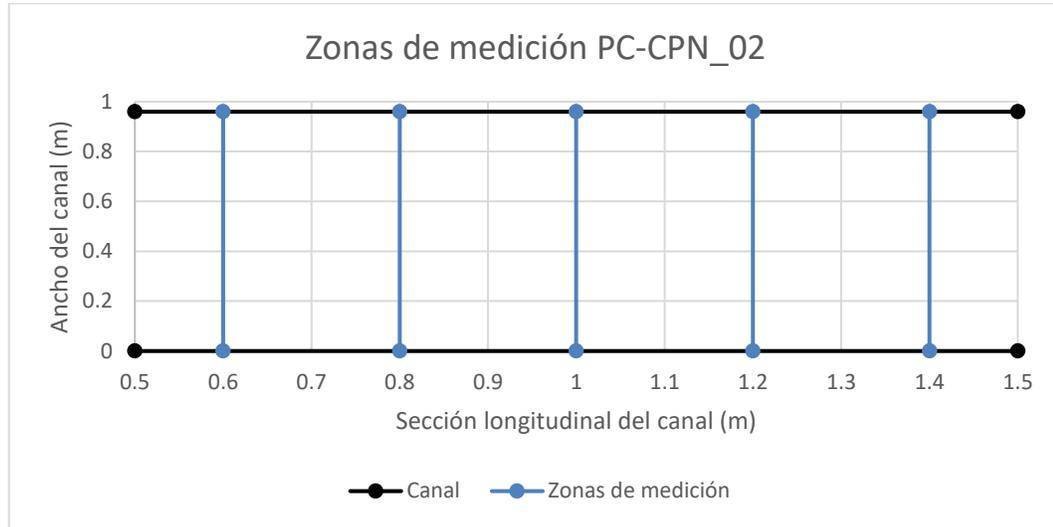


Figura 85. Zonas de medición escenario PC-CPN_02.

El canal se dividió en dovelas (ver Figura 86).

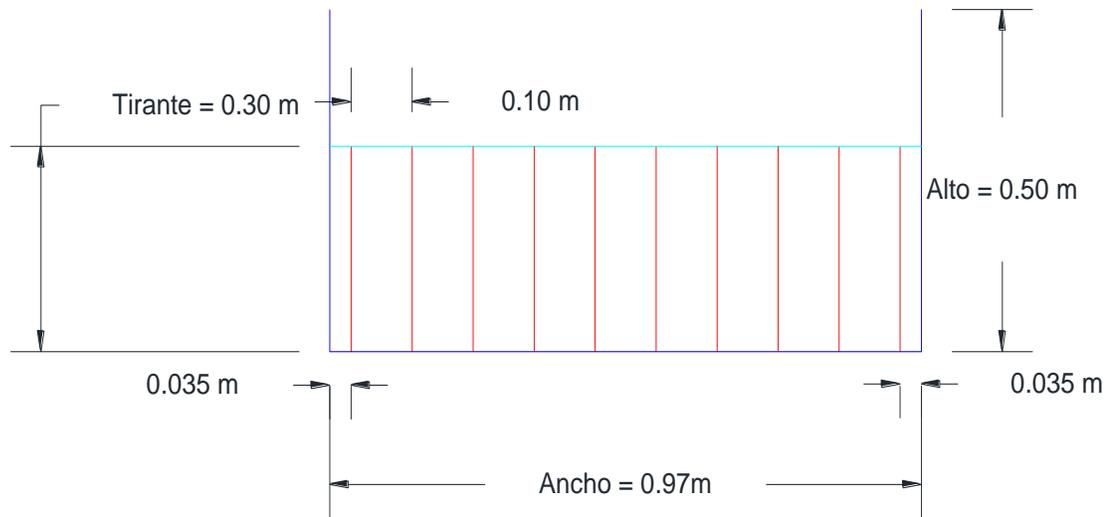


Figura 86. Dovelas escenario PC-CPN_02.

Una vez definidos los puntos a medir, se instala el Vectrino Profiler y se procede a la adquisición de datos de velocidad (ver Figura 87).

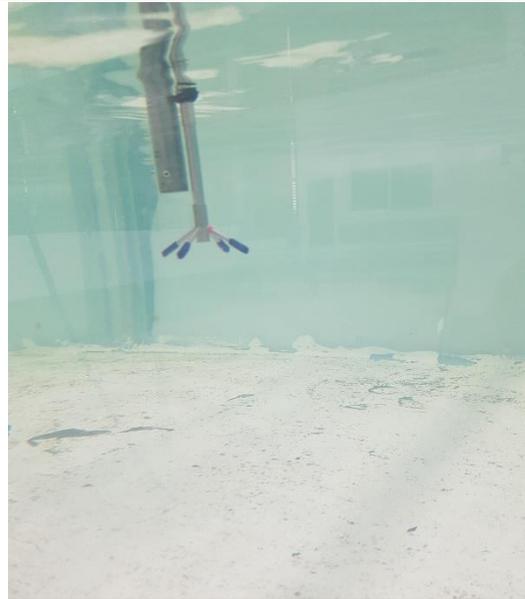


Figura 87. Adquisición de datos de velocidad escenario PC-PCN_02.

Los datos se procesan para generar las curvas de igual velocidad el primer escenario de análisis (ver Figura 88).

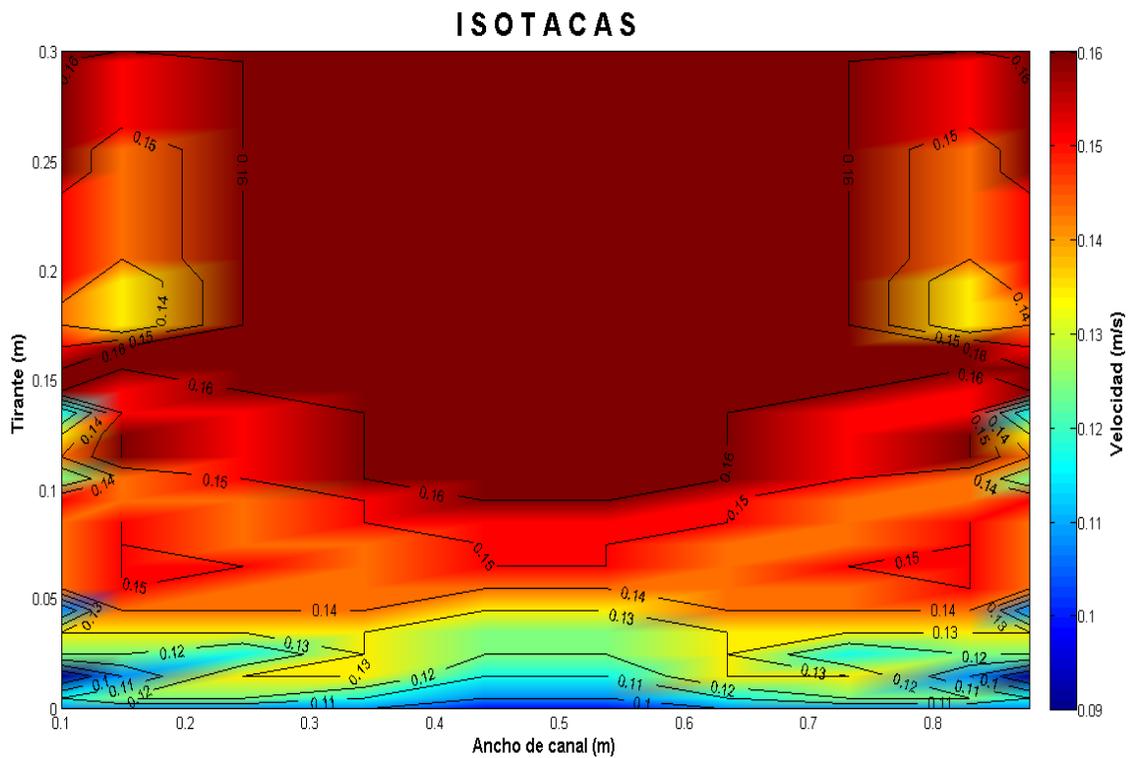


Figura 88. Curvas de igual velocidad del escenario PC-CPN_02.

En la Figura 88 se aprecia que por el efecto de las paredes y la plantilla la velocidad es menor con respecto de la zona central del canal. La $V_i = 0.16 \text{ m/s}$.

IV.1.2.2 Escenario SC-CPN_02

El segundo escenario se colocan dos barrotes en el canal experimental simulando las pilas de un puente (ver Figura 89).



Cauce natural con un puente con pilas. Fuente:
(Nación, 2015)

Canal experimental y modelo de pilas de puente.

Figura 89. Condición de flujo con pilas en el canal experimental y en un cauce natural.

Se llevaron a cabo pruebas con trazadores con el objetivo de visualizar los cambios en las líneas de traza por el efecto de las pilas (ver Figura 90).



Figura 90. Pruebas con trazadores escenario SC-CPN_02.

Al tener un mayor tirante y una menor velocidad se presentan las condiciones para la toma de fotografías del flujo alrededor de la pila y los vórtices estela que se forman aguas abajo (ver Figura 91).

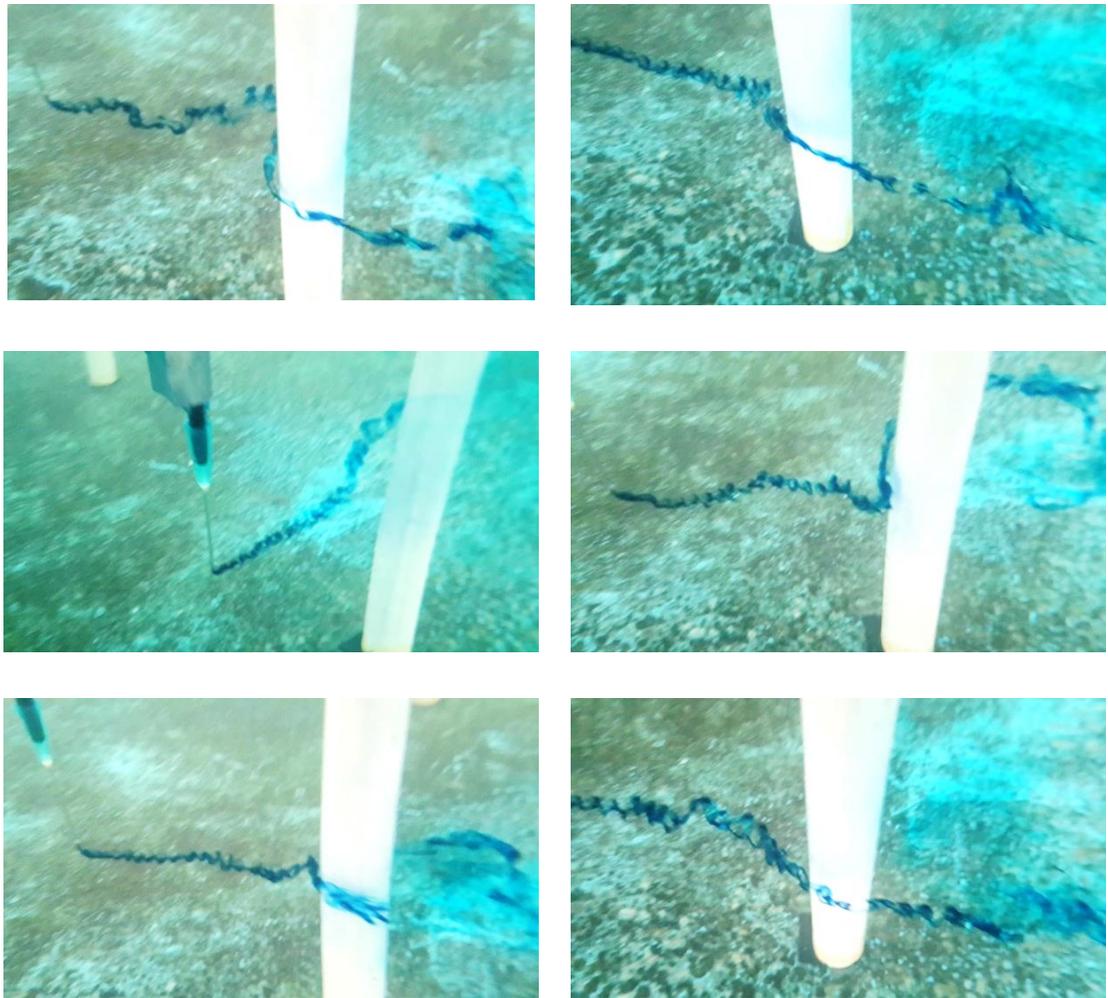


Figura 91. Visualización del flujo alrededor de la pila y el vórtice estela.

En la Figura 90 se observa la división del flujo por consecuencia de los barrotes lo que genera velocidades superficiales mayores. En la Figura 91 se aprecia que esa división genera los vórtices en estela aguas abajo los que juntos con los vórtices herradura son los causantes del fenómeno de la socavación.

Se seleccionaron las zonas de medición aguas abajo de las pilas a una distancia de 0.05, 0.10 y 0.15 m (ver Figura 92).

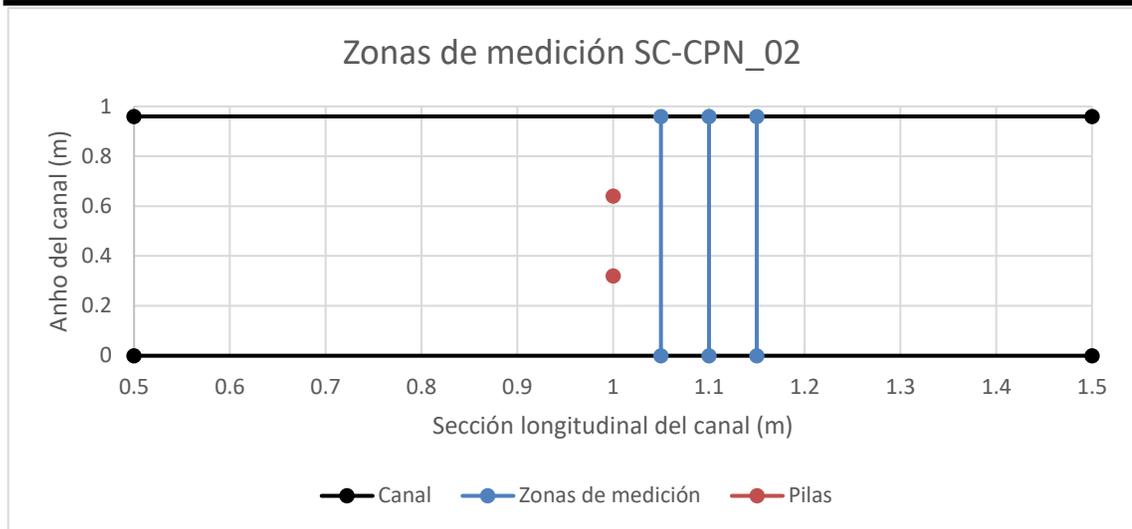


Figura 92. Zonas de medición escenario SC-CPN_02.

Las dovelas quedan como se muestran a continuación (ver Figura 93).

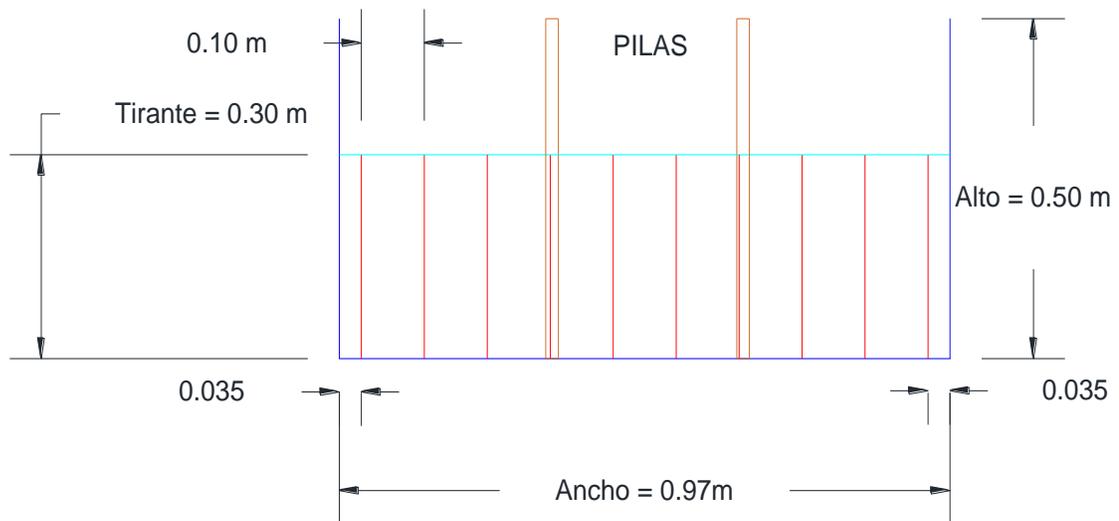


Figura 93. Dovelas escenario SC-CPN_02.

Una vez definidas las dovelas se miden los perfiles para generar las curvas de igual velocidad de la sección transversal (ver Figura 94 – 96).

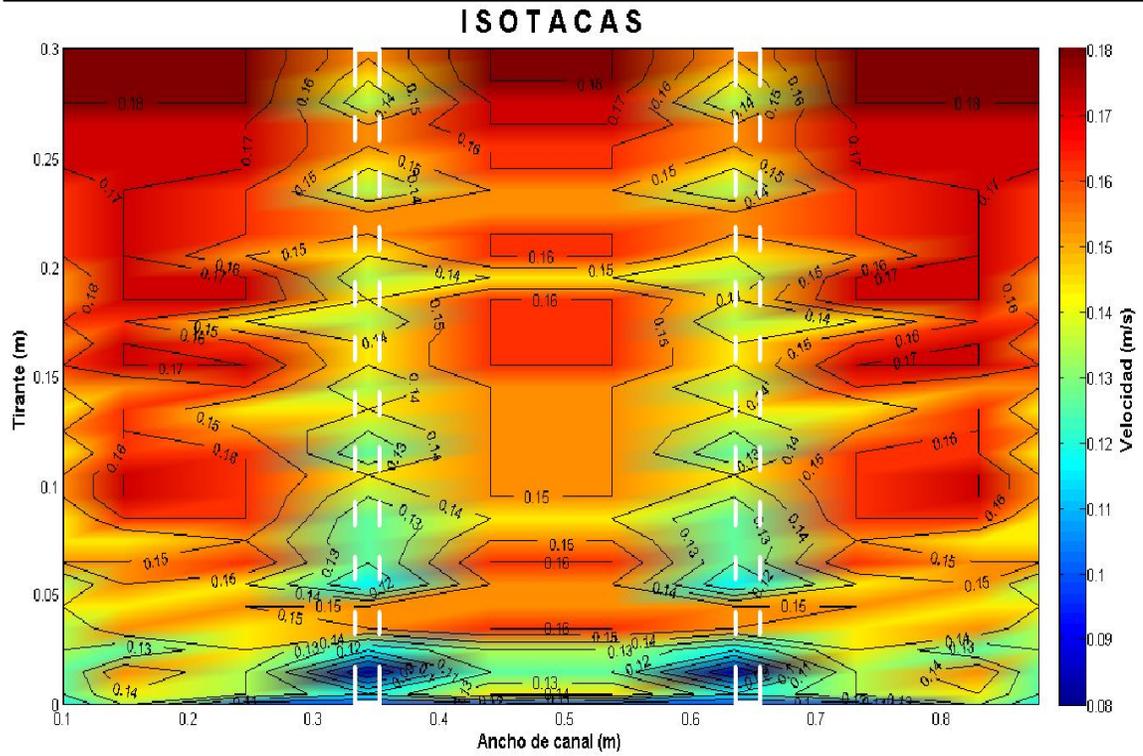


Figura 94. Curvas de igual velocidad a 0.05 m aguas abajo de las pilas del escenario SC-CPN_02.

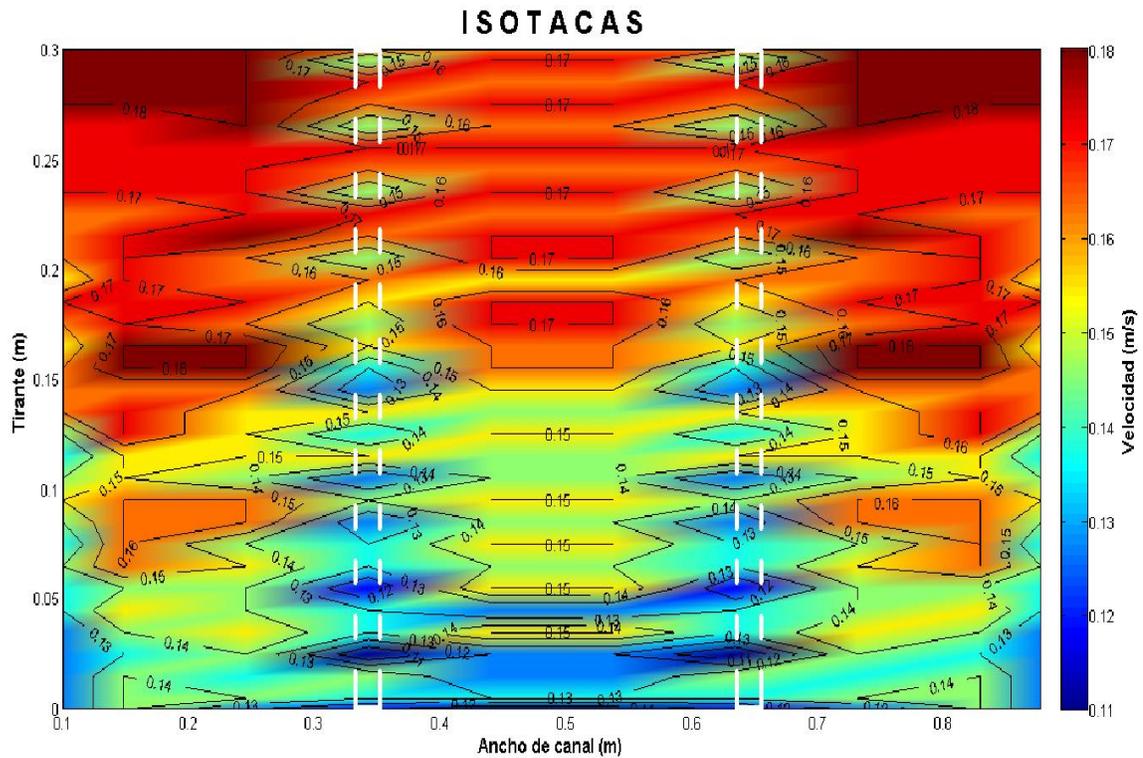


Figura 95. Curvas de igual velocidad a 0.10 m aguas abajo de las pilas del escenario SC-CPN_02.

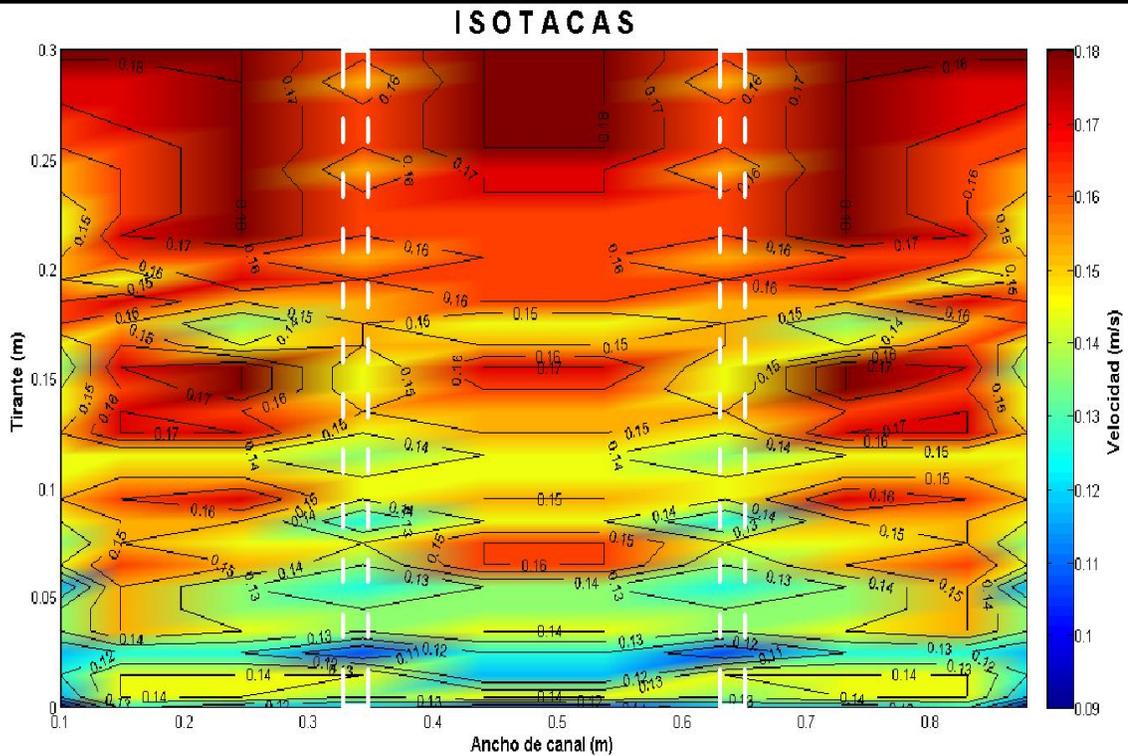


Figura 96. Curvas de igual velocidad a 0.15 m aguas abajo de las pilas del escenario SC-CPN_02.

Al tener un mayor tirante se generan velocidades más bajas por lo que el flujo se encuentra más estable si se compara con el escenario PC-CPN_01 (descrito en la sección IV.1.1.1) donde se tenían mayores variaciones de velocidad, en este caso se puede ver que el rango de velocidades es de 0.16 a 0.18 m/s se mantiene estable en la zona central como en los laterales a una distancia de 0.15 m aguas abajo.

En la cara de la pila aguas abajo se aprecian velocidades más concentradas en unos puntos, esto se puede interpretar como una señal de ruido que mide el ADV por consecuencia de la división de flujo provocado por la pila. El efecto de las fronteras es más evidente en este caso ya que hay puntos en los que la velocidad es de 0.09 m/s.

La velocidad más alta es de $V_e = 0.18 \text{ m/s}$, lo que significa un aumento del 13% con respecto de la $V_i = 0.16 \text{ m/s}$.

IV.1.2.3 Escenario TC-CPN_02

El tercer escenario se coloca la geometría de material leñoso en los barrotes simulando una acumulación en pilas de puente (ver Figura 97).

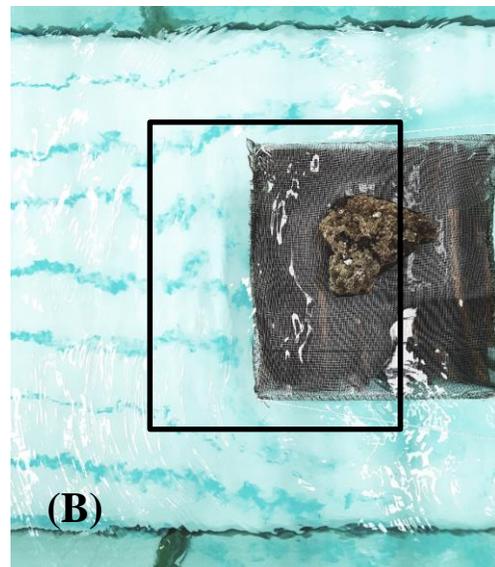
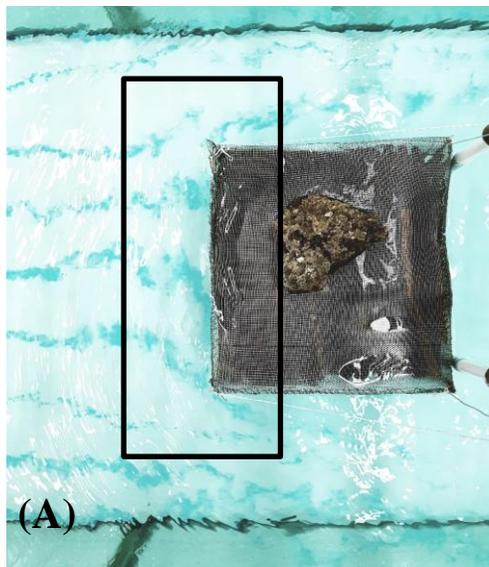


Cauce natural con acumulación de material leñoso en pilas de puente. Fuente: (Herald, 2017)

Canal experimental y modelo de pilas de puente con acumulación de material.

Figura 97. Condición de flujo con acumulación de material en pilas, en el canal experimental y en un cauce natural.

Se realizaron las pruebas con trazador para visualizar los cambios en las líneas de traza (ver Figura 98).



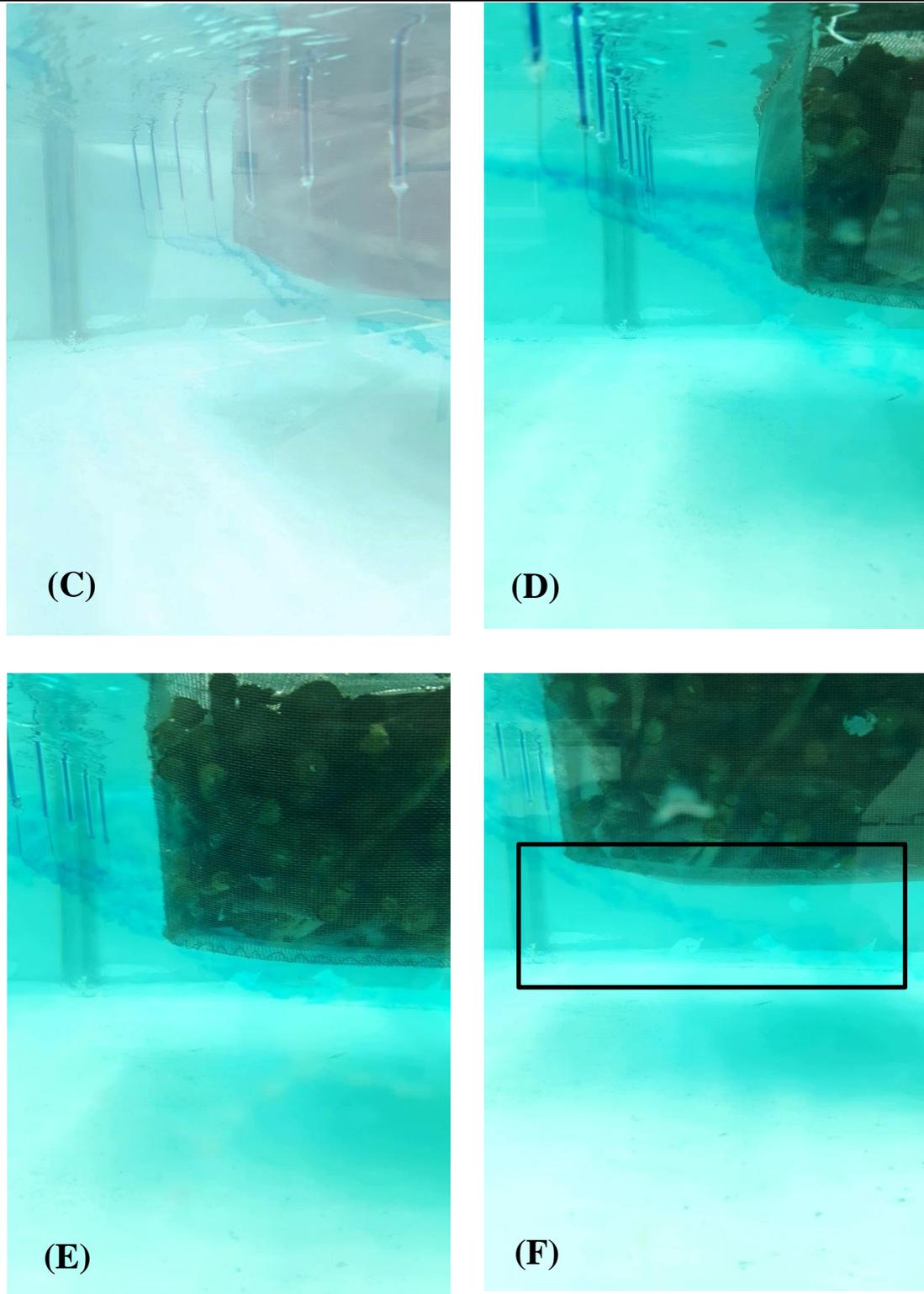


Figura 98. Pruebas con trazadores escenario TC-CPN_02.

En la Figura 98A y 98B se observa el efecto que tiene la acumulación de material sobre el flujo, al chocar con él la velocidad desciende formando un remanso aguas arriba de la

cara superior. En las zonas laterales el flujo abre y adquiere velocidad al reducirse el área hidráulica.

En la Figura 98C – 98F, el sistema de inyección de tinta se colocó en una posición más baja para que el trazador mostrara el comportamiento del flujo en esa zona. En la Figura 98C se aprecia como el trazador muestra al flujo que pasa por debajo de la forma de acumulación y en la Figura 98F se observan al flujo viajando por la parte inferior del material leñoso.

Las zonas de medición se localizan a una distancia de 0.05, 0.10 y 0.15 m aguas abajo de las pilas y aguas arriba se localizan a 0.05, 0.10 y 0.15 m de la cara aguas arriba de la acumulación de material leñoso (ver Figura 99).

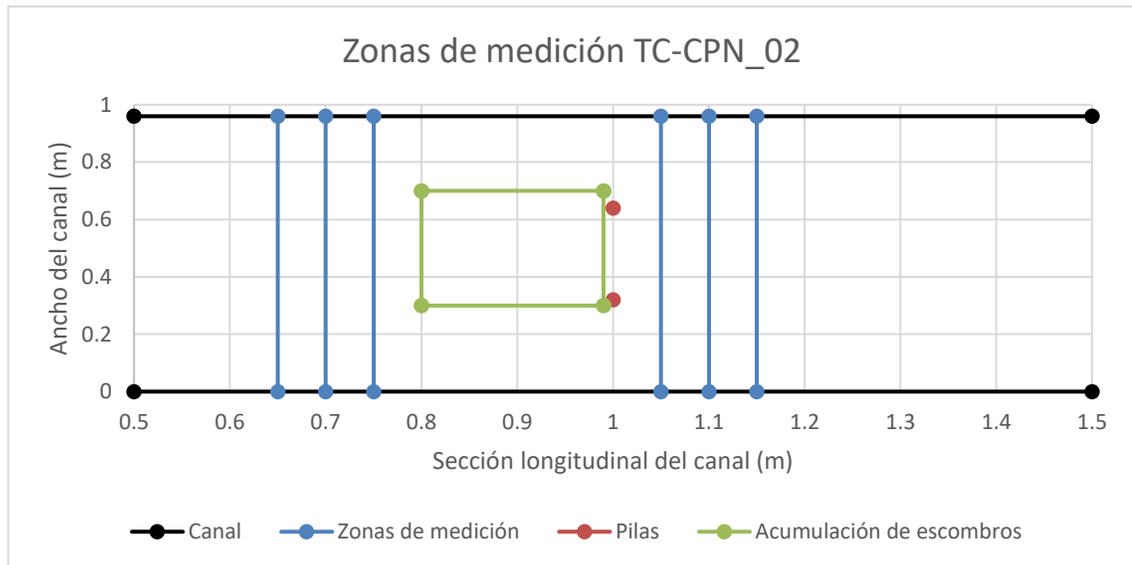


Figura 99. Zonas de medición escenario TC-CPN_02.

Las dovelas para el escenario TC-CPN_02 quedan de la siguiente manera (ver Figura 100).

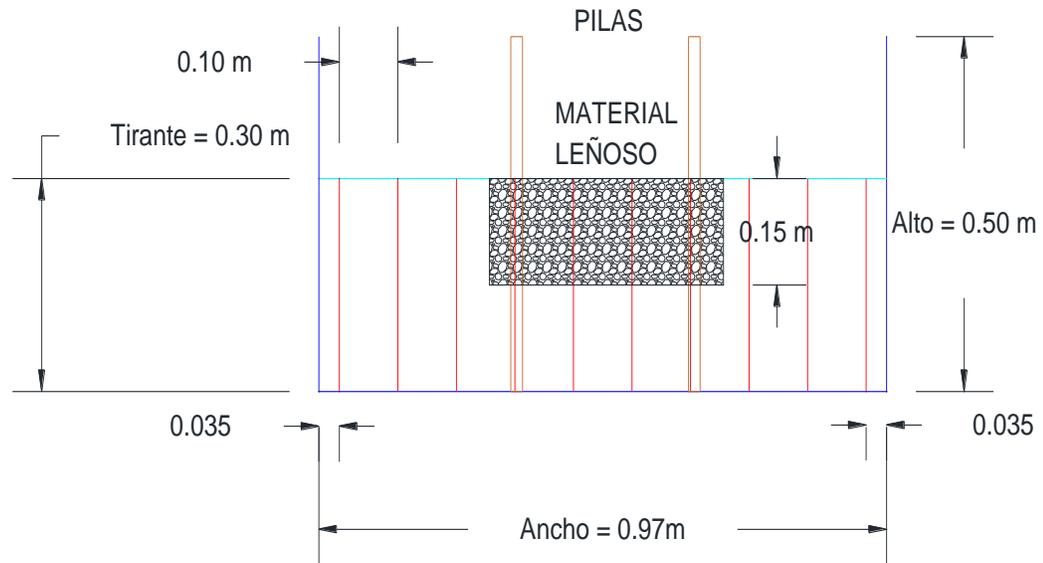


Figura 100. Dovelas escenario TC-CPN_02.

Con la ayuda del Vectrino Profiler se procede a la adquisición de los datos para su posterior análisis y generar las curvas de igual velocidad (ver Figura 101 – 106).

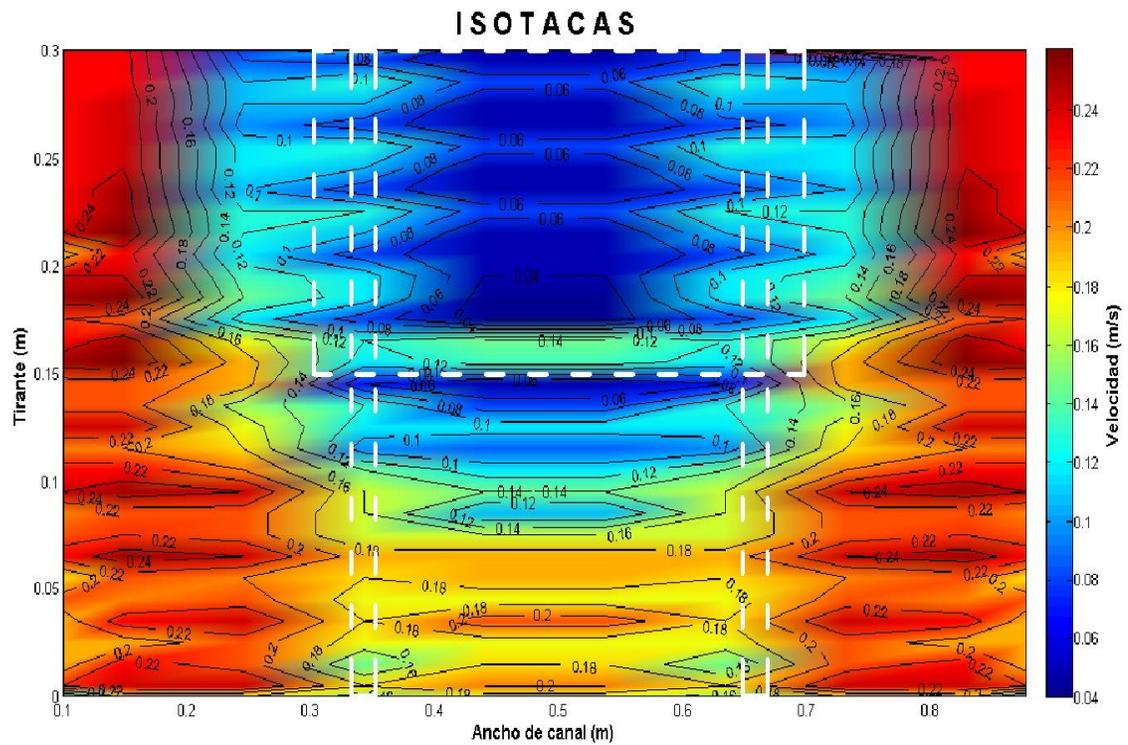


Figura 101. Curvas de igual velocidad a 0.05 m aguas abajo de las pilas del escenario TC-CPN_02.

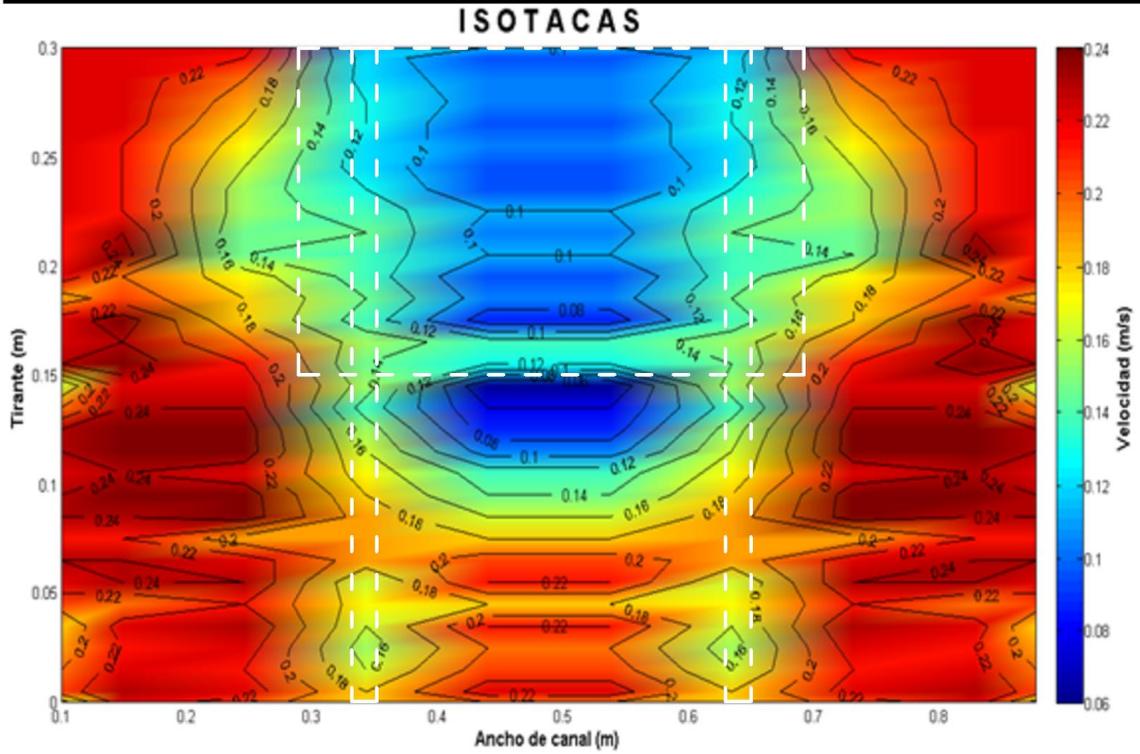


Figura 102. Curvas de igual velocidad a 0.10 m aguas abajo de las pilas del escenario TC-CPN_02.

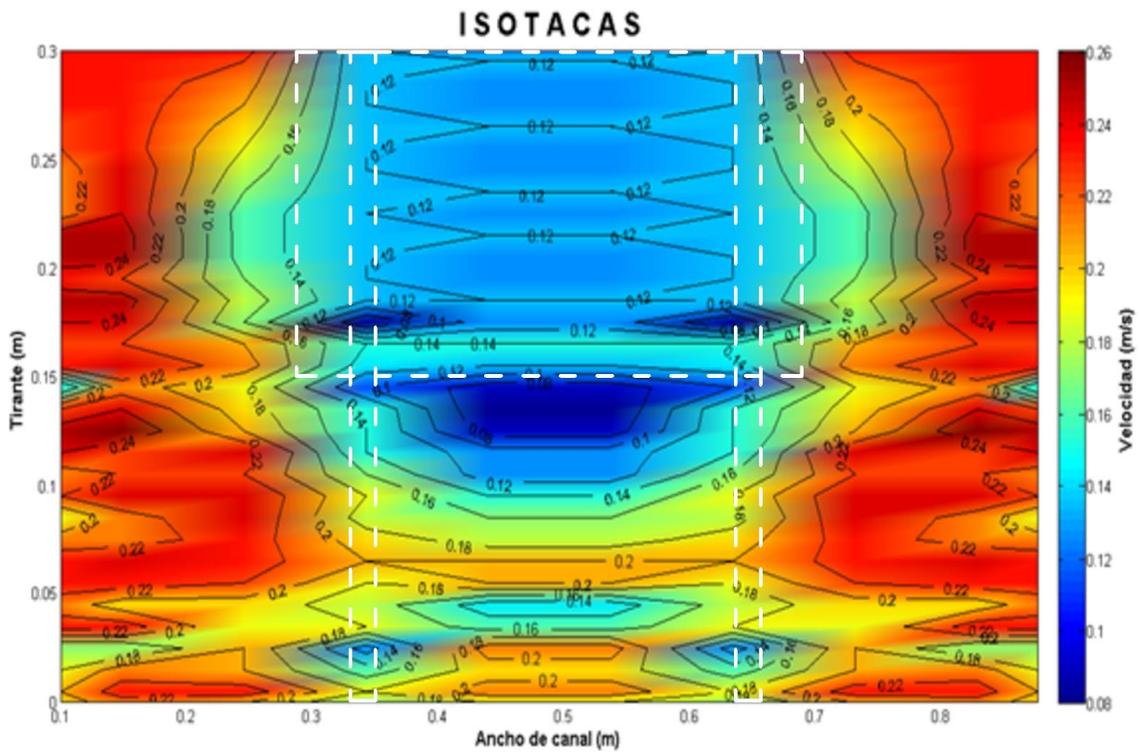


Figura 103. Curvas de igual velocidad a 0.15 m aguas abajo de las pilas del escenario TC-CPN_02.

La parte central donde se localiza la acumulación presenta las velocidades de menor magnitud (ver Figura 101) dado que el flujo pasa a través del material y pierde velocidad, conforme se avanza aguas abajo (ver Figura 102 y 103) esta velocidad vuelve a cobrar fuerza ya que el flujo ha sorteado el obstáculo y comienza a incrementarse por el flujo lateral que lleva más energía.

El rango de velocidades a los costados de la acumulación de material se sitúa entre 0.22 y 0.24 m/s en las tres mediciones que se hicieron aguas abajo. La $V_w = 0.24 \text{ m/s}$, comparando con la $V_i = 0.16 \text{ m/s}$, el aumento es de un 50%. Comparando las velocidades cercanas al fondo de la plantilla de este escenario con el primer escenario se tiene una diferencia de hasta un 33%. En términos de área hidráulica tenemos un $A = 0.297 \text{ m}^2$ y el área con material acumulado es de $A_w = 0.237 \text{ m}^2$, se tiene una reducción de área del 25% y un aumento en las velocidades que va desde un 33% hasta un 50%.

Las curvas de igual velocidad de las secciones aguas arriba se muestran a continuación (ver Figura 104 – 106).

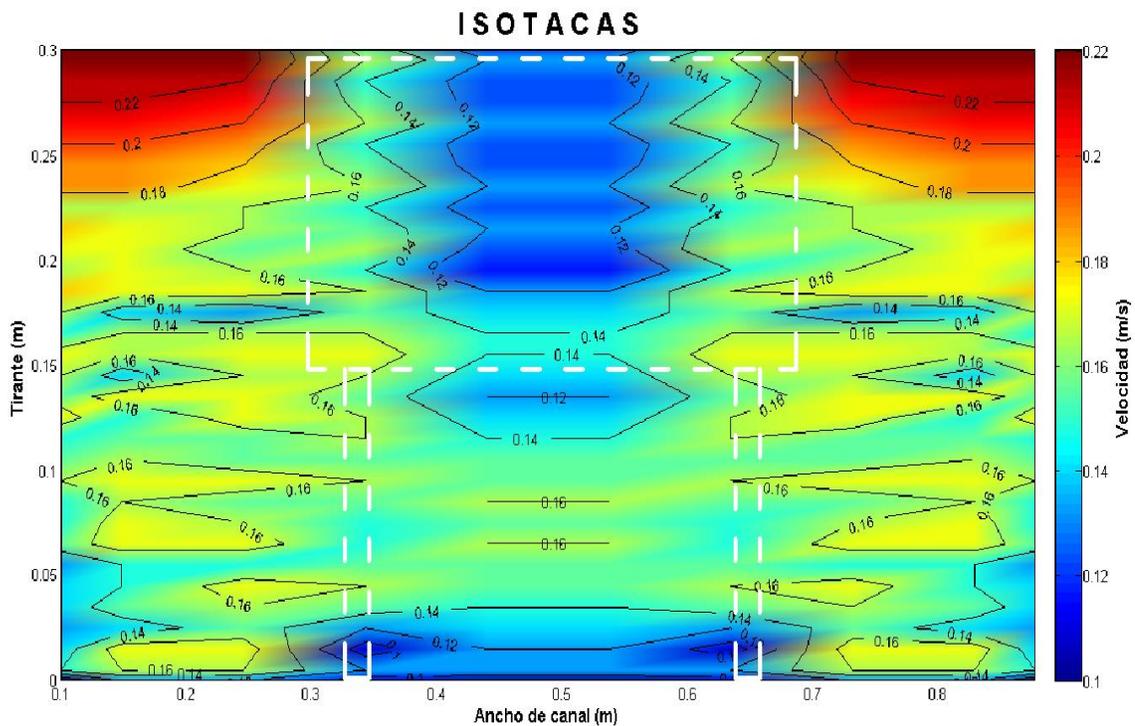


Figura 104. Curvas de igual velocidad a 0.15 m aguas arriba de la acumulación de material del escenario TC-CPN_02.

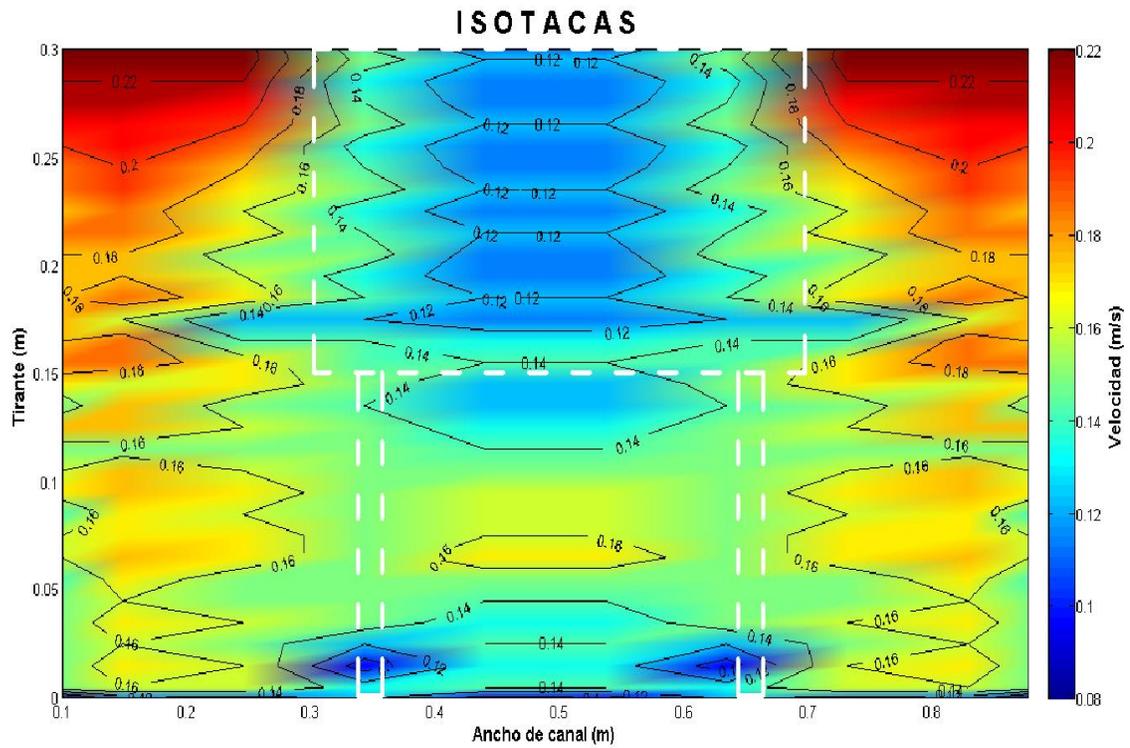


Figura 105. Curvas de igual velocidad a 0.10 m aguas arriba de la acumulación de material del escenario TC-CPN_02.

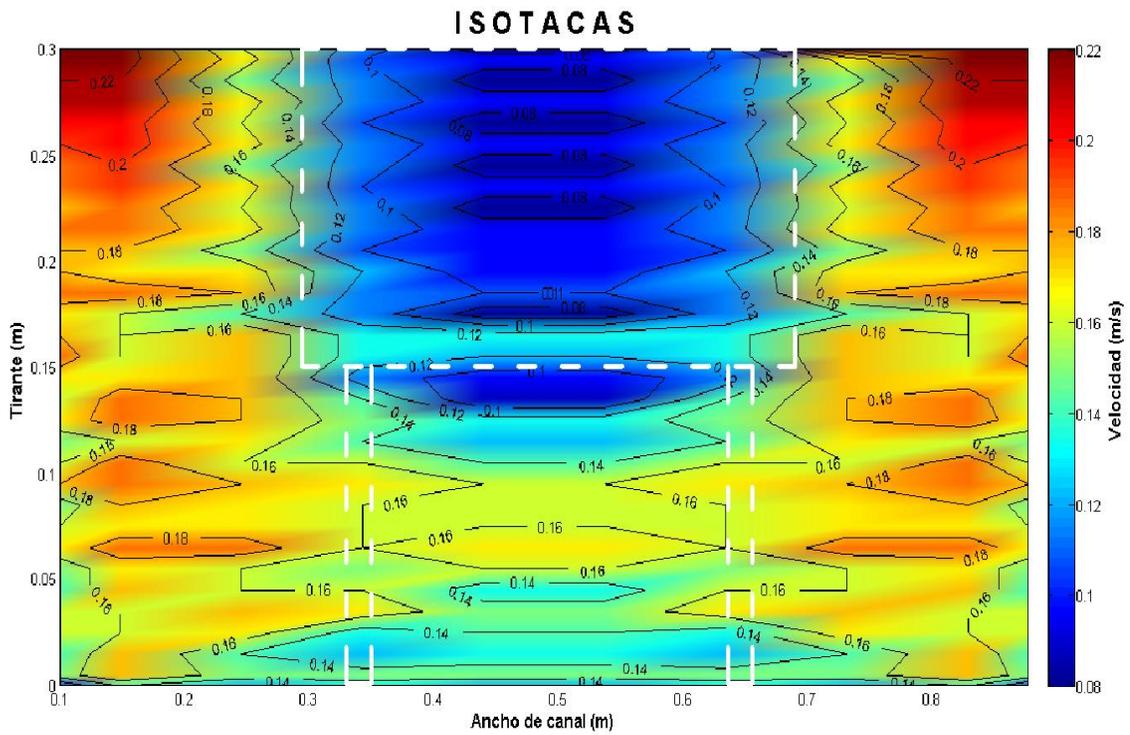


Figura 106. Curvas de igual velocidad a 0.05 m aguas arriba de la acumulación de material del escenario TC-CPN_02.

La Figura 104 muestra como la aproximación del flujo a la acumulación de material provoca un descenso de la velocidad, aunque la Figura 104 muestre las velocidades a 0.15 m aguas arriba, los escombros ya generan una influencia en la zona. Se observa que las zonas laterales tienen un rango de velocidades del orden de 0.14 – 0.16 m/s, conforme la distancia se hace menor este rango aumenta a 0.16 – 0.18 m/s (ver Figura 105).

Se observa (ver Figura 106) como las velocidades más bajas se localizan justo en frente de la cara aguas arriba del material acumulado, donde el flujo tiende a perder velocidad por su paso a través del material. En la zona lateral las velocidades aumentan hasta un 28% en promedio por consecuencia del material leñoso acumulado.

IV.2 Perfiles de velocidad sección vertical

La presencia de la superficie libre, la forma y los cambios de sección, la rugosidad de las paredes, el gasto y la acción de corrientes secundarias en tramos curvos afectan la distribución de la velocidad en la sección de un canal (Sotelo Ávila, 2002). La Figura 107 ilustra el modelo general de los perfiles de velocidad para varias secciones horizontales y verticales en un canal con sección rectangular y las curvas de igual velocidad de la sección transversal (Chow, 1994).

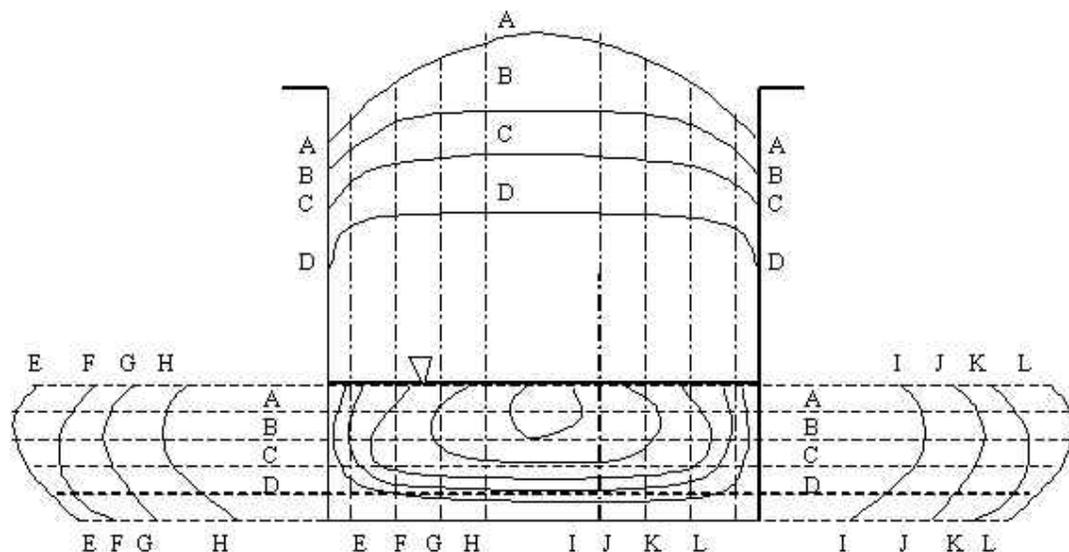
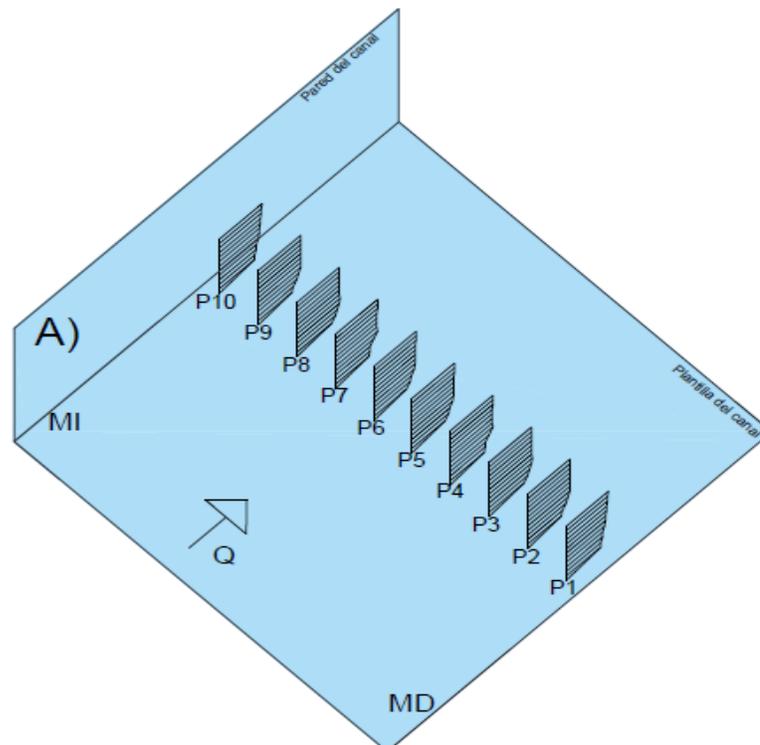


Figura 107. Distribución de velocidades en un canal rectangular. Fuente: (Chow, 1994).

A los factores que modifican la distribución de velocidad se puede añadir las pilas, estribos de un puente y la acumulación de material leñoso. Algunos investigadores como (Ahmed & Rajaratnam, 1998) y (Pagliara & Carnacina, 2012) llevaron a cabo estudios donde analizaron la interacción de estas estructuras con los perfiles de velocidad encontrando que, el flujo se contrae y se desvía por la presencia del material leñoso acumulado, las velocidades cercanas a la plantilla crecen lo que aumenta la socavación y la rugosidad de la acumulación acelera el flujo.

En la sección anterior se estudió el cambio en las velocidades por la presencia de acumulación de material leñoso en pilas de puente con ayuda de las curvas de igual velocidad, ahora se analizan los perfiles de velocidad verticales ante la presencia de estas estructuras. Al igual que en la sección anterior se mantienen los tres escenarios de análisis (ver Tabla 12 página 65 y Tabla 13 página 85), los perfiles de velocidad se enumeran de la margen derecha del canal hacia la margen izquierda (ver Figura 108) para cada uno de los escenarios.



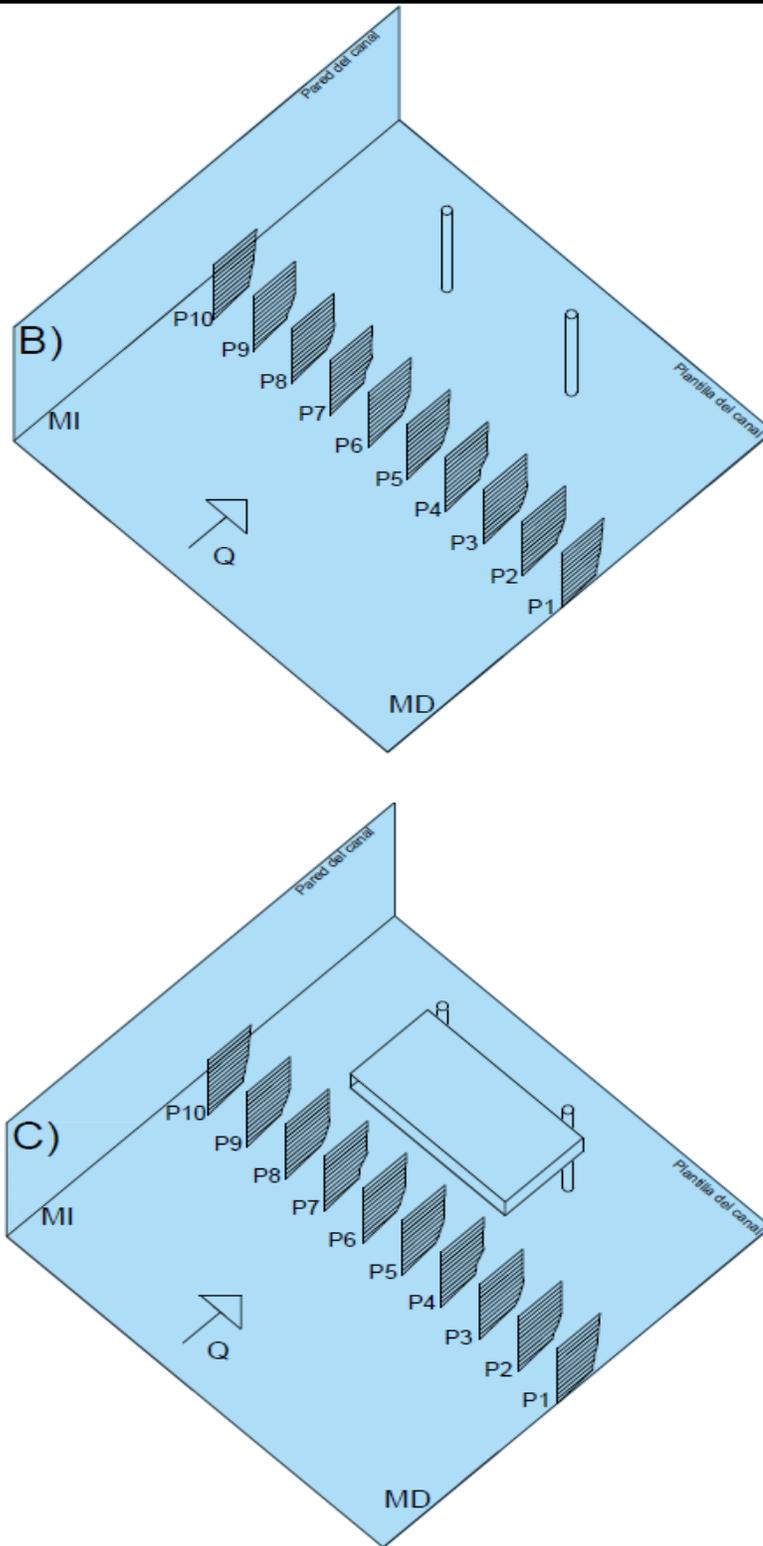


Figura 108. Ejemplo de perfiles de velocidad. A) Primer escenario, B) Segundo escenario con pilas y C) Tercer escenario con pilas y acumulación de material leñoso.

En la Figura 109 se representan los perfiles de velocidad, las secciones y las características generales. Las secciones 1 – 3 se localizan aguas arriba, a una distancia de 0.05, 0.10 y 0.15 m de la cara aguas arriba de la acumulación de material leñoso y las secciones 4 – 6 se localizan aguas abajo de las pilas a la misma distancia. El eje de las ordenadas representa el tirante y el eje de las abscisas a las velocidades. Sobre la acumulación de material hay una tabla que describe los escenarios de estudio (ver Figura 109), la línea azul representa el perfil del primer escenario sin pilas ni acumulación de material leñoso, la línea roja el segundo escenario con pilas y la línea verde el tercer escenario con acumulación de material leñoso y pilas. Los perfiles se representan en la misma figura para su comparación. Debajo de la acumulación de material leñoso se señala el perfil que se está representando.

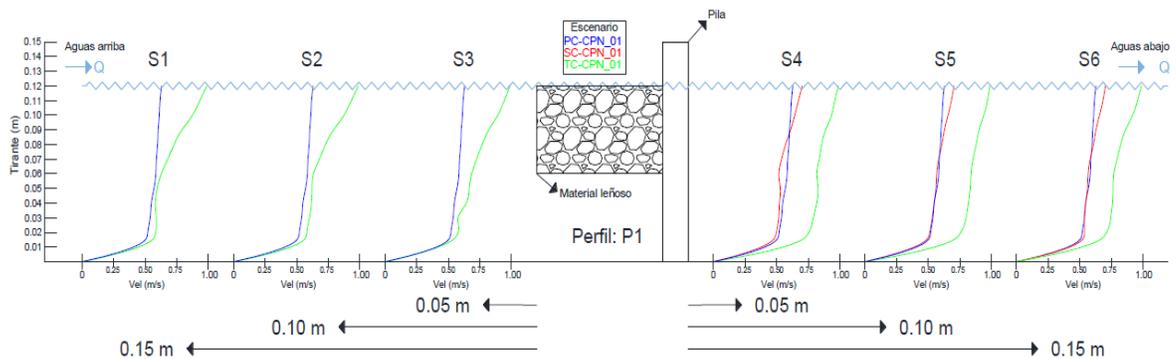
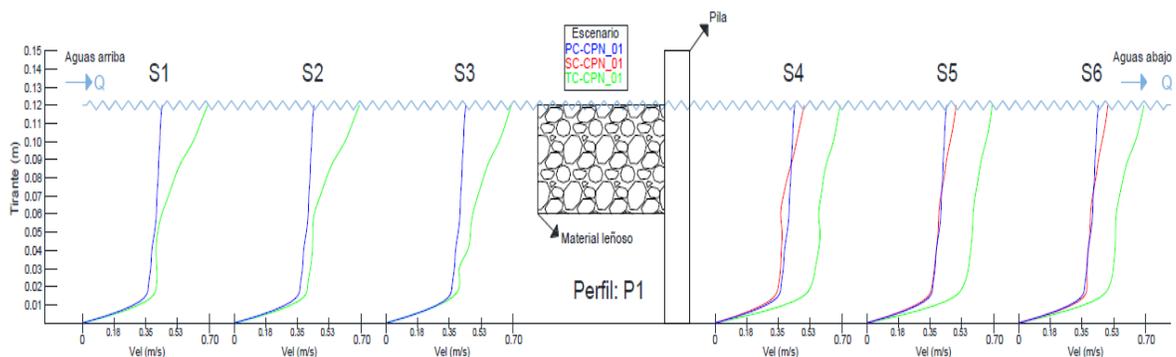
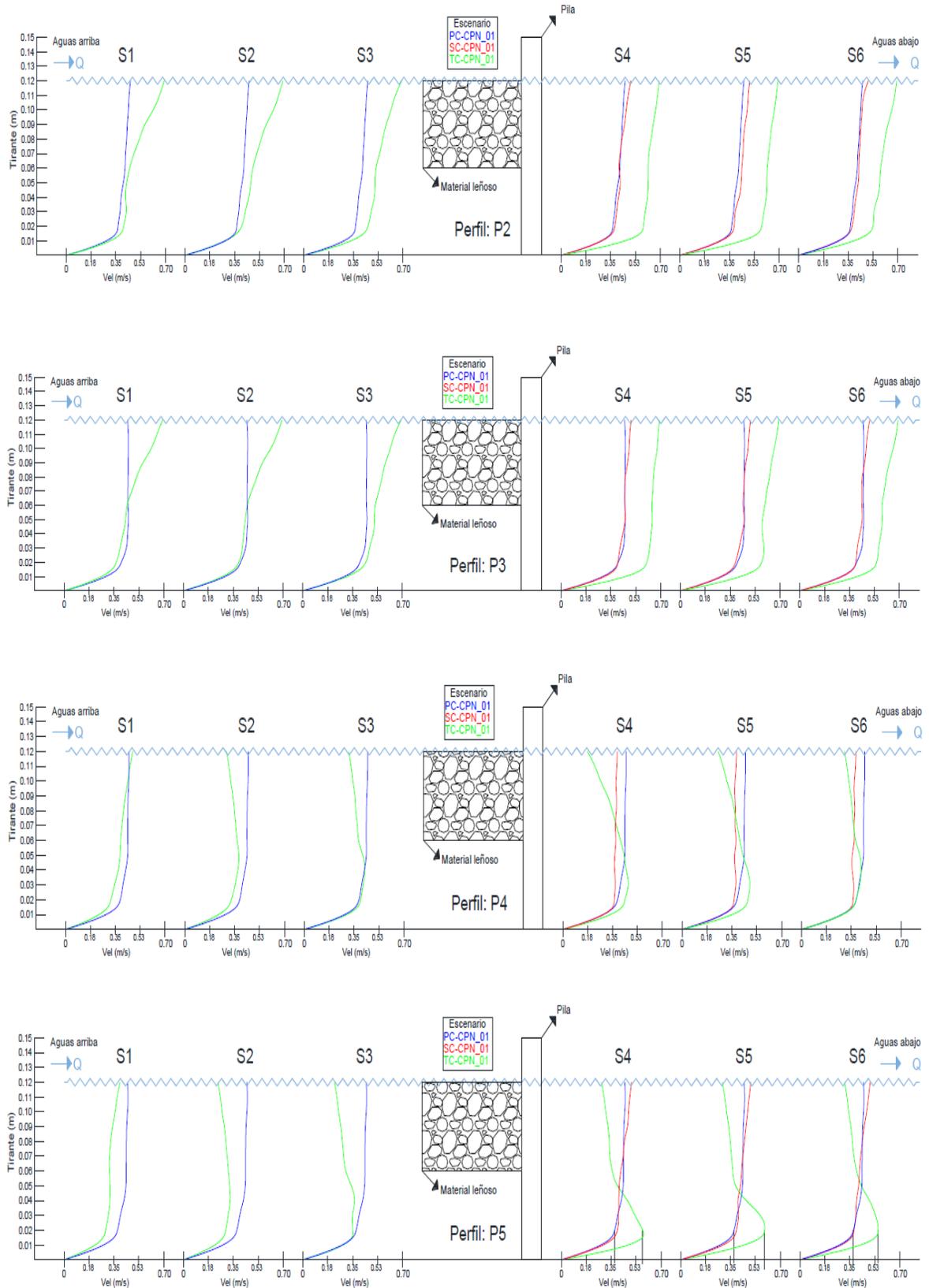


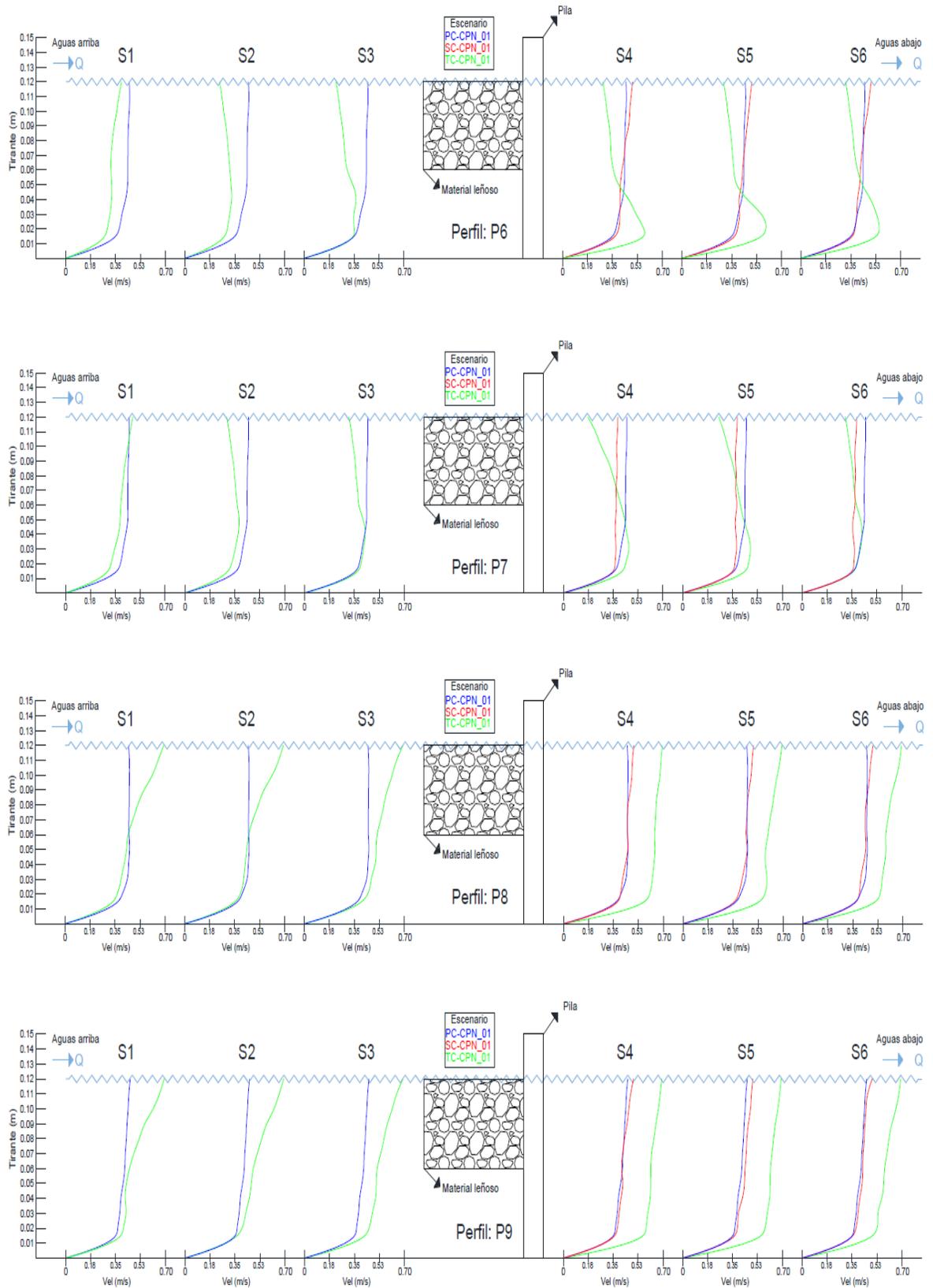
Figura 109. Descripción del esquema de perfiles de velocidad.

IV.2.1 Perfiles de velocidad condición de flujo CPN_01

En la Figura 110 se muestran los perfiles de velocidad de la condición de flujo $Fr=0.40$.







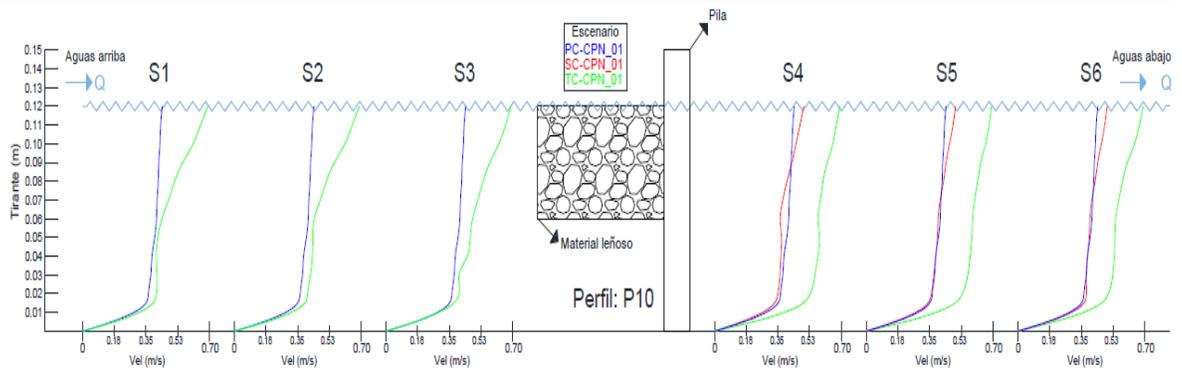


Figura 110. Perfiles de velocidad de la condición de flujo CPN_01.

Como se observa en la Figura 110 los perfiles de velocidad para el escenario PC-CPN_01 presentan la velocidad mínima en la plantilla del canal y de ahí aumenta la magnitud hacia la superficie libre. La velocidad media registrada ronda los 0.43 m/s para este escenario.

En el caso de las velocidades del escenario SC-CPN_01 se observa que los perfiles guardan similitud con respecto al escenario PC-CPN_01, sin embargo, los perfiles P4 y P7 que se localizan aguas abajo de las pilas registran una disminución en la velocidad por consecuencia del efecto que tiene la pila en el flujo, que lo divide cuando este choca con la cara y provoca los llamados vórtice de estela, por lo que se puede atribuir la diferencia de velocidades a este fenómeno. Se aprecia que las velocidades siguen siendo bajas aun a la distancia de 0.15 m aguas abajo.

En el caso del escenario TC-CPN_01 el perfil P1 muestra un incremento de las velocidades con respecto de los otros escenarios, aguas arriba (S1) la velocidad superficial aumenta y conforme se acerca a la acumulación de material (S3) esta crece a una menor profundidad. Aguas abajo se nota un incremento general a lo largo del perfil de velocidades por consecuencia de la reducción del área hidráulica, lo que genera velocidades de hasta 0.65 m/s , este mismo patrón se repite en los perfiles P2 y P3.

En el perfil P4 se observa aguas arriba que conforme el flujo se acerca a la acumulación de material en la parte inferior el perfil adopta una forma curva que describe un aumento en su velocidad mientras que en la parte superior se observa un decremento por consecuencia del flujo que debe atravesar el material leñoso. En las secciones aguas abajo se observa que una vez sorteados los obstáculos los perfiles de las secciones S4 y S5

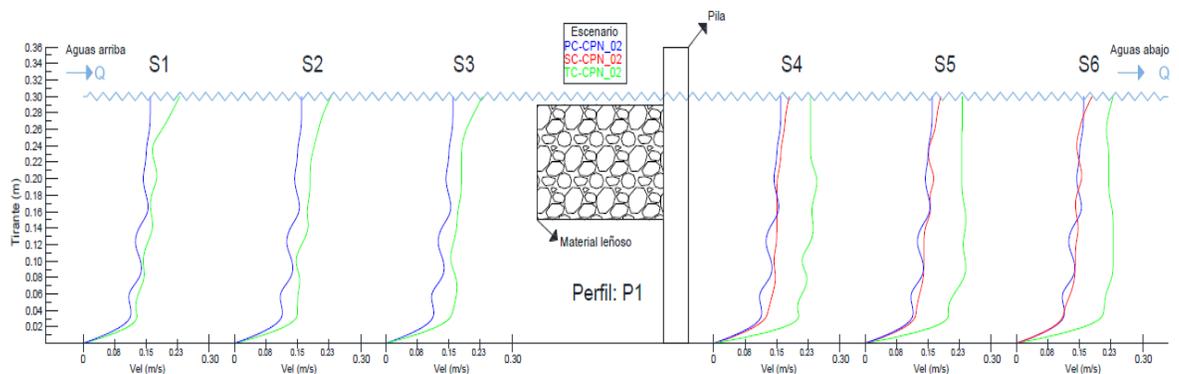
mantienen una velocidad mayor en la parte inferior con respecto de la parte superior y en la sección S6 se observa como las velocidades tienden a regularizarse, de haberse llevado a cabo más mediciones aguas abajo se habría podido determinar la distancia a la cual el perfil de velocidades recupera su forma normal.

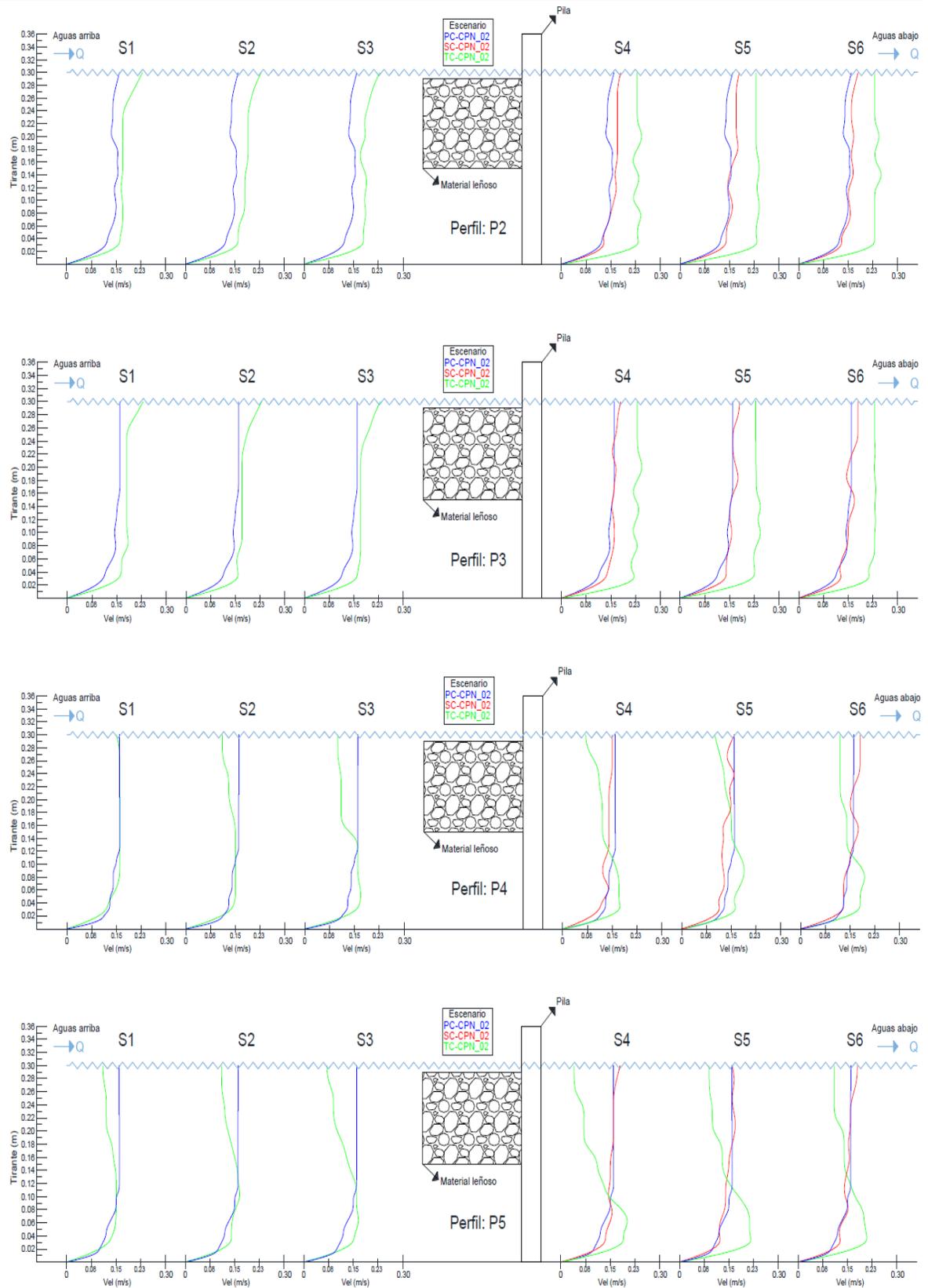
El perfil P5 muestra un comportamiento similar al P4, solo que en este caso en las secciones aguas arriba se observa que las velocidades en la parte superior de los perfiles decrecieron más comparándolas con las secciones del perfil P4. Aguas abajo se observa que las velocidades en la parte inferior aumentaron a más de 0.53 m/s . Si comparamos los perfiles de velocidad en las secciones aguas abajo a una profundidad de 0.02 m con respecto del fondo del canal observamos un aumento considerable cuando existe acumulación de material leñoso he aquí por qué varios autores advierten que este fenómeno provoca un aumento de la socavación en pilas y por ende el riesgo de falla de los puentes.

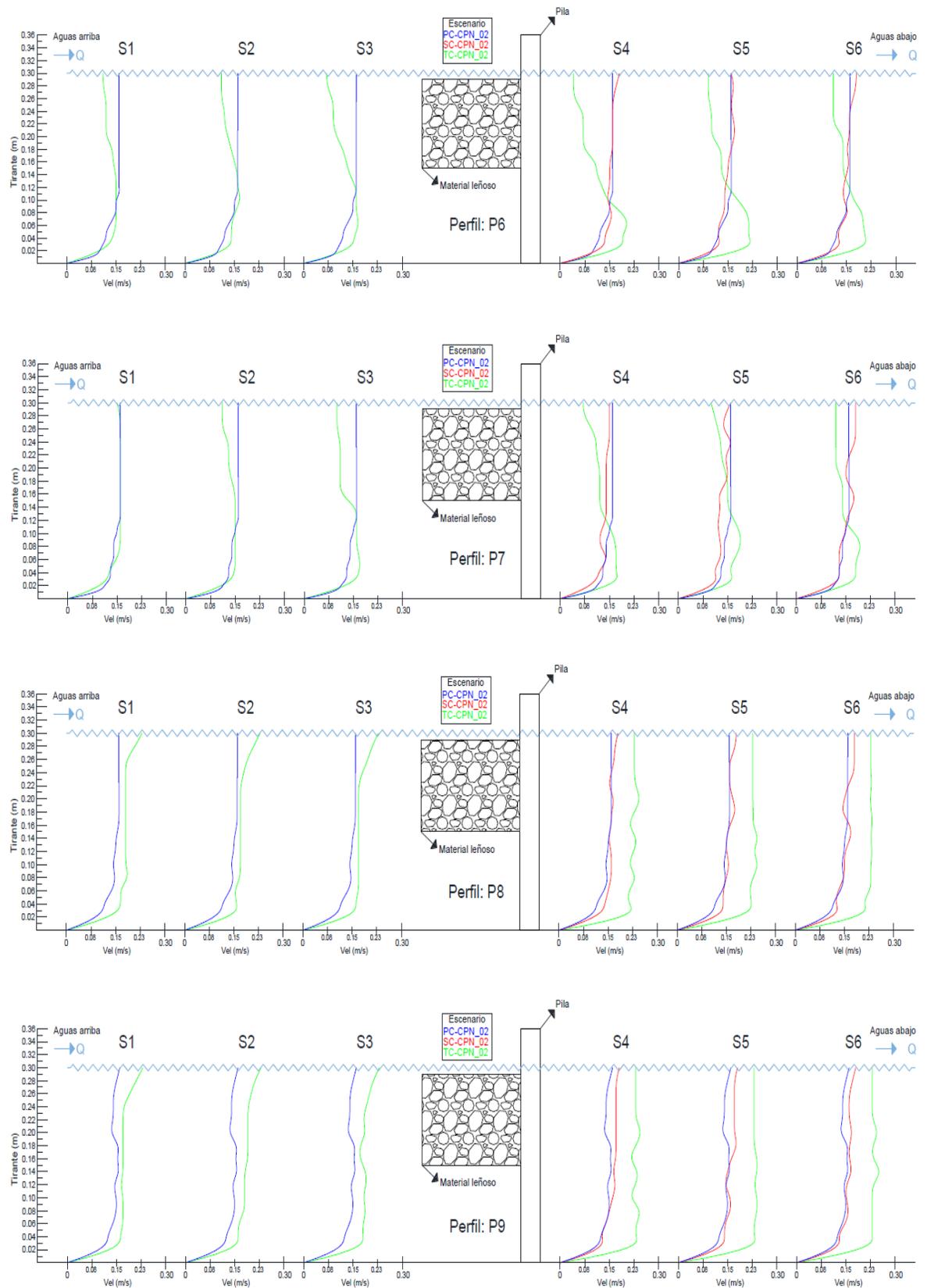
En los perfiles subsecuentes se observa un comportamiento similar a los ya descritos anteriormente.

IV.2.2 Perfiles de velocidad condición de flujo CPN_02

En la Figura 111 se muestran los perfiles de velocidad de la condición de flujo $Fr=0.10$.







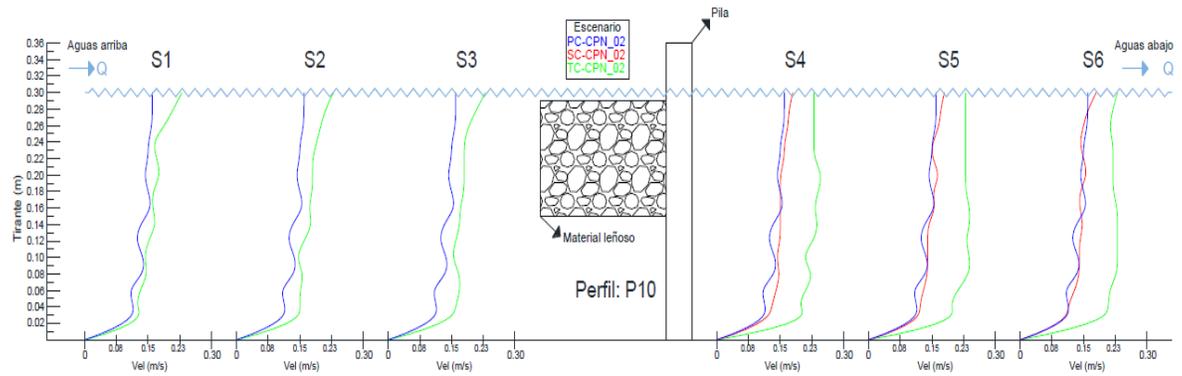


Figura 111. Perfiles de velocidad de la condición de flujo CPN_02.

En la Figura 111 se aprecia que el perfil P1 muestra un comportamiento ondulado, este perfil es el más cercano a la pared del canal y de acuerdo con la Figura 88 (ir a la página 88) esta zona presenta variaciones en la velocidad más notorias por lo que estas ondulaciones se pueden asociar al efecto de las fronteras en la velocidad. El perfil P2 ya no presenta variaciones tan visibles y a partir del perfil P3 se observa un comportamiento más semejante al descrito en la literatura. La velocidad media se aproxima a los 0.16 m/s .

En los perfiles del escenario SC-CPN_02 (con pilas) se aprecia una similitud con respecto a los descritos en el apartado IV.2.1, las variaciones que se presentan son más notorias en los perfiles P4 y P7 que se localizan aguas abajo de las pilas. En el caso del perfil P5 la variación entre los escenarios ya no es tan pronunciada.

Para la condición con acumulación de material leñoso (escenario TC-CPN_02) se aprecia en la Figura 111 que las variaciones entre los perfiles de cada sección son muchas. Comenzando con el P1 se aprecia que tanto aguas arriba como aguas abajo las velocidades aumentan cuando el canal presenta una reducción del área hidráulica, llegando a presentarse velocidades de hasta 0.24 m/s , cuando existe acumulación de material leñoso. Este mismo caso se observa en los perfiles P2 y P3 presentan un aumento cuando se comparan con los perfiles del escenario PC-CPN_02 tanto aguas arriba como aguas abajo.

Aguas arriba del perfil P4 se observa como las velocidades van aumentando conforme el flujo tiende a pasar por debajo del material acumulado, caso contrario el flujo que choca de frente con la cara del material leñoso tiende a disminuir su velocidad. En la sección S4

aguas abajo cuando el flujo pasa la acumulación se observa que las velocidades siguen siendo altas en la parte baja del perfil y en la parte superior se observa que la desaceleración del flujo persiste por efecto de que tiene que atravesar el material leñoso lo que provoca una pérdida de velocidad. Las secciones S5 y S6 muestran como a medida que el flujo avanza aguas abajo el perfil de velocidades tiende a estabilizarse.

En el perfil P5 se observa que el flujo que pasa por debajo de la acumulación de material leñoso sufre un mayor aumento si lo comparamos con el perfil P4. Se aprecia el mismo comportamiento que en la condición de flujo CPN_01, a una menor profundidad se observan las mayores velocidades lo que en un caso de la vida real provocaría un mayor nivel de socavación.

IV.2.3 Conclusiones

Para las dos condiciones de flujo se aprecian los mismos comportamientos en los perfiles de velocidad para las dos condiciones de flujo en sus tres escenarios de análisis. Se observa que para el primer escenario los perfiles tienen un comportamiento similar, las velocidades más bajas se localizan en la plantilla y crecen conforme se acercan a la superficie libre del agua en todas las secciones a lo largo y ancho del canal. Cuando se simulan las pilas de puentes (segundo escenario) los perfiles muestran un comportamiento anormal específicamente los que se localizan aguas abajo de las pilas (P4 y P7) dado que estos muestran una diferencia si se les compara con los del primer escenario, esta variación en la velocidad se asocia a la división del flujo que generan las pilas y que son captados por el ADV como una señal de ruido, los perfiles de velocidad restantes presentan pequeñas variaciones en comparación con los del primer escenario. En el tercer escenario se observa para ambos casos que los perfiles que no interaccionan con el material acumulado presentan una mayor velocidad comparándolos con los otros dos escenarios y los que sí tienen contacto con el material leñoso se observa aguas arriba como al acercarse al obstáculo disminuye su velocidad en la parte superior puesto que el flujo encuentra resistencia al fluir a través del material, mientras que en la parte inferior del perfil las velocidades crecen en magnitud dado que se reduce el área hidráulica.

IV.3 Análisis de vorticidad (Curl)

La vorticidad se considera una propiedad cinemática del fluido y se define como la magnitud para cuantificar la rotación de un fluido. En el caso de corrientes naturales, la construcción de estructuras extrañas a la corriente (pilas o estribos de puente) generan una gran producción de vórtices y por consecuencia un desequilibrio en la estabilidad de las partículas sólidas del fondo y de las paredes del cauce, lo cual puede dar lugar a efectos de socavación, que como ya se mencionó anteriormente puede provocar la falla de las estructuras antes mencionadas (Carmona González, 2009).

Daily & Harleman, (1975) describe que la velocidad de rotación de un elemento del fluido, A_x, A_y , alrededor del eje, z puede expresarse en términos de las componentes de velocidad, u y v y sus incrementos en las direcciones x , y (ver Figura 112).

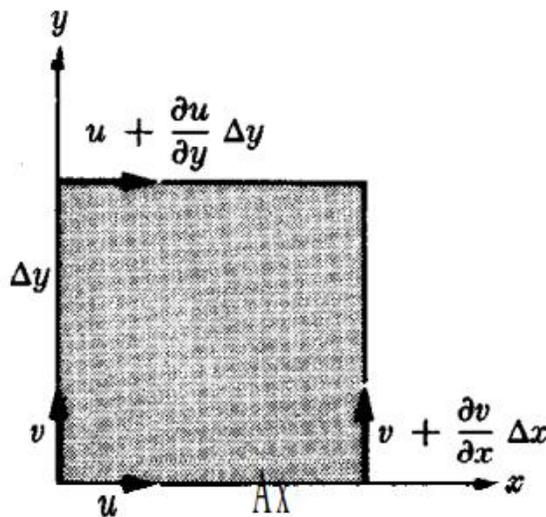


Figura 112. Diagrama de definición para el cálculo de rotación de un elemento fluido. Fuente: (Daily & Harleman, 1975)

Definiendo el sentido contrario a las manecillas del reloj como positivo, encontramos que la velocidad de rotación de la cara A_x del elemento es:

$$\frac{v + \left(\frac{dv}{dx}\right)\Delta x - v}{\Delta x} = \frac{dv}{dx} \quad \text{Ec. 1}$$

Y para la cara A_y ,

$$\frac{-\left[u + \left(\frac{dv}{dy}\right)\Delta_y - u\right]}{\Delta_y} = -\frac{dv}{dy} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde el signo negativo se introduce para conservar el sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj, es positiva. La velocidad neta de rotación del elemento fluido alrededor del eje z , es el promedio de la suma de la rotación sobre las caras A_x y A_y .

En una forma similar,

$$\begin{aligned} \omega_x &= \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dy} - \frac{dv}{dz} \right) \\ \omega_y &= \frac{1}{2} \left(\frac{du}{dz} - \frac{dw}{dx} \right) \\ \omega_z &= \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{dx} - \frac{du}{dy} \right) \end{aligned} \quad \text{Ec. 3}$$

El vector resultante de velocidad de rotación es:

$$\omega = \frac{1}{2} (\nabla \times q) \quad \text{Ec. 4}$$

Con la magnitud:

$$|\omega| = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2} \quad \text{Ec. 5}$$

El vector $\nabla \times q$ es el rotacional del vector velocidad y es conocido como vorticidad, ζ . Las componentes de vorticidad son ξ, η y ζ , cada una de ellas es igual al doble de la componente correspondiente de la velocidad de rotación.

Un flujo irrotacional se define como aquel en el cual las componentes de la velocidad de rotación $\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$. Por lo tanto $\nabla \times q = 0$, y

$$\frac{dw}{dy} = \frac{dv}{dz}, \quad \frac{du}{dz} = \frac{dw}{dx}, \quad \frac{dv}{dx} = \frac{du}{dy} \quad \text{Ec. 6}$$

En el contexto de la mecánica de fluidos el rotacional del campo de velocidades se define como:

$$\omega(x, t) = \nabla \times u(x, t) = \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2} - \frac{\partial u_2}{\partial x_3}, \frac{\partial u_1}{\partial x_3} - \frac{\partial u_3}{\partial x_1}, \frac{\partial u_2}{\partial x_1} - \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) \quad \text{Ec. 7}$$

Dicha ecuación proviene de las ecuaciones de Euler y Navier-Stokes que son un sistema que se deduce a partir de la aplicación de la segunda ley de Newton y la ley de conservación de masa, con las que se describe el movimiento de un fluido, en componentes cartesianas se tiene:

$$\nabla \times u = \begin{bmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{bmatrix} = i \left(\frac{dw}{dy} - \frac{dv}{dz} \right) - j \left(\frac{du}{dz} - \frac{dw}{dx} \right) - k \left(\frac{dv}{dx} - \frac{du}{dy} \right) \quad \text{Ec. 8}$$

Existen tres formas de evaluar los giros, de acuerdo con cada plano (i, j, k) . El análisis de intensidad de vórtice se lleva a cabo en el plano i , por lo que en derivadas discretas se tiene (Córdoba, 2011).

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta y} = \frac{\omega_{i,j+1,k} - \omega_{i,j,k}}{\Delta y} \quad \text{Ec. 9}$$

$$\frac{\Delta v}{\Delta z} = \frac{\omega_{i,j,k+1} - \omega_{i,j,k}}{\Delta z}$$

Se recurrió a un análisis numérico para determinar soluciones aproximadas con ayuda del software MATLAB R2013a; el mallado consta de 3 secciones transversales colocadas a una distancia de 0.05, 0.10 y 0.15 m aguas abajo, en el sentido horizontal los puntos más cercanos a la pared del canal se encuentran separados de esta por una distancia de 0.035 m, los puntos restantes se encuentran separados a una distancia de 0.10 m entre ellos. En el sentido vertical se miden perfiles de 0.03 m (ver Figura 113). Los análisis de intensidad de vorticidad se realizaron bajo las condiciones hidráulicas de cada condición de flujo (ver Tabla 11, sección IV) con pilas y acumulación de escombros, se presentan gráficamente los resultados obtenidos de las componentes de velocidad u, v y w de acuerdo con la Ecuación 8 (ver Figura 114).

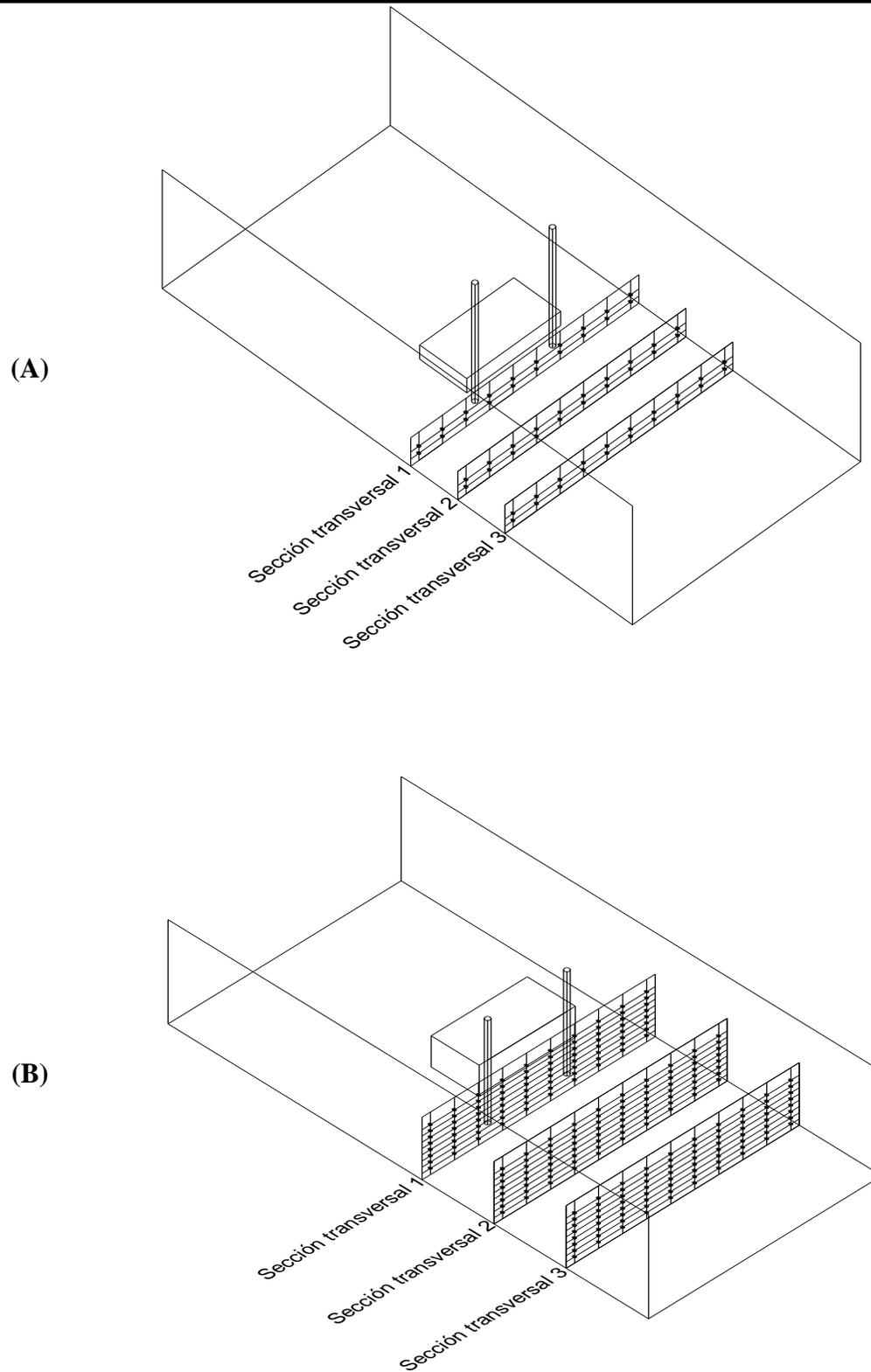


Figura 113. Mallado (A) condición de flujo CPN_01 y (B) condición de flujo CPN_02.

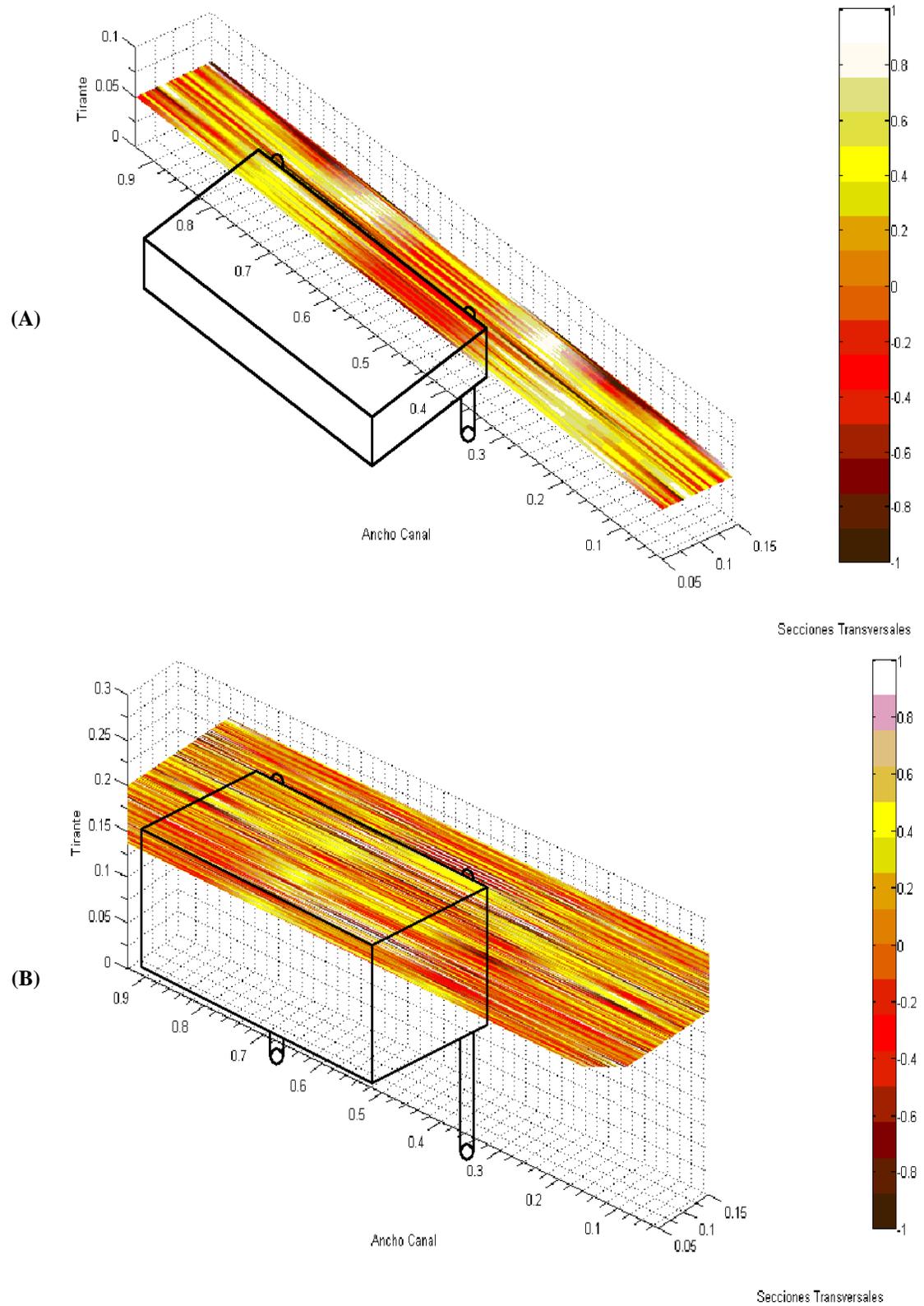


Figura 114. Intensidad del vorticidad (A) condición de flujo CPN_01 y (B) condición de flujo CPN_02.

Como se menciona al inicio de esta sección la vorticidad se define como la magnitud para cuantificar la rotación de un fluido. En la condición de flujo CPN_01 (ver Figura 114A) se observan dos zonas de vorticidad de diferente magnitud y sentido, la primera se localiza aguas abajo en la zona justo detrás de la acumulación de material leñoso, se aprecia un sistema de vórtices con sentido de rotación antihorario provocado por el flujo que pasa a través de los desechos acumulados, la vorticidad decrece conforme se avanza en “x” a una distancia de 0.15 m. La segunda zona se localiza a los costados de la acumulación de material con sentido de rotación horario, dado que en esa zona no existen obstáculos que provoquen un cambio en el flujo. Para la condición de flujo CPN_02 se observa en la Figura 114B una zona más estable en los vórtices dado que se tienen velocidades más bajas permite que los sistemas de vórtices se formen y se mantengan teniendo un giro antihorario.

IV.4 Relación de bloqueo

Para aplicar los resultados del presente estudio de una manera práctica, es necesario tener los datos de las siguientes variables:

- Dimensiones de la acumulación de material leñoso
- Velocidad del caudal en el cauce
- Número de Froude
- Relación de bloqueo

La acumulación de material está en función de su mecanismo de incorporación, en la sección “II.2.1 Origen e incorporación a los ríos” se describe que los procesos geomorfológicos repentinos (deslizamientos o avenidas) pueden provocar que en un solo evento lleguen al río una gran cantidad de troncos y ramas, los cambios bruscos del cauce, la erosión de los bancos, vientos e incendios también incorporan material al cauce (May & Gresswell, 2003); (Benda & Sias, 2003). 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, reportes de acumulación de sólidos en puentes y de la medición del material en sitio.

La información de la velocidad se puede adquirir midiendo la velocidad en sitio con diferentes instrumentos ADV o trazadores, buscar la información en los sitios de los organismos encargados de la cuenca o con el uso de un modelo numérico.

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.

La relación de bloqueo porcentual queda definida de la siguiente manera:

$$\Delta A = \frac{[(d_d - D) * t_d]}{(b * h)} * 100$$

Donde:

- $d_d =$ ancho de la acumulación de material leñoso
- $D =$ diametro de la pila
- $t_d =$ alto de la acumulación de material leñoso
- $b =$ ancho de plantilla
- $h =$ profundidad del agua

Teniendo la información de las variables anteriores se puede tomar como referencia la siguiente gráfica (pág. 120) la cual contiene la línea ajustada a los datos, su ecuación y el valor de R^2 (ver Figura 115).

Con ayuda de la Figura 115 es posible estimar una velocidad máxima cuando se presenta acumulación de material leñoso (V_w) en un cauce. Para esto es necesario contar con dos datos el número de Froude (Fr) y la velocidad inicial del cauce (V_i).

Ejemplo. Se ha construido un puente en un cauce con las siguientes características hidráulicas $Fr = 0.35$, $V_i = 2.5 \text{ m/s}$ y $h = 5 \text{ m}$. Se quiere conocer la velocidad que puede presentarse si en el puente se origina una acumulación de material leñoso.

Para resolver este problema se entra a la gráfica localizando el $Fr = 0.35$ en el eje de las abscisas, lo que arroja una relación $\frac{V_w}{V_i} = 1.55$, despejando V_i , se obtiene $V_w = 1.55 * V_i$. Sustituyendo el valor de V_i , se obtiene que en el cauce podrían presentarse velocidades cercanas a los 3.88 m/s cuando exista una acumulación de material leñoso.

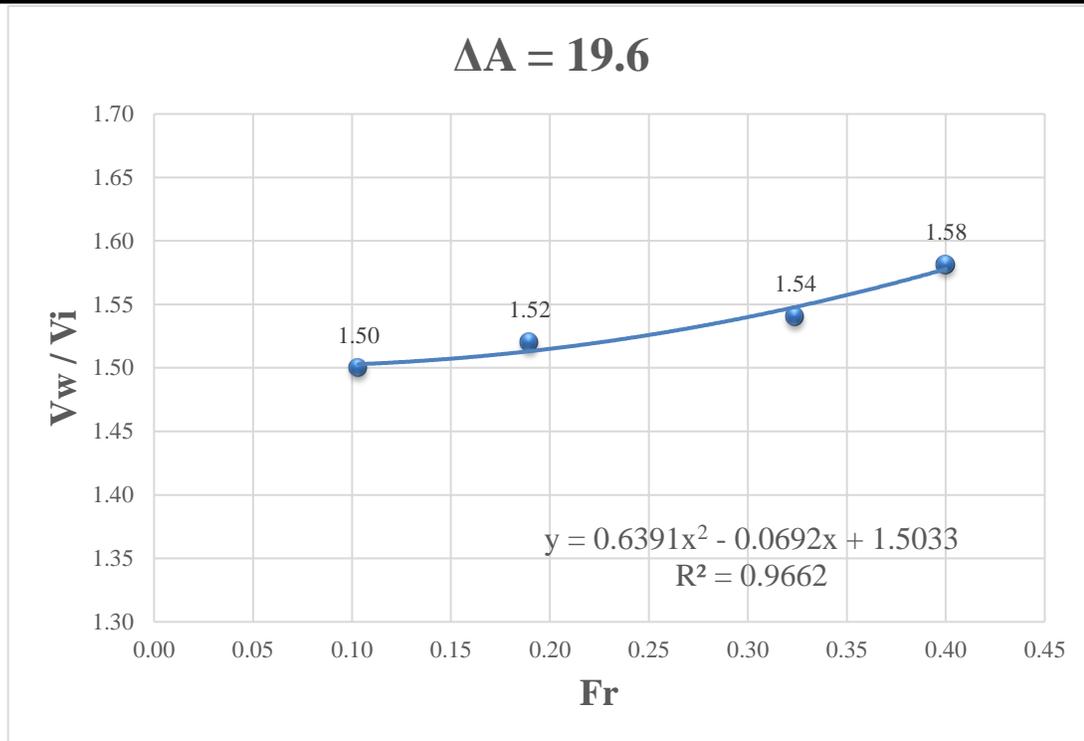


Figura 115. Grafica de relación número Froude y V_w/V_i , para una $\Delta A = 19.6$.

Como se aprecia esta grafica es una ayuda importante a la hora de determinar las velocidades que podrían ocurrir en un rio que sufre acumulación de material leñoso. Esto sirve para evitar poner en riesgo equipo de medición delicado ya que algunos equipos solo funcionan en un determinado rango de velocidades y muchas veces estos aparatos tienen un costo elevado de reparación en caso de sufrir algún daño. Además de que el personal que lleve a cabo las campañas de medición evitaría entrar a cauces con velocidades altas que ponen en riesgo su vida. Se observa que la gráfica está acotada a $Fr < 0.4$, por lo que se agrega la ecuación que describe su comportamiento a fin de conocer los datos de velocidad para $Fr > 0.4$.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1 Conclusiones

Trazadores

Las pruebas llevadas a cabo con los dos tipos de trazadores utilizados (azul de metileno y esferas de unicel) permitieron observar los efectos que tienen las pilas de puentes y la acumulación de material leñoso en el flujo.

- En un escenario sin obstáculos se observó un flujo uniforme permanente dado que no hubo cambios en el tirante, las partículas de agua se movieron en trayectorias definidas.
- En la superficie libre del agua se observó un aumento en las velocidades generado por la división del flujo provocado por las pilas en los costados del material leñoso el flujo adquirió una velocidad mayor por efecto de la reducción del área hidráulica.
- La acumulación de material leñoso genera un flujo de inmersión que pasa por debajo de esta con un aumento considerable en su velocidad.
- Se observó la formación de los vórtices estela aguas abajo de las pilas.
- Aguas arriba y aguas abajo de las caras del material leñoso el flujo pierde velocidad lo que provoca un efecto de embalse que tiende a estancar el flujo.

Curvas de igual velocidad

La elaboración de curvas de igual velocidad permitió conocer las zonas donde el flujo presenta un aumento o disminución en su velocidad en la sección transversal del canal experimental. Se generaron las curvas para las dos condiciones de flujo y para los tres respectivos escenarios de análisis. Para ambos casos se observó lo siguiente:

- Aguas abajo de las pilas se observan velocidades de menor magnitud con respecto al resto del canal, esto se puede asociar a que el ADV registra variaciones en las velocidades por efecto del flujo que se divide aguas arriba al chocar con la cara de la pila.
- En un escenario con pilas de puentes las velocidades pueden aumentar hasta un 13% si las comparamos a un escenario sin pilas.
- Aguas arriba y aguas abajo de las caras del material acumulado es donde se presentan las velocidades más bajas como consecuencia del flujo que pierde fuerza al atravesar el material leñoso.
- En comparación de un flujo sin obstrucciones las velocidades en presencia de acumulación de material leñoso llegaron a registrar aumentos de hasta un 51%.
- Los aumentos en la magnitud de la velocidad por efectos de la acumulación se observan incluso a profundidades a nivel de la plantilla.

Perfiles de velocidad

Al dibujarse los perfiles de velocidad con los datos de velocidad del flujo, permitió conocer las modificaciones que sufrieron por efecto de las pilas y de la acumulación de material.

- En los perfiles se observa que disminuye la velocidad aguas abajo de las pilas.
- En el caso de la condición con acumulación, la velocidad se incrementa en el fondo y decrece en la superficie.

Análisis de vorticidad

El análisis de vorticidad sirvió para corroborar de manera numérica la formación de zonas de inestabilidad que no siempre se apreciaba con el azul de metileno, dado que este se diluía en el agua. Esto es un ejemplo de que la modelación física y numérica se

complementan una con otra, dando un panorama más amplio de lo que sucede en los casos de estudio en el campo de la modelación hidráulica.

Relación de bloqueo

El uso de la gráfica de relación de bloqueo de material leñoso permite estimar velocidades que se podrían presentar cuando ocurre una acumulación de desechos sin el riesgo que tendría realizar una medición bajo estas condiciones. Por lo que generar este tipo de gráficas para diferentes escenarios serviría de apoyo a los diseñadores de puentes para tomar medidas preventivas y evitar la falla o colapso de estas estructuras.

V.2 Recomendaciones

En el presente estudio solamente se analizó la relación de "altura de la acumulación igual a 1/2 del tirante", por lo que se recomienda que se realicen más estudios, en los que se analice el efecto al variar esta relación. Así mismo, solamente se analizó la forma rectangular de acumulación con pilas circulares, por lo que se recomienda extender este estudio para diferentes formas de acumulación (circular, triangular, etc.) y de pilas (rectangular, alargadas, etc.) para tener un conocimiento más amplio de los efectos cuando se manejan diferentes tipos de formas.

Se recomienda el uso de medidas de protección de pilas de puentes para disminuir la acumulación de material leñoso y así prevenir la socavación y por consiguiente la falla de las estructuras. En los Anexos de este trabajo de investigación se presenta un resumen sobre medidas de mitigación.

El Instituto Mexicano del Transporte inicio en 2015 un programa de instrumentación y monitoreo remoto y continuo para evaluar la condición estructural presente y futura en los puentes carreteros del país con el fin de garantizar la seguridad de automovilistas y transportistas (Web, 2015). Sin embargo, no se toma en cuenta el efecto de la acumulación de material leñoso dejando de lado los efectos negativos generados por este fenómeno. Por lo que se recomienda incluir en los programas de monitoreo de puentes, los eventos con arrastre y acumulación de sólidos flotantes.

REFERENCIAS

- Abbe, T. B., & Montgomery, D. R. (18 de October de 2002). Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets river basin, Washington. *Geomorphology*, 51, 81-107. Obtenido de http://www.academia.edu/11211446/Patterns_and_processes_of_wood_debris_accumulation_in_the_Queets_river_basin_Washington
- Aguado Sandoval, A. (2012). *Estimación de la socavación en puentes para su uso en el cálculo del riesgo físico*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ahmed, F., & Rajaratnam, N. (1998). Flow around bridge piers. *ASCE*, 124(3), 288-300.
- Barboza Sosa, R., & Avila Perez, E. (17 de Julio de 2009). *EL UNIVERSAL.mx*. Obtenido de <http://archivo.eluniversal.com.mx/notas/613084.html>
- Benda, L. E., & Sias, J. C. (2003). A quantitative framework for evaluating the mass balance of instream organic debris. *Forest ecology and management*, 172, 1-16.
- Bradley, J. B., Richards, D. L., & Bahner, C. D. (2005). *Debris Control Structures Evaluation and Countermeasures*. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Braudrick, C. A., & Grant, G. E. (February de 2000). When do logs move in rivers? *WATER RESOURCES RESEARCH*, 36(2), 571-583. doi:10.1029/1999WR900290
- Braudrick, C. A., Grant, G. E., Ishikawa, Y., & Ikeda, H. (1997). Dynamics of wood transport in streams: a flume experiment. *EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS*, 22, 669-683. Obtenido de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.473.6974&rep=rep1&type=pdf>

- Campa-Rodríguez, A., & Astorga-Bustillos, F. (2015). Métodos para el cálculo de la socavación local en pilas de puentes. *TECNOCENCIA Chihuahua* 9(1), 36-48.
- Carmona González, E. A. (2009). *Hidráulica de canales abiertos "Compendio"*. Distrito Federal, México: Instituto Politécnico Nacional. Recuperado el 23 de 10 de 2017, de <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5481/tesis.pdf?sequence=3>
- Chiew, Y. M. (1984). *Local Scour at Bridge Piers*. Auckland, New Zeland: Department of Civil Engineering, Auckland University.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Santa fé de Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Comiti, F., D'Agostino, V., Moser, M., Lenzi, M. A., Bettella, F., Dell'Agnese, A., . . . Mazzorana, B. (2012). Preventing wood-related hazards in mountain basins:.. *12th Congress INTERPRAEVENT 2012 – Grenoble / France*, 651-662. Obtenido de http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2012_2_651.pdf
- Comiti, F., Andreoli, A., Mao, L., & Lenzi, M. A. (3 de July de 2007). Wood storage in three mountain streams of the Southern Andes and its hydro-morphological effects. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(2), 244-262. doi:10.1002/esp.1541
- Conservation Department of Environmental. (s.f.). *DEC*. Obtenido de <http://www.dec.ny.gov/lands/92418.html>
- Córdoba, D. (1-3 de Junio de 2011). *Real and functional analysis research group*. Obtenido de LOS PROBLEMAS DEL MILENIO: http://garf.ub.es/milenio/img/presentacion_navier_stokes.pdf
- Daily, J. W., & Harleman, D. R. (1975). *Dinámica de los fluidos*. Ciudad de México, México: Trillas.
-

- Del Refugio Torrentera, L. O. (29 de Septiembre de 2010). *Periodismo de Paz*. Recuperado el 2017, de Ciudadania Express: <http://ciudadania-express.com/2010/09/29/evidencian-danos-deficiencia-de-obra-publica/>
- Diehl, T. H. (1997). *Potential Drift Accumulation at Bridges*. Washington, D.C: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- El Día. (26 de Enero de 2013). *Eldiaonline.com*. Obtenido de <http://www.eldiaonline.com/gualeguay-se-derrumbo-totalmente-el-viejo-puente-pellegrini/>
- Ettema, R. (1980). *Scour at Bridge Piers*. Auckland, New Zeland: Department of Civil Engineering, University of Auckland.
- Federal Preservation Institute. (2001). *Flood hazard mitigation handbook*. FEMA. Obtenido de https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1715-25045-1910/flood_mithandbook_for_public_facilities.pdf
- Gunt Hamburg. (2017). *Gunt Hamburg*. Recuperado el 24 de Julio de 2017, de http://www.gunt.de/images/download/Fundamentos-del-transporte-de-sedimentos_spanish.pdf
- Gurnell, A., Piegay, H., Swanson, F., & Gregorys, S. (2002). Large wood and fluvial processes. *Freshwater Biology*, 47, 601-619. Obtenido de <https://andrewsforest.oregonstate.edu/sites/default/files/lter/pubs/pdf/pub3010.pdf>
- Hamill, L. (1999). *Bridge hydraulics*. Londres: E. & F.N. Spon.
- Herald, T. G. (7 de Octubre de 2017). *NZ Press Council*. Obtenido de <http://gisborneherald.co.nz/environment/2970088-135/cyclone-slash-already-in-rivers>
- Highways Agency. (1994). *Design Manual for Roads Bridges*. London: HMSO. Obtenido de <http://www.standardsforhighways.co.uk/ha/standards/dmrb/vol1/section3/ba5994.pdf>
-

- Khwairakpam, P., & Mazumdar, A. (May de 2009). Local Scour Around Hydraulic Structures. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1(6), 59-61. Obtenido de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.381.7108&rep=rep1&type=pdf>
- Lagasse, P. F., Clopper, P. E., Zevenbergen, L. W., Spitz, W. J., & Girard, L. G. (2010). *Effects of debris on bridge pier scour (1st ed.)*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Lyn, D. A., Cooper, T., Yi, Y.-K., Sinha, R., & Rao, A. R. (2003). *Debris Accumulation at Bridge Crossings: Laboratory and Field Studies*. Indiana: Indiana Department of Transportation and the. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/096e/c308ca9a9b7fa1e33e9feed3ba932a4e404.pdf>
- MacVicar, B. J., Piégay, H., Henderson, A., Comiti, F., Oberlin, C., & Pecorari, E. (13 de November de 2009). Quantifying the temporal dynamics of wood in large rivers: field trials of wood surveying, dating, tracking, and monitoring techniques. *EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS*, 34, 2031–2046. doi:10.1002/esp.1888
- MacVicar, B., & Piégay, H. (1 de March de 2012). Implementation and validation of videomonitoring for wood budgeting in a wandering piedmont river, the Ain River (France). *EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS*, 37, 1272-1289. doi:10.1002/esp.3240
- Manners, R., Doyle, M. W., & Small, M. J. (30 de Junio de 2007). Structure and hydraulics of natural woody debris jams. *Water Resources Research Volume 43, Issue 6*, 43(6). doi:10.1029/2006WR004910.
- Martin Vide, J. P. (2003). *Ingeniería de ríos*. México, D.F.: Alfaomega.
- Martínez Mejía, J. E. (2009). *Aspectos básicos de la vulnerabilidad de puentes por el paso de avenidas extraordinarias*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
-

- Masmar. (5 de Octubre de 2017). *Masmar tu portal náutico en internet*. Obtenido de <http://www.masmar.net/esl/Blogs/Navegando-por-nuestras-costas-y-viajando-por-su-entorno/Subiendo-por-el-R%C3%ADo-Mi%C3%B1o-hasta-Tui>
- May, C. L., & Gresswell, R. E. (2003). Large wood recruitment and redistribution in headwater streams in the southern Oregon Coast Range, U.S.A. *Canadian Journal of Forest Research.*, 33, 1352-1362. Obtenido de https://www.fs.fed.us/psw/publications/may/May_Gress_CJFR.pdf
- Mazzorana, B., Hübl, J., Zischg, A., & Largiader, A. (19 de January de 2010). Modelling woody material transport and deposition in alpine rivers. *Natural Hazards*, 56(2), 425–449. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-009-9492-y>
- Melville, B. W., & Coleman, S. E. (2000). *Bridge Scour*. Colorado, USA.: Water Resource Publications.
- Merten, E., Finlay, J., Johnson, L., Newman, R., Stefan, H., & Vondracek, B. (9 de October de 2010). Factors influencing wood mobilization in streams. *Water Resources Research*, 46, 1-13. doi:10.1029/2009WR008772
- Montgomery, D. R., & Piégay, H. (2003). Wood in rivers: interactions with channel morphology and processes. *Geomorphology*, 51, 1-5. Obtenido de http://gis.ess.washington.edu/grg/publications/pdfs/Mont_Piegay.pdf
- Morquecho, A. (17 de Septiembre de 2009). *Desde el lugar de los hechos para el mundo*. Recuperado el 22 de Julio de 2017, de <http://morquecho.blogspot.mx/2009/09/incomunicado-huixastla-se-rompio-el.html>
- Muñoz Sánchez, R. E. (7 de Agosto de 2009). *INFORMADOR.MX*. Obtenido de <http://www.informador.com.mx/mexico/2009/127275/6/socavamiento-del-rio-causa-de-colapso-en-puente-tonala-sct.htm>
- Muñoz Visuet, D. (2000). *Efectos de la socavación en el diseño de puentes*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
-

- Nación, L. (28 de Mayo de 2015). *GRUPO NACIÓN S.A.* Obtenido de http://www.nacion.com/nacional/infraestructura/MOPT-descarta-riesgo-puente-Chirripo_0_1490251036.html
- Nortek, A. (2012). *Nortek Quick Guide - USER GUIDE* . Boston, MA: Nortek Scientific Acoustic Development Group Inc.
- Pagliara , S., & Carnacina, I. (2010). Temporal scour evolution at bridge piers: effect of wood debris roughness and porosity. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), 3-13.
- Pagliara , S., & Carnacina, I. (2010 de Marzo de 2010). Temporal scour evolution at bridge piers: effect of wood debris roughness and porosity. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), 3-13. doi:doi:10.1080/00221680903568592
- Pagliara, S., & Carnacina, I. (15 de Agosto de 2012). Bridge pier flow field in the presence of debris accumulation. *Institution of Civil Engineers*, 166, 187-198. doi:http://dx.doi.org/10.1680/wama.11.00060
- Parola, A. C., Hagerty, D. J., & Kamojjala, S. (1998). *Highway Infrastructure Damage Caused by the 1993 Upper Mississippi River Basin Flooding*. Washington, DC, USA: Transportation Research Board. Obtenido de http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_417.pdf
- Peñaloza Rueda, X., González Verdugo, J. A., & Espinoza Ayala, M. J. (2015). *Estudio experimental para caracterización de efectos del arrastre de solidos sobre estructuras de cruce en ríos de zonas urbanas*. México D.F.: CONAGUA.
- Pérez Luna, C. P. (2012). *Modelación numérica de la hidrodinámica de la erosión en pilas de puentes con esviaje empleando la dinámica de fluidos computacional cfd*. FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM, DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO . MÉXICO D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Piégay, H., Alber, A., Slater, L., & Bourdin, L. (26 de Agosto de 2009). Census and typology of braided rivers in the French Alps. (Birkhäuser-Verlag, Ed.) *Aquatic Sciences*, 71, 371-388. doi:https://doi.org/10.1007/s00027-009-9220-4
-

- Reinoso Angulo, E., Rodríguez Rodríguez, M. E., & Betancourt Ribotta, R. (2000). *Manual de diseño de estructuras prefabricadas y presforzadas*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería UNAM. México D.F.: ANIPPAC.
- Rojas López, L. F., González Verdugo, J. A., & Peñalosa Rueda, X. (2017). *Influencia de la acumulación de escombros en el proceso de socavación local en pilas de puentes*. Acapulco, Guerrero, Mexico: Asociación Mexicana de Hidráulica.
- Ruiz Villanueva, V., & Díez Herro, A. (2012). El transporte de carga leñosa (woody debris) en el análisis de peligrosidad por avenidas e inundaciones. *Sociedad Geologica de España*, 439.
- Ruiz Villanueva, V., Díez Herrero, A., Bodoque, J. M., & Blade, E. (2015). Avances en el análisis del material leñoso en ríos: incorporación, transporte e influencia en el riesgo por inundaciones. *Cuaternario y Geomorfología*, 29 (3-4). doi:10.17735/cyg.v29i3-4.29773
- Schmocker, L., & Hager, H. (2011). Probability of Drift Blockage at Bridge Decks. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 137, 470-479.
- Sheeder, S. A., & Johnson, P. A. (2008). *Controlling Debris at Pennsylvania Bridges*. Pennsylvania: The Thomas D. Larson Pennsylvania Transportation Institute.
- Smith, D. (1976). *Bridge failures*. Proceedings Institution of Civil Engineers.
- Smith, D. (1977). Why do bridges fail? *Institution of Civil Engineers*, 58-62.
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de canales*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Tyler, R. N. (2011). *River Debris: Causes, Impacts, and Mitigation Techniques*. Fairbanks, AK: Alaska Center.
- Wallerstein, N. P., & Thorne, C. R. (2004). Influence of large woody debris on morphological evolution of incised, sand-bed channels. *Geomorphology*, 57, 53-73. doi:https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00083-7
-

- Web, O. (10 de Agosto de 2015). *Obras Web*. Obtenido de <http://www.obrasweb.mx/construccion/2015/08/10/el-imt-inicia-programa-de-monitoreo-de-puentes-carreteros>
- Welber, M., Bertoldi, W., & Tubino, M. (15 de November de 2013). Wood dispersal in braided streams : Results from physical modeling. *WATER RESOURCES RESEARCH*, 49, 7388–7400. doi:10.1002/2013WR014046
- White, K. R., Minor, J., & Derucher, K. R. (1992). *Bridge maintenance inspection and evaluation*. (M. Dekker, Ed.) New York: Marcel Dekker Inc.
- Wikipedia. (9 de Junio de 2014). *Río Pardo (São Paulo)*. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/R%C3%ADo_Pardo_\(S%C3%A3o_Paulo\)](https://es.wikipedia.org/wiki/R%C3%ADo_Pardo_(S%C3%A3o_Paulo))
- Wikipedia. (10 de Septiembre de 2017). *Fundación Wikipedia, Inc.* Obtenido de [https://ceb.wikipedia.org/wiki/Gumagamit:Lsjbot/Duplicates/Skagit_River_\(suba_sa_Estados_Unidos\)](https://ceb.wikipedia.org/wiki/Gumagamit:Lsjbot/Duplicates/Skagit_River_(suba_sa_Estados_Unidos))
- Wikipedia. (6 de Octubre de 2017). *Fundación Wikipedia, Inc.* Obtenido de <https://it.wikipedia.org/wiki/Esla>
- Wipf, T. J., Phares, B., & Dahlberg, J. (2012). *Debris Mitigation Methods for Bridge Piers*. Iowa: Institute for Transportation Iowa State University.
- Zevenbergen, L., Lagasse, P., & Clopper, P. (2007). Effects of Debris on Bridge Pier Scour. *World Environmental And Water Resources Congress 2007*, 243-376. Obtenido de [http://dx.doi.org/10.1061/40927\(243\)376](http://dx.doi.org/10.1061/40927(243)376)

ANEXOS

Medidas de protección

Aunque se diseñe un puente considerando la acumulación de material leñoso, si el problema de arrastre de sólidos flotantes en el cauce es fuerte, es conveniente aplicar medidas de mitigación. Estas medidas se agrupan en estructurales y no estructurales. Las medidas estructurales consisten en la construcción de estructuras aguas arriba que atrapen o desvíen el material para que este no quede atrapado en las pilas, por ejemplo, aletas deflectoras, represas, espigones, deflectores, barredoras, puntales, rejillas y características de diseño de los puentes (ver Figura 116). Las medidas no estructurales consisten principalmente en el cuidado, limpieza del río y administración de la cuenca (Wipf, Phares, & Dahlberg, 2012). Un método apropiado para proteger un puente en específico debe ser seleccionado de entre estas opciones basándose en la idoneidad de una estructura por las características de la forma del canal, costos de construcción y mantenimiento, riesgo asociado con el fallo de la estructura, y consideraciones estéticas (Sheeder & Johnson, 2008).

Medidas estructurales

Aletas deflectoras. Las aletas pueden ser extensiones mismas de las pilas o una construcción independiente del puente. Se encuentran alineadas paralelamente al flujo del río para maximizar la efectividad, ya que existe una mayor posibilidad de recolección de troncos cuando el flujo es oblicuo a la aleta (Wipf *et al.*, 2012). Las aletas son más eficaces en flujos de mayor velocidad y han demostrado ser muy eficaces en áreas donde hay grandes cantidades de desechos (Federal Preservation Institute, 2001). Estas estructuras se recomiendan para el control de desechos de medianos o grandes, requieren niveles moderados de mantenimiento y tienen un impacto medioambiental relativamente bajo cuando están adecuadamente diseñados e instalados (Bradley *et al.*, 2005) (ver Figura 116A).

Presas. Son estructuras que se construyen aguas arriba de un puente a fin de recolectar el material leñoso antes de que este llegue a la estructura y se deposite. Son construcciones sumamente eficientes en la recolección de material leñosos y sedimentos, sin embargo, son estructuras de costo elevado de construcción, necesitan mantenimiento regular e impiden el movimiento de la fauna acuática. Debido al mantenimiento y a las consideraciones ecológicas, las presas no son una solución práctica a los problemas de desechos (Sheeder & Johnson , 2008) (ver Figura 116B).

Espigones. Son estructuras que se colocan en los cauces de las orillas, en sentido no lineal con el flujo, modifican el patrón del flujo para redistribuir el transporte de sólidos flotantes en el cauce (Peñaloza Rueda *et al.*, 2015). El transporte de troncos es dirigido principalmente por las corrientes dentro de un río, así uno puede asumir que si las corrientes pueden ser controladas entonces también pueden los troncos. La eficacia del método puede ser específica para la ubicación, ya que la funcionalidad puede disminuir en las ubicaciones de los canales rectos de los ríos. Del mismo modo, el costo total de implementación depende en gran medida de la ubicación, ya que las condiciones del sitio pueden variar considerablemente de un sitio a otro (Wipf *et al.*, 2012) (ver Figura 116C).

Deflectores. Los deflectores de desechos de troncos y ramas son pilas de sacrificio colocadas aguas arriba de las pilas del puente para desviar el material leñoso de la pila y guiar los desechos a través de la abertura del puente. Normalmente se disponen en una configuración en forma de “v” con el vértice aguas arriba. Aunque los deflectores cilíndricos han sido ampliamente utilizados en los Estados Unidos, su eficacia como contramedida de acumulación de troncos es cuestionable y pueden exacerbar el problema bajo ciertas condiciones (Sheeder & Johnson , 2008) (ver Figura 116D).

Barredora. Es un dispositivo de polietileno que está unido 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 abajo del puente (Sheeder & Johnson , 2008) (ver Figura 116E).

Barrera. Son estructuras que flotan en la superficie del agua para retener los sólidos flotantes, requieren guías para mantenerse en su lugar (Peñaloza Rueda *et al.*, 2015) (ver Figura 116F).

Reja. Son estructuras construidas a través de un río o arroyo que apuntan a capturar los troncos antes de alcanzar el puente (Wipf *et al.*, 2012) (ver Figura 116G).

Características de diseño. Son las características estructurales que se pueden implementar en el diseño de una estructura de puente. La primera característica es el 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 (Peñaloza Rueda *et al.*, 2015).



Aleta deflectora. Fuente: (Wipf *et al.*, 2012).



Presa. Fuente: (Bradley *et al.*, 2005).



Espigón. Fuente: (Bradley *et al.*, 2005).



Deflector. Fuente: (Lagasse *et al.*, 2010).



Barredora. Fuente: (Bradley *et al.*, 2005).



Barrera. Fuente: (Tyler, 2011).



Reja. Fuente: (Bradley *et al.*, 2005).

Figura 116. Medidas de mitigación estructurales.

Medidas no estructurales

Generalmente en las medidas no estructurales se tienen en primer lugar la remoción o mantenimientos, que consiste en retirar el material acumulado en las pilas y su colocación lejos de la ribera del río, pero este método tiende a ser difícil y costoso, y no garantiza que el material no vuelva a acumularse durante la siguiente avenida. En segundo lugar, está la gestión de la cuenca aguas arriba con el propósito de reducir la cantidad de escombro que se atrapa, reduciendo las fuentes de desecho, evitar su introducción al río y limpiando los

desechos. Otras medidas son la eliminación de árboles muertos, caídos y la estabilización de las laderas cercanas a la corriente (Rojas López, González Verdugo, & Peñaloza Rueda, 2017).