

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA



**“MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL TRANSPORTE DE TRONCOS FLOTANTES EN
EL MEANDRO DEL RÍO MADRE DE DIOS, SECTOR LA PASTORA – PUERTO
MALDONADO”**

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERO HIDRÁULICO

Presentado por:

CHUÁN HUINGO, Wálter

Asesorado por:

MSc. Ing. VASQUEZ RAMIREZ, Luis

CAJAMARCA - PERU

2020

DEDICATORIA

Dedico esta tesis A. DIOS y su hijo Jesús, a la Virgen María, y a Santo Tomás de Aquino, patrono de los estudiantes, quienes inspiraron mi espíritu para la conclusión de esta tesis de pregrado, en modelamiento hidráulico. A mis padres quienes me dieron vida, educación, apoyo y consejos; pues sin su ayuda nunca hubiera podido realizar este trabajo.

AGRADECIMIENTO

La fase experimental de esta investigación fue financiada mediante aportes del Contrato N° 358-PNICP-PIAP-2014, firmado entre la Universidad Nacional de Ingeniería y el Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad del Ministerio de la Producción, INNOVATE PERU. El autor desea agradecer a este programa, por el apoyo brindado al proyecto; así como al Director del Laboratorio Nacional de Hidráulica, Phd. Julio Kuroiwa Zevallos; al Ing. Luis Castro Inga, profesional a cargo del proyecto; y a los compañeros del grupo de investigación.

INDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Formulación del problema	2
1.3. Hipótesis del problema	2
1.4. Justificación	2
1.5. Alcances de la investigación	3
1.6. Objetivos	3
1.7. Descripción de contenidos	3
II. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Antecedentes teóricos	5
2.2. Bases teóricas.....	5
2.2.1. Flujo en meandros	5
2.2.2. Restos leñosos en sistemas fluviales.....	8
2.2.3. Espigones Engineering Log Jam (ELJ).....	27
2.2.4. Modelos hidráulicos.....	30
2.3. Términos básicos.....	35
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
3.1. Área de estudio.....	36
3.2. Unidades geográficas	37
3.3. Unidades geomorfológicas.....	37
3.4. Clima y vegetación	39
3.5. Zonas de deforestación	40
3.6. Productividad de restos leñosos.....	42
3.7. Hidrología de la cuenca	47
3.8. Modelo físico y descripción de instalaciones	48
3.8.1. Inicio del modelo	49
3.8.2. Estructura principal	51
3.8.3. Fin del modelo y canal de retorno	54
3.8.4. Estructuras auxiliares.....	54
3.9. Equipos y materiales.....	56
3.10. Estimación de la cantidad y dimensionamiento de leños en arrastre.....	60
3.10.1. Volumen de troncos que aportan las áreas inundables	60
3.10.2. Volumen de troncos que aportan las áreas elevadas.	62

3.10.3.	Caudal de troncos (Q_t)	69
3.10.4.	Dimensionamiento de troncos y raíces	70
3.11.	Transferencia de información leñosa de prototipo a modelo	75
3.11.1.	Dimensiones de clavijas (troncos) y discos (raíces)	75
3.11.2.	Caudal total de clavijas con y sin discos (Q_T clav)	75
3.12.	Procedimiento experimental	76
3.12.1.	Elaboración de las clavijas con y sin discos	76
3.12.2.	Densidad y profundidad boyante de las clavijas con y sin discos	76
3.12.3.	Replanteo del lecho móvil.....	79
3.12.4.	Elaboración y colocación de los ELJs	84
3.12.5.	Incorporación de las clavijas sobre la faja transportadora	86
3.12.6.	Puntos estratégicos para la toma de velocidades.....	88
IV.	ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS	93
4.1.	Ensayo N°1 sin espigones ELJ	93
4.1.1.	Trayectorias y fuerzas de arrastre de las clavijas	94
4.2.	Ensayo N°2 con espigones ELJ	104
4.2.1.	Trayectorias y fuerzas de arrastre de las clavijas	104
4.2.2.	Atasco y acumulación de clavijas en el sistema conformado de 11 espigones ELJ	113
4.2.3.	Efectos de las clavijas atrapadas en el sistema conformado de 11 espigones ELJ.	116
4.3.	Ensayo N°3 sin espigones ELJ	117
4.3.1.	Trayectorias y fuerzas de arrastre de las clavijas	117
4.4.	Ensayo N°4 con espigones ELJ	123
4.4.1.	Trayectorias y fuerzas de arrastre de las clavijas	124
4.4.2.	Atasco y acumulación de clavijas en el sistema conformado de 12 espigones ELJ	132
4.4.3.	Efectos de las clavijas atrapadas en el sistema conformado de 12 espigones ELJ.	134
4.5.	Semejanzas y divergencias entre ensayos	136
4.5.1.	En todos los ensayos.....	136
4.5.2.	Ensayo 1 y 3 – sin espigones	137
4.5.3.	Ensayo 2 y 4 – con espigones.....	137
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	140
5.1.	CONCLUSIONES	140
5.2.	RECOMENDACIONES	141
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	142
ANEXOS	146

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica izq.) Bosquejo del flujo helicoidal en la curva de un río (gráfico de Obras Hidráulicas, s.f.). Gráfica der.) Esbozo de definición del flujo de canales abiertos curvados y de la circulación transversal (gráfico traducido de Blanckaert y Vriend, 2004).	6
Figura 2. Bosquejo en perfil y planta del comportamiento hidrodinámico en la curva de un río (gráfico traducido de Julien, 2002).	7
Figura 3. Esquema que muestra la sección transversal de un río sinusoidal (gráfica de Dey, 2014).	8
Figura 4. Tres principales procesos de reclutamiento de restos de árboles: (Ls) derrumbes, (Ft) transporte fluvial durante inundaciones y (Be) erosión de bancos (gráfico de Ruiz-Villanueva, 2012).	9
Figura 5. Data de un tramo del río Mack Creek, Oregon: (a) Número de troncos entregados anualmente por cada 100 m de canal; (b) Distribución por tamaño de los troncos (Fuente: Gurnell et al., 2002).	11
Figura 6. Variaciones de diámetros y densidad de la madera que predicen la mortalidad de los árboles en los bosques amazónicos (gráfico de Chao et al., 2008)	12
Figura 7. Balance de fuerzas sobre un tronco (gráfico modificado de Castellet et al., 2012).	12
Figura 8. a) Densidad del tronco mayor a la del agua, y profundidad del agua menor al diámetro; b) Densidad del tronco mayor a la del agua, y profundidad del agua mayor al diámetro; c) Densidad del tronco menor o igual a la del agua, y profundidad del agua mayor o igual al diámetro; d) Densidad del tronco menor o igual a la del agua, y profundidad del agua menor al diámetro (gráfico modificado de Ruiz-Villanueva et al., 2012).	13
Figura 9. Diagramas de fuerza-cuerpo de las componentes del balance de fuerzas sobre un tronco sin raíz (De Braudrick and Grant, 2000 y traducido por Ruiz-Villanueva et al., 2012).	14
Figura 10. Diagramas de cuerpo-fuerza de las componentes del balance de fuerzas sobre un tronco con raíz (De Braudrick and Grant, 2000 y traducido por Ruiz-Villanueva et al., 2012).	17
Figura 11. Esquema de la longitud de diseño de un tronco unido a su bulbo de raíz, diámetro extremo, y la extensión de la masa de la raíz (gráfico traducido de NCHRP 2010).	21
Figura 12. Características principales de una clavija sometida a flotación.	21
Figura 13. A) Patrones de flujo secundarios en canales rectos. B) Categorías de ubicación con respecto a la entrega local de restos leñosos en tramos rectos (gráficos traducidos de NCHRP 2010).	23
Figura 14. A) Patrones de flujo secundarios en canales curvos. B) Categorías de ubicación con respecto a la entrega local de restos leñosos en tramos curvos (gráficos traducidos de NCHRP 2010).	24
Figura 15. a) Si la raíz permanece estable después de que el transporte de la carga sobre el lecho ha iniciado, (b) La socavación puede comenzar el proceso cuando parte de la raíz sumergida es enterrado en el lecho. (c) Raíces enterradas tienen sus trocos señalando río abajo y crean siempre obstrucciones dentro del río (gráficos de Abbe and Brooks 2011).	25
Figura 16. a) Vista en planta del flujo en un meandro con atascos. b) vista en sección transversal del canal mirando hacia aguas abajo dentro del atasco (gráficos de Abbe y Montgomery, 2003).	26
Figura 17. Tipología de grandes acumulaciones de madera observados en grandes ríos de sistemas trenzadas de tierras altas a las tierras bajas (gráfico traducido de Gurnell et al. 2002).	26
Figura 18. Detalles del diseño de los escombros árbolados (gráfico traducido del NCHRP, 2005).	29
Figura 19. Ubicación política del meandro en el departamento Madre de Dios a la altura de la ciudad de Puerto Maldonado (Mapa modificado de propuesta de zonificación ecológica económica, s.f.).	36
Figura 20. Geomorfología del mapa de peligros en la ciudad de Puerto Maldonado (gráfico modificado de INDECI, 2006).	38

Figura 21. Impacto de Minería en la Turbidez de los ríos (gráfico de MINAG-ANA-DCPRH-ASUP-ALA MALDONADO 2010).....	41
Figura 22. Establecimiento de una línea de transectos con parcelas para un estudio (Portland State University, s.f.)	43
Figura 23. Diseño anidado de la parcela de muestreo de biomasa, necromasa y de carbono en el suelo (gráfico de García Soria et. al, 2012).....	44
Figura 24. Ubicación del estudio indicando las áreas de estudio en el departamento de Madre de Dios, Perú (gráfico de Araujo-Murakami et al. 2011).....	45
Figura 25. Delimitación de ríos en la cuenca para determinar la erosión del año 2000 (líneas de color rojo) al 2015 (líneas de color azul).	63
Figura 26. Márgenes del cauce principal del río Madre de Dios desde La Pastora-Puerto Maldonado hasta la boca del río Inambari para los años 2000 – 2015.	65
Figura 27. Áreas erosionadas del tramo activo desde La Pastora-Puerto Maldonado hasta la boca del río Inambari durante los años 2000 – 2015.	65
Figura 28. Márgenes de los cauces del río Madre de Dios y principales tributarios para el año 2000 y 2015. Tramo activo desde la boca del río Inambari hacia aguas arriba en ArcMap 10.3.	66
Figura 29. Áreas erosionadas por los ríos aguas arriba de la boca del río Inambari durante el transcurso de los años 2000 – 2015.....	67
Figura 30. Numeración de las áreas erosionadas próximas a la boca del río Colorado.....	68
Figura 31. Vista de perfil para el replanteo de una sección del lecho en el modelo físico.	81
Figura 32 . Vista en planta de las curvas de nivel del plano topográfico.	82
Figura 33. Vista en planta de la distribución de puntos para la medición de velocidades en cada sección transversal.	89
Figura 34. Distribución de seis puntos de la toma de velocidades en cada sección transversal del tramo curvo.	90
Figura 35. Sección transversal, 10 cm aguas arriba de los espigones, donde se muestra los IV puntos de toma de velocidades.....	91
Figura 36. Vista en planta de las líneas de corriente en la superficie del flujo en el tramo curvo.....	92
Figura 37. Gráfico velocidad superficial (U) vs espejo de agua (W) de la sección 3+120, ensayo 1.....	99
Figura 38. Perfil de velocidades 3D en el punto 2/sección 3+120 - zona de socavación, ensayo 1.	99
Figura 39. Gráfico Fd vs Dt de clavijas sin discos en el punto 2/sección 3+120, ensayo 1.	100
Figura 40. Gráfico Fd vs Dt de las clavijas con discos en el punto 2/sección 3+120, ensayo 1.....	101
Figura 41. Longitud de la curva en los puntos 1 vs Fd máximas de clavijas con disco, ensayo 1.	103
Figura 42. Longitud de la curva por los puntos 1 vs Fd máximas de clavijas con disco, ensayo 2.....	109
Figura 43. Longitud de la curva por los puntos 2 vs Fd máximas de clavijas con disco, ensayo 2.....	110
Figura 44. Gráfica Fd vs Dt de clavijas sin discos en E-1, ensayo 2.....	111
Figura 45. Gráfica Fd vs Dt de clavijas con discos en E-1, ensayo 2.....	112
Figura 46. Gráfico U vs W de la sección 3+120, ensayo 3.....	119
Figura 47. Perfil de velocidades 3D en el punto 2/sección 3+120 - zona de socavación, ensayo 3.	120
Figura 48. Gráfico Fd vs Dt de las clavijas sin discos en el punto 2/sección 3+120, ensayo 3.....	121
Figura 49. Gráfico Fd vs Dt de las clavijas con discos en el punto 2/sección 3+120, ensayo 3.....	121
Figura 50. Longitud de la curva por los puntos 1 vs Fd máximas de clavijas con disco, ensayo 3.....	122
Figura 51. Longitud de la curva por los puntos 2 vs Fd máximas de clavijas con disco, ensayo 3.....	123
Figura 52. Longitud de la curva por los puntos 1 vs Fd máximas de clavijas con disco, ensayo 4.....	128

Figura 53. Longitud de la curva por los puntos 2 vs Fd máximas de clavijas con disco, ensayo 4.....	129
Figura 54. Gráfica Fd vs Dt de clavijas sin discos en E-1, ensayo 4.....	130
Figura 55. Gráfica Fd vs Dt de clavijas con discos en E-1, ensayo 4.....	131

INDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Fotografía izq.) Derrumbes en el acantilado del sector La Pastora (Odebrecht SAC, 2011). Fotografía der.) Vista satelital de la Carretera Interoceánica Perú-Brasil cerca a la orilla en peligro.	2
Imagen 2. Deforestación ilegal ocasionado por empresas madereras en la Amazonía brasileña (fotografía de Alexis, 2011).....	10
Imagen 3. Fotografía izq.) Grandes ríos aluviales con carga de madera de tierras bajas en la región de Puget Sound. Fotografía der.) Árboles cayendo desde una plantación forestal a lo largo del río Hoh. Ambas fotos en Estados Unidos (Fuente: McHenry y Abbe, 2012).	10
Imagen 4. Bloqueo del transporte fluvial a causa del flujo de restos leñosos en un río de Malasia que amenaza grandes inundaciones aguas abajo (de Dominic Lee Ik Leong, 2010).	20
Imagen 5. Izquierda) Cabecera del río Tajo, después de una crecida, donde grandes cantidades de leños fueron movilizadas y atascados (fotografía de la universidad Complutense de Madrid, 1920-30'). Derecha) Palizada en Puerto Mazan en la ribera derecha del río Napo en 1998 (BID, 2010).....	27
Imagen 6. Construcción de un espigón ELJ que está siendo instalada en el río del salmón (fotografía de Knutson y Fealko, 2014).....	28
Imagen 7. Fotografía del prototipo (tramo curvo) del río Madre de Dios ubicado en la zona de riesgo “La Pastora - Puerto Maldonado”. Las flechas indican el sentido del flujo.	37
Imagen 8. Vista de la fachada del laboratorio nacional de hidráulica en la ciudad de Lima-Perú.	48
Imagen 9. Vistas de los tanques vertederos, las pozas de disipación y transición ubicadas antes del inicio del canal experimental.	49
Imagen 10. Fotografía izq.) Soldado de los ejes junto a las platinas circulares en los extremos de las tuberías. Fotografía Der.) Distribución de las 5 tuberías en base al ajuste con la faja textil.	50
Imagen 11. Fotografía izq.) Acoplamiento y empernado de las chumaceras sobre el muro izquierdo del canal. Fotografía Der.) Regulador manual para adecuarse al caudal de troncos, y trazado de líneas para las subáreas.	51
Imagen 12. Estructura principal o canal curvo de lecho arenoso protegido por espigones ELJ.	51
Imagen 13. Vista de la permeabilidad y empotramiento y distribución de los espigones ELJ en el modelo.	53
Imagen 14. Vista del final del modelo. Las flechas verdes indican la recirculación del flujo.	54
Imagen 15. Especificaciones técnicas de los niveles de ingeniero.	57
Imagen 16. Regla, carro deslizante y varilla metálica vertical.	57
Imagen 17. Imagen referencial del Vectrino Profiler. Fuente: Folleto de Nortek AS.	58
Imagen 18. Laptop conectada ADV mediante un cable azul de 30 metros.	58
Imagen 19. Soporte Metálico móvil del ADV construido por el LNH.	58
Imagen 20. Limnómetro para la medición de caudales en el vertedero izquierdo.....	59
Imagen 21. Cámara filmadora Gopro Hero 4 montada en un dron 3DR-Solo.	59
Imagen 22. Trabajos de escaneo en el modelo usando laser modelo Focus3D X 330.....	60

Imagen 23. Cauce del río Madre de Dios (líneas roja y violeta) y afluentes principales (líneas amarillas y verdes) de la subcuenca hasta la zona La Pastora-Puerto Maldonado.	64
Imagen 24. Corte a longitudes determinadas de las clavijas en la maquina cortadora y su respectivo pintado en el taller de carpintería.	76
Imagen 25. Toma de lectura de cada punto de la sección 1+200 para su replanteo.	83
Imagen 26. Colocación de los espigones ELJ en el lado cóncavo del canal.	85
Imagen 27. Clavijas distribuidas sobre subáreas de 10 cm x 6 m de la faja transportadora, sumando un total de 16 subáreas.	86
Imagen 28. Clavijas distribuidas en 56 columnas sobre la faja.	87
Imagen 29. Vista en planta del proceso de transporte de clavijas durante el ensayo 1 (fotografía 1-7). Vista del ingreso de las clavijas flotantes al tramo curvo (fotografía 8).	96
Imagen 30. Vista en planta del proceso de transporte de clavijas en presencia de espigones ELJ en el ensayo2.	108
Imagen 31. Atascos y acumulaciones de clavijas en el sistema de espigones ELJ, ensayo 2.	114
Imagen 32. Disposición final de las clavijas atascadas dentro del entramado del espigón 7, ensayo 2.	116
Imagen 33. Vista en planta del proceso de transporte de clavijas (fotografía 1-3). Formación del pasillo libre de clavijas a lo largo de la orilla curva (ver flecha roja en la fotografía 4). Ensayo 3.	118
Imagen 34. Vista en planta del proceso de transporte de clavijas a lo largo del canal experimental con presencia de espigones ELJ, ensayo 4.	126
Imagen 35. Acumulaciones de clavijas en las zonas de empotramiento y laterales aguas arriba de los espigones ELJ, ensayo 4.	133
Imagen 36. Disposición final de las clavijas atascadas en el entramado de algunos espigones, ensayo 4.	135

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Superficies por Tipo de Bosque por Fisiografía del BPP de Madre de Dios.	40
Tabla 2. Necromasa y biomasa en 11 sitios del departamento de Madre de Dios.	46
Tabla 3. Porcentaje de la productividad primaria neta de carbono sobre y bajo terrenos.	46
Tabla 4. Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Madre de Dios.	48
Tabla 5. Río Madre de Dios, zona La Pastora – Puerto Maldonado. Caudales máximos de diseño a ser usados en el proyecto de defensas ribereñas.	48
Tabla 6. Granulometría del material del lecho del río Madre de Dios - Zona La Pastora	52
Tabla 7. Granulometría a escala que representa el material del lecho del meandro en estudio.	52
Tabla 8. Dimensiones y número de troncos con su respectivo volumen.	71
Tabla 9. Volumen total anual de troncos que arrastran las corrientes en el meandro.	72
Tabla 10. Factores elegidos para las dimensiones de las raíces de acuerdo cada tipo de tronco.	73
Tabla 11. Número de raíces con su respectivo volumen pertenecientes a una porción de troncos.	74
Tabla 12. Volumen total anual de raíces gruesas que arrastran las corrientes en el meandro.	74
Tabla 13. Volumen y número de clavijas correspondientes a una porción.	75
Tabla 14. Volumen y número de discos adheridos al 19% de una porción de clavijas.	75
Tabla 15. Masa de las clavijas de diferente color dentro de una bolsa.	77

Tabla 16. Masa promedio de 5 bolsas escogidas al azar.....	77
Tabla 17. Altura y área sumergida determinada teóricamente y en campo.	78
Tabla 18. Dimensiones de las clavijas con discos sometidas a flotación.....	79
Tabla 19. Cotas de los puntos tomados en el modelo y adaptados a prototipo.....	80
Tabla 20. Orden de las 28 columnas de clavijas colocadas sobre la mitad de la faja.	87
Tabla 21. Áreas hidráulicas y velocidades medias en el tramo curvo del ensayo 1.....	94
Tabla 22. Fuerzas de arrastre (Fd) de las clavijas sin discos en el punto 2/sección 3+120, ensayo 1. ..	100
Tabla 23. Fuerzas de arrastre (Fd) de las clavijas con discos en el punto 2/sección 3+120, ensayo 1. .	101
Tabla 24. Fd máximas de clavijas con disco que transitan a lo largo de los puntos 1 de cada sección, ensayo 1.	103
Tabla 25. Áreas hidráulicas y velocidades medias en el tramo curvo del ensayo 2.....	104
Tabla 26. Fd máximas de clavijas con disco que transitan a lo largo de la curva por los puntos 1 de cada sección, ensayo 2.	109
Tabla 27. Fd máximas de clavijas con disco que transitan a lo largo de la curva por los puntos 2 de cada sección, ensayo 2.	110
Tabla 28. Fuerzas de arrastre de clavijas sin disco que impactan sobre el E-1, ensayo 2.....	111
Tabla 29. Fuerzas de arrastre de clavijas con disco que impactan sobre el E-1, ensayo 2.	112
Tabla 30. Número de clavijas atrapadas en cada espigón ELJ, ensayo 2.	115
Tabla 31. Áreas hidráulicas y velocidades medias en el tramo curvo del ensayo 3.....	117
Tabla 32. Fuerzas de arrastre (Fd) de clavijas sin discos en el punto 2/sección 3+120, ensayo 3.....	120
Tabla 33. Fuerzas de arrastre (Fd) de clavijas con disco en el punto 2/sección 3+120, ensayo 3.	121
Tabla 34. Fd máximas de clavijas con disco que transitan a lo largo de la curva por los puntos 1 de cada sección, ensayo 3.	122
Tabla 35. Fd máximas de clavijas con disco que transitan a lo largo de la curva por los puntos 2 de cada sección, ensayo 3.	123
Tabla 36. Áreas hidráulicas y velocidades medias en el tramo curvo del ensayo 4.....	124
Tabla 37. Fd máximas de clavijas con disco que transitan a lo largo de la curva por los puntos 1 de cada sección, ensayo 4.	127
Tabla 38. Fd máximas de clavijas con disco que transitan a lo largo de la curva por los puntos 2 de cada sección, ensayo 4.	128
Tabla 39. Fuerzas de arrastre (Fd) de clavijas sin disco que impactan sobre el E-1, ensayo 4.....	130
Tabla 40. Fuerzas de arrastre (Fd) de clavijas con disco que impactan sobre el E-1, ensayo 4.....	131
Tabla 41. Número de clavijas atrapadas en cada espigón ELJ, ensayo 4.	134

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue describir el transporte de troncos flotantes y sus efectos al quedar atrapados en un sistema de espigones hechos de troncos (ELJs), que protege de la erosión al meandro del río Madre de Dios en el sector La Pastora-Puerto Maldonado. Para ello, en un modelo físico existente, que representa un tramo de 4.2 km del meandro a escala 1/60, se arrojaron clavijas de madera al flujo a fin de identificar sus trayectorias, fuerzas de arrastre y disposición final. Las clavijas representaron a troncos de 3 a 7 metros de longitud y fueron arrojadas mediante un caudal de madera de 331 cm³/s. En los cuatro ensayos realizados se arrojaron 12 864 clavijas, del cual solo el 19% llevó raíces (discos de madera). Según los resultados, en los ensayos sin espigones N°1 y N°3 ejecutados con 466 y 514 Lt/s de caudal respectivamente, las clavijas no lograron arribar a la orilla exterior. En el ensayo N°2 ejecutado con 466 Lt/s y 11 espigones quedó atrapado el 8 % de clavijas. Así mismo, en el ensayo N°4 ejecutado con 514 Lt/s y 12 espigones quedó atrapado el 14 %. Pues, la mayoría de las clavijas fueron desviadas hacia aguas abajo debido a la redirección del flujo ocasionada por la presencia de los espigones. De las pocas clavijas que quedaron atrapadas en los espigones ELJ: “la mayoría quedó atascado al nivel del agua en la cara aguas arriba de las estructuras; el resto llegó asentarse en las zonas de empotramiento, formando una mezcla dura y compacta con los sedimentos”. En conclusión, en los ensayos sin espigones, las clavijas no alcanzaron la orilla exterior debido al pequeño flujo helicoidal secundario. En los ensayos con espigones, la cantidad atrapada de clavijas dependió del número de espigones y de la fuerza centrífuga que ejerce el flujo helicoidal principal, sin embargo, no dependió del tiempo en que transitan las clavijas. Así que, el bajo porcentaje atrapado de clavijas no perjudicó el funcionamiento hidráulico de los espigones ELJ.

Palabras clave: Troncos leñosos, hidrodinámica de ríos, espigones ELJ, modelo hidráulico.

SUMMARY

The object of this investigation was to describe the transport and effects of trapping Large Wood Debris (LWD) on Engineered Log Jams (ELJ) groynes. This groynes protect the outer bank of the Madre de Dios River Meander in the La Pastora-Puerto Maldonado sector from erosion. An existing experimental facility, where a 4.2 km curved section of the Amazonian river was modeled at a 1/60 scale, was used to run trials. The tests were carried out in order to identify trajectories, dragging forces and final disposal of wooden dowels (LWD at prototype) that were incorporated into the flow. The dowels represent woody logs of lengths from 3 to 7 meters, of which only 19% were attached by roots (wooden discs). In all trials 12 864 dowels units were thrown, using a wood flow rate of 331 cm³/s. According to the results, in simulation N°1 and N°3 executed without groynes and with 466 and 514 Lt/s of flow respectively, dowels did not manage to reach the outer edge. In simulation N°2 conducted with 11 ELJs and 416 Lt/s flow simulation were trapped 8 % of wooden dowels. In simulation N°4 conducted with 12 ELJs and 514 Lt/s flow simulation were trapped 14%. In the experimental phase most of wooden dowels were diverted towards the center of the water course downstream due to flow being redirected by ELJs. Of the few dowels that were trapped in the ELJ groynes field: “Most of the wooden dowels jammed at the water surface in upstream face of these structures, and the rest of the wooden dowels settled on the embedding zones where they formed a hard and compact mixture with the sediments”. In conclusion, in simulations without groynes, dowels did not reach the outer edge due to the small secondary helical flow. In simulations with groynes, the amount of trapped woody debris depends on the centrifugal force exerted by ELJs number and main helical flow, however no matter how much woody debris is in transit. So, the low percentage of dowels entrapment did not impair the hydraulic performance of ELJs.

Keywords: Large Wood Debris (LWD), river hydrodynamics, Engineered Log Jams (ELJ), Hydraulic model.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

En los últimos años se han presentado grandes desastres en la Amazonía, debido a fenómenos de erosión y socavación ocasionados por avenidas extraordinarias. En consecuencia, las ciudades aledañas a los ríos son las que padecen hasta la actualidad el grave problema de erosión. El problema se le atribuye a la ubicación de poblados dentro del área de influencia de los ríos, es decir, han sido ubicados sin ningún tipo de planificación ni diseño. Situación que ha conducido a proteger las riberas con muros de gaviones, espigones de concreto, etc. Sin embargo, aunque estas estructuras tradicionales hayan mitigado en un gran porcentaje la erosión, su riesgo de falla o colapso sigue siendo muy alto. Dado que, la vida útil de tales estructuras ha dependido hasta hoy en día de criterios de diseño basados empíricamente en ríos de otros continentes, pero que aplicados en nuestro país muchas veces no han funcionado como se los esperaba.

La bioingeniería de entramados de troncos (ELJ) es una técnica que combina el diseño tradicional de espigones con el uso de árboles como material. Las variedades de especies de árboles amazónicos, que van de 20 a 50 m de longitud y diámetros mayores a 1.50 m, son aptos como elementos estructurales para la protección de riberas. No obstante, en ríos de la Amazonía no existen experiencias de protección usando troncos, pero se cuenta con muchas aplicaciones en pequeños ríos de montaña de otros países, el cual sirven de soporte para la investigación.

La erosión y socavación en el meandro del sector La Pastora-Puerto Maldonado del Río Madre de Dios ocasiona el colapso del banco externo y de todo lo que se halla sobre su superficie, tales como sectores urbanizados, vías, bosques, cultivos, entre otros. En adición a esto, el tramo de la Carretera Interoceánica Perú-Brasil, corre el riesgo de ser alcanzado por esta orilla en peligro. Pues, la migración lateral de la orilla del río avanzaba 2.3 m/año desde el año 1961 hasta 1991 (INDECI, 2008); después, la migración para el año 2012 alcanzó aproximadamente 6 m/año (Odebrecht SAC 2012).

Es importante mencionar que, las estructuras hidráulicas en la Amazonía aparte de estar sujetas a factores de riesgos por socavación y sedimentación, también están expuestas a otro factor determinante, el cual es la presencia de grandes cantidades de restos vegetativos que arrastran las corrientes de los ríos en crecidas. En adición, el tránsito de esta enorme cantidad de material leñoso flotante ocasiona daños a embarcaciones, viviendas, etc.

1.2. Formulación del problema

¿Puede la cantidad atrapada de troncos perjudicar el funcionamiento hidráulico del sistema de espigones ELJ que protege de la erosión al meandro del río Madre de Dios en el sector La Pastora – Puerto Maldonado?

1.3. Hipótesis del problema

Los troncos flotantes impulsados por la fuerza centrífuga logran arribar a la orilla exterior y quedar atrapados en los espigones ELJ, perjudicando su funcionamiento hidráulico de protección contra la erosión del meandro del río Madre de Dios en el sector La Pastora – Puerto Maldonado.

1.4. Justificación

Con el proyecto se beneficiarán los habitantes que residen en el sector aledaño al río y el tramo de la Carretera Interoceánica Perú-Brasil que pasa muy cerca de la orilla en peligro. De otro lado, la protección con espigones tradicionales (estructuras de concreto, roca, acero, etc.) demandará de mucho tiempo y dinero debido a la ausencia de canteras en esta región, además se ocasionará graves daños ecológicos. De modo que, proteger las riberas con espigones ELJ será una buena opción, por la cantidad y grandes dimensiones de árboles que abunda en esta región. En adición, la madera bajo el agua puede perdurar hasta 500 años y la acumulación de leños provee de nutrientes a los ríos, mejorando el hábitat acuático, según estudios.



Imagen 1. Fotografía izq.) Derrumbes en el acantilado del sector La Pastora (Odebrecht SAC, 2011). Fotografía der.) Vista satelital de la Carretera Interoceánica Perú-Brasil cerca a la orilla en peligro.

1.5. Alcances de la investigación

La presente tesis formó parte de un amplio proyecto denominado “Espigones fabricados con Troncos de Árboles (ELJ): Una Alternativa contra la Erosión en Ríos Meándricos”. Este proyecto se llevó a cabo en un modelo físico, que la empresa Odebrecht construyó anteriormente para ensayar con otros tipos de espigones. Los estudios del proyecto consistieron en la elaboración de varias tesis, las mismas que abordaron temas de socavación, sedimentación, diseño de espigones ELJ, transporte de material leñoso y modelos computacionales. De los mencionados, la presente tesis se encargó **solamente** de abordar el problema del transporte del material leñoso. Cabe indicar que, el material leñoso fue representado sólo por troncos y raíces gruesas, siendo excluidos ramas, palos, raíces finas y hojas, debido a la complejidad de representarlos a escala 1/60.

1.6. Objetivos

Objetivo general

- Describir el transporte de troncos flotantes y sus efectos al quedar atrapados en el sistema de espigones ELJ que protege de la erosión al meandro del río Madre de Dios en el sector La Pastora-Puerto Maldonado.

Objetivos específicos

- Estimar la cantidad y dimensiones de los troncos leñosos que arrastran las corrientes durante avenidas máximas.
- Transferir la información leñosa en arrastre a escala reducida 1:60.
- Replantear el lecho móvil del meandro e instalar los espigones ELJs en el modelo físico.

1.7. Descripción de contenidos

El presente trabajo de investigación es documentado en cinco capítulos, los cuales se describen a continuación:

Capítulo I: En este capítulo se presenta la introducción, el cual incluye al planeamiento del problema, formulación, hipótesis, justificación de la investigación, alcances y los objetivos.

Capítulo II: Este capítulo presenta al marco teórico, el cual incluye a los antecedentes teóricos de la investigación, fundamentos teóricos que sirven de soporte para la investigación y, finalmente, se muestra un glosario que contiene los términos básicos.

Capítulo III: En este capítulo se detalla minuciosamente la metodología aplicada, se describe el procedimiento en orden cronológico y por último se presentan los resultados obtenidos del procesamiento de datos, en base a los objetivos específicos.

Capítulo IV: En este capítulo se analizan y discuten los resultados presentados mediante imágenes, gráficas comparativas y tablas; a la vez, se resalta las coincidencias y divergencias con la hipótesis y la literatura.

Capítulo V: En este capítulo se presentan las conclusiones en base al objetivo principal planteado y las recomendaciones principales de la investigación.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes teóricos

Según (Odebrecht Latinvest Operaciones y Mantenimiento SAC, 2014), la investigación titulada “Modelo Físico con Lecho Móvil Río Madre de Dios, Zona la Pastora, Madre de Dios” consiste en proteger un tramo de la carretera interoceánica Perú - Brasil ubicado cerca al acantilado del río Madre de Dios en el sector La Pastora-Puerto Maldonado. En el estudio se ensayaron con tres tipos de espigones tradicionales, el cual consistieron en pilotes metálicos, geotubos y tablestacas. Las pruebas se realizaron con caudales de 287, 466, 514 y 566 lts/s; el cual, correspondieron a periodos de retorno de 2.2, 25, 50 y 100 años respectivamente. Los resultados mostraron que, la mejor protección del talud en peligro y del fondo móvil del cauce ocurrió cuando el espigón no se encontraba sumergido y cuando estaba formado por una parte impermeable y otra de mayor longitud de características permeables. Por tanto, los espigones con tablestacas fueron las que presentaron mejor comportamiento de protección del talud; puesto que, la erosión producida al pie del extremo del espigón se redujo por ser permeable esa parte, disminuyendo así la energía cinética del flujo que provoca esa fuerte erosión.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Flujo en meandros

Las líneas de corriente cerca de la superficie del flujo en un meandro son desviadas hacia el banco exterior mientras las líneas cerca al lecho son desviadas hacia banco interior. La velocidad cerca al lecho, el esfuerzo al corte tangencial al lecho, y el arrastre de partículas del fondo son comúnmente dirigidas hacia el banco interior (Julien 2002, p. 166).

En la sección vertical, al girar sobre un mismo radio, se desarrolla mayor fuerza centrífuga en la superficie que en el fondo. Por causas de estas fuerzas desiguales, existen componentes de velocidad en la transversal que generan la corriente secundaria. Esta corriente en la transversal, sumada al movimiento longitudinal produce un flujo helicoidal que forma o modela la sección en las curvas (Jansen, 1994).

“El flujo en canal abierto curvado se caracteriza por la existencia de celdas de circulación cruzada (corriente secundaria)” (Blanckaert y Graf 2004; citado por Blanckaert y Vriend 2004, p. 353). “La celda de la región central se explica usualmente en términos del desequilibrio local entre la fuerza centrífuga de accionamiento y el gradiente de presión transversal (Rozovskii, 1957)”.

Además del movimiento helicoidal que cubre una gran parte de la sección transversal, a menudo se observa una celda de contra-rotación más pequeña y débil cerca del banco exterior. No obstante, esta célula es importante porque tiende a proteger los bancos exteriores empinados frente a la erosión (Christensen, Gislason y Fredsoe 1999, Blanckaert y Graf 2004; citado por Blanckaert y Vriend 2004, p. 353).

Se sabe esta turbulencia es importante para la generación de la celda pequeña del banco exterior. Sin embargo, hay poca visión disponible en la dinámica de la turbulencia en la vecindad de esa celda, e incluso sus condiciones de ocurrencia son casi desconocidas.

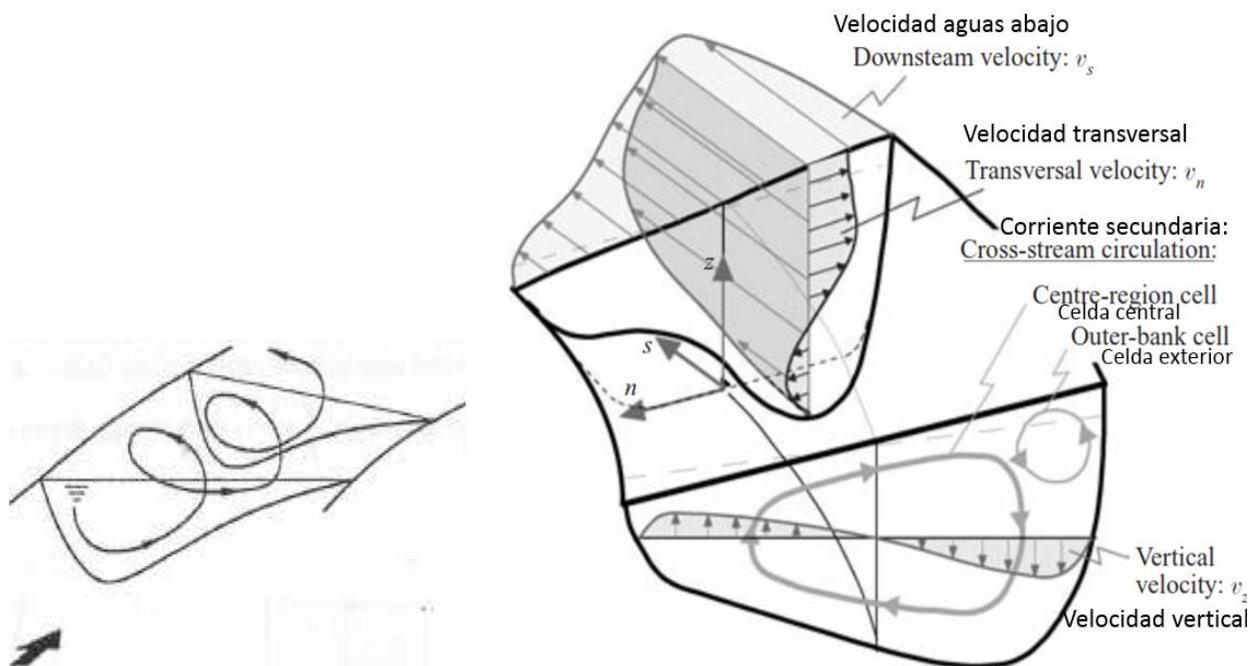


Figura 1. Gráfica izq.) Bosquejo del flujo helicoidal en la curva de un río (gráfico de Obras Hidráulicas, s.f.). Gráfica der.) Esbozo de definición del flujo de canales abiertos curvados y de la circulación transversal (gráfico traducido de Blanckaert y Vriend, 2004).

Las curvas de los ríos pueden alcanzar la condición de equilibrio entre la tasa de erosión en la orilla externa y la tasa de sedimentación en la barra de puntos (orilla interna). En un sentido amplio, la geometría de la sección transversal de una curva está en equilibrio; sin embargo, la migración lateral de la curvatura implica que la geometría en planta de la corriente no sea estable (Julien, 2002).

El flujo en curvas se analiza en coordenadas cilíndricas. La magnitud relativa en términos de aceleración radial señala que la aceleración centrífuga es contrabalanceada por la gradiente de presión y esfuerzo al corte radial (Bendegom 1947, citado por Rozovskii 1957).

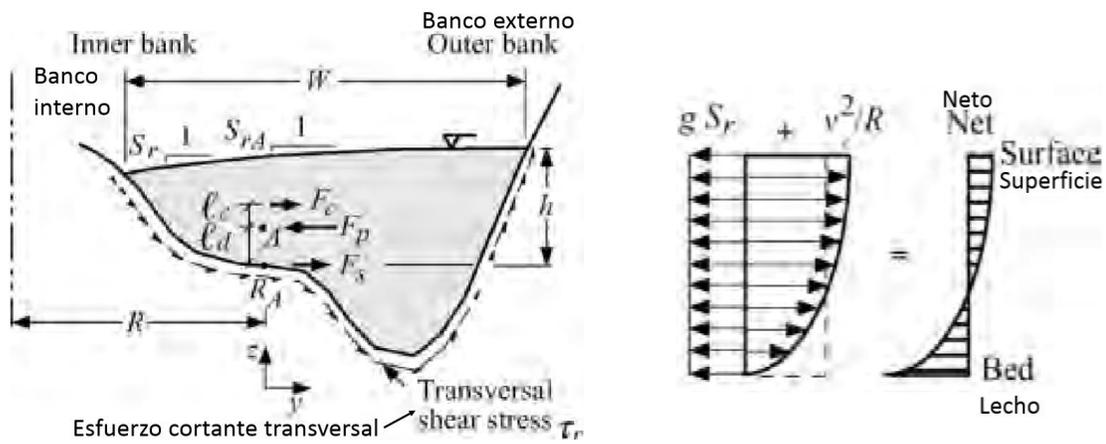


Figura 2. Bosquejo en perfil y planta del comportamiento hidrodinámico en la curva de un río (gráfico traducido de Julien, 2002).

$$\frac{v^2}{r} = gS_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_r}{\partial z} \quad \dots (1)$$

Donde

v : Velocidad local hacia aguas abajo.

τ : Esfuerzo cortante radial.

S_r : Inclinación radial de la superficie de agua

τ_{rR} : El esfuerzo de corte transversal de límite en el punto “ R_A ”.

S_{rA} : Pendiente radial de la superficie de agua en el punto “A”.

R : Radio de curvatura en el punto “A”.

h : Profundidad promedio de flujo.

W : El ancho superior del canal.

“Entre el interior y exterior de la curva se desarrolla una sobreelevación del nivel de agua por causa de la fuerza centrífuga” (Obras fluviales s.f., p. 23). El valor de esta sobreelevación puede obtenerse mediante la siguiente ecuación:

$$S_r = \frac{\Delta z}{W} = \frac{u^2}{g r} \quad \rightarrow \quad \Delta z = \frac{u^2 W}{g r} \quad \dots (2)$$

Donde: Δz sobreelevación (m), U velocidad media de la corriente (m/s), W ancho del cauce (m), “ g ” aceleración de la gravedad (m/seg²) y “ r ” radio de la curva.

Con este fin, esta ecuación de movimiento ha sido transformada en coordenadas cilíndricas s, r, z , con respecto al centro local de curvatura. Denotando los componentes correspondientes de velocidad por u, v, w (temporalmente) del sistema de coordenadas x, y, z .

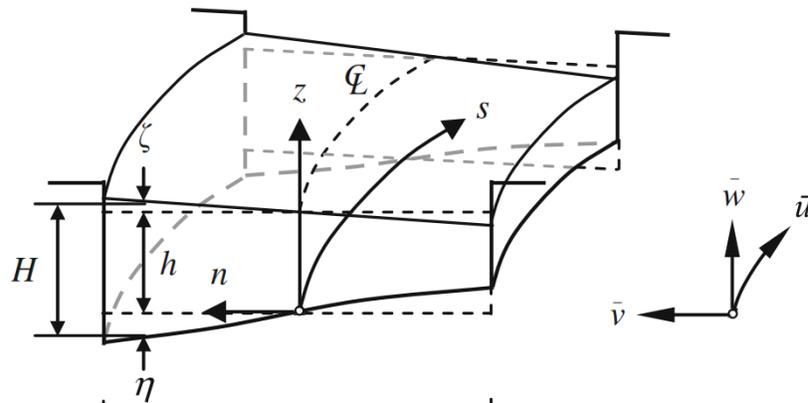


Figura 3. Esquema que muestra la sección transversal de un río sinusal (gráfica de Dey, 2014).

El equilibrio entre la fuerza centrífuga (F_c) y el gradiente de presión se determina mediante:

$$F_c = \frac{mu^2}{r}, \quad \frac{u^2}{r} = g \frac{\partial h}{\partial n} \quad \dots (3)$$

Donde: “ m ” masa de fluido, “ r ” radio de curvatura, “ h ” altura del agua, “ n ” distancia a través del canal, “ u ” velocidad media de la corriente y “ g ” aceleración de la gravedad (ver detalles en Richardson et al. 2001, p. 2.45).

2.2.2. Restos leñosos en sistemas fluviales

a. Origen y reclutamiento de los restos leñosos

Abbe y Montgomery (2002) señalan que:

“En cuencas montañosas boscosas, la mayoría de los árboles caen dentro de los cauces como resultado de mecanismos tales como, mortalidad natural y/o artificial” (Benda et al., 2003), “erosión en las orillas y deslizamientos, migración de riberas y socavación profunda en bancos” (May y Gresswell, 2003; Swanson, 2003), “acción del viento y del fuego” (Benda y Sias, 2003; Rosso et al., 2007).

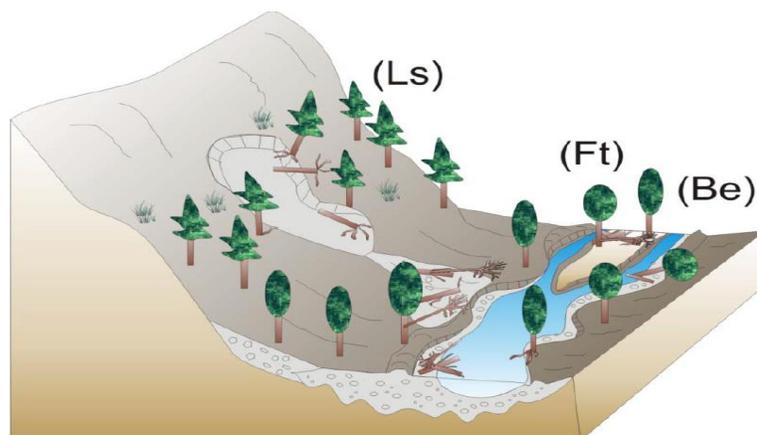


Figura 4. Tres principales procesos de reclutamiento de restos de árboles: (Ls) derrumbes, (Ft) transporte fluvial durante inundaciones y (Be) erosión de bancos (gráfico de Ruiz-Villanueva, 2012).

“Las fuertes corrientes de los elevados flujos actúan con fuerza destructiva sobre las bases de los bancos aluviales, lugar donde se incrementa el grado de erosión, y como consecuencia varias hectáreas, densamente cubiertas de vegetación, se desploman hacia los cauces” (Wohl, 2013).

Las corrientes curvas activamente en migración pueden producir substancialmente más restos leñosos que las corrientes menos sinuosos o relativamente rectas, debido a la erosión del banco asociada a procesos laterales de migración y a la geometría de la forma superficial de los cauces meándricos forestados; por lo tanto, estos sucesos se pueden considerar para tener un potencial medio a alto de la entrega de material leñoso, dependiendo de condiciones existentes y del juicio sano de la ingeniería (National Cooperative Highway Reserch Program o NCHRP, 2010).

El proceso de árboles caídos por la acción del viento es independiente externo de los procesos del flujo de un canal. La acción del viento da lugar generalmente a grupos de árboles derribados en paralelo entre sí y en la dirección de la ráfaga de viento (Abbe y Montgomery, 2002).

Por otro lado, el origen de este material leñoso en la Amazonía también ocurre a causa de la tala ilegal de árboles, donde grandes desbordes inundan vastas áreas de llanuras cubiertas con estos restos de madera que van dejando los agricultores, mineros y madereros formales e informales.



Imagen 2. Deforestación ilegal ocasionado por empresas madereras en la Amazonía brasileña (fotografía de Alexis, 2011).

El reclutamiento de restos de árboles pertenece a los procesos por los cuales los árboles vivos y raíces con restos de tallo en pie caen a lo largo de los pasillos de los ríos, o donde existe una distribución de árboles caídos y residuos existentes de bosques en actividad. Los escombros de árboles que están disponibles para el transporte pueden ser encontrados en todas las posiciones y orientaciones en las llanuras de inundación, encima y a lo largo de los bancos (NCHRP, 2010).

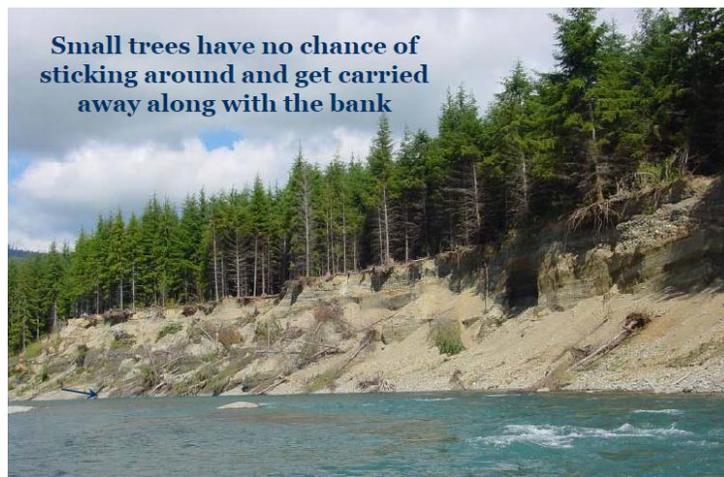


Imagen 3. Fotografía izq.) Grandes ríos aluviales con carga de madera de tierras bajas en la región de Puget Sound. Fotografía der.) Árboles cayendo desde una plantación forestal a lo largo del río Hoh. Ambas fotos en Estados Unidos (Fuente: McHenry y Abbe, 2012).

Además, Gurnell et al. (2002) indican:

“La madera también puede ser reclutada a partir de fuentes más distantes a través de la flotación de madera a lo largo de torrentes afluentes, y procesos dependientes tales como deslizamientos y avalanchas” (Wondzell y Swanson 1999; Johnson et al. 2000; Nakamura, Swanson y Wondzell 2000). “Estos procesos se enlazan para formar cascadas de perturbación compleja espacial y temporalmente” (Nakamura et al. 2000).

Gurnell et al. (2002) explicaron acerca de las tasas de suministro a sistemas fluviales:

“Existe escasa información sobre las cantidades de suministro de restos de vegetación a los sistemas fluviales, pero hay estudios de campo combinados con el análisis de fotografías aéreas para estimar la magnitud de la perturbación de bosques ribereños durante inundaciones y para estimar la entrega de restos de madera a los ríos” (Piégay et al. 1999; Johnson et al., 2000). En Francia una persona común (Citterio) realizó una comparación del río piedemonte meándrico Ain con el río trenzado Drome; pues mostró que el primero suministra casi 40 ton/año de troncos por kilómetro, mientras que el segundo sólo suministró 12 ton/año. Por otro lado, en la cuenca alta del río Rhone otra persona común (Moulin) observó que la producción promedio de madera durante un período sin inundaciones fue de 0,8 ton/km², mientras que durante una singular inundación de 1100 m³/s, la producción fue de 6 ton/km². Las tasas de entrada de madera son altamente variables, que van hasta más de 59 piezas troncos cada 100 m por año (Figura 5a).

En áreas inundables la mayoría de leños tienden a flotar, y luego son arrastrados cuando el nivel de agua empieza a disminuir. La cantidad de troncos en el canal y planicie de inundación del río Mack Creek, en U.S.A. en 1998, fue de 239 piezas por cada 100 m; además sólo el 6% de los troncos contabilizados tuvo un fajo de raíz conectado (Swanson y Gregory, datos no publicados, p. 604).

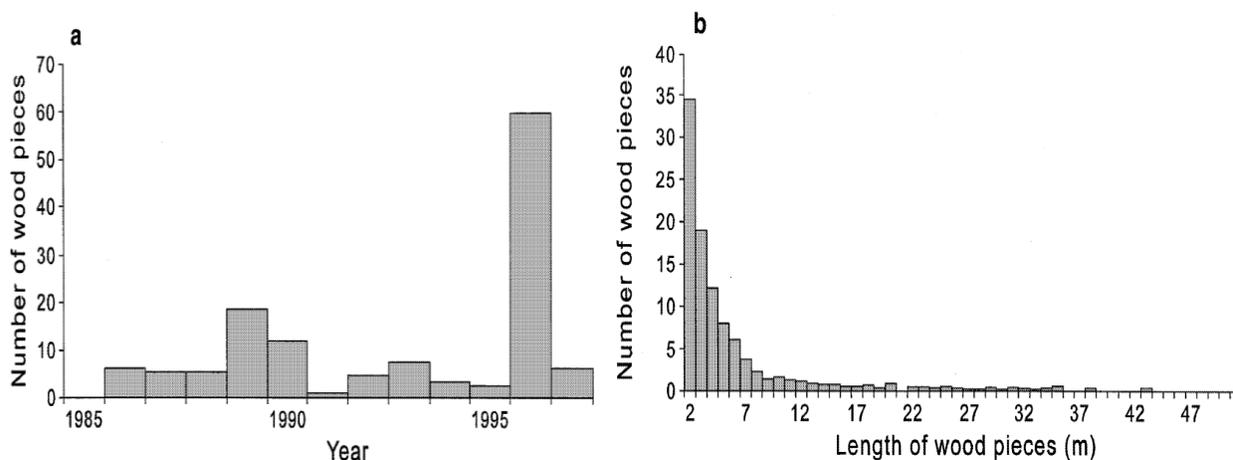


Figura 5. Data de un tramo del río Mack Creek, Oregon: (a) Número de troncos entregados anualmente por cada 100 m de canal; (b) Distribución por tamaño de los troncos (Fuente: Gurnell et al., 2002).

Algunos estudios en la Amazonía han producido información sobre las variaciones de diámetros de restos de madera de acuerdo a la densidad; el cual ha sido mostrado de manera resumida en gráfico siguiente:

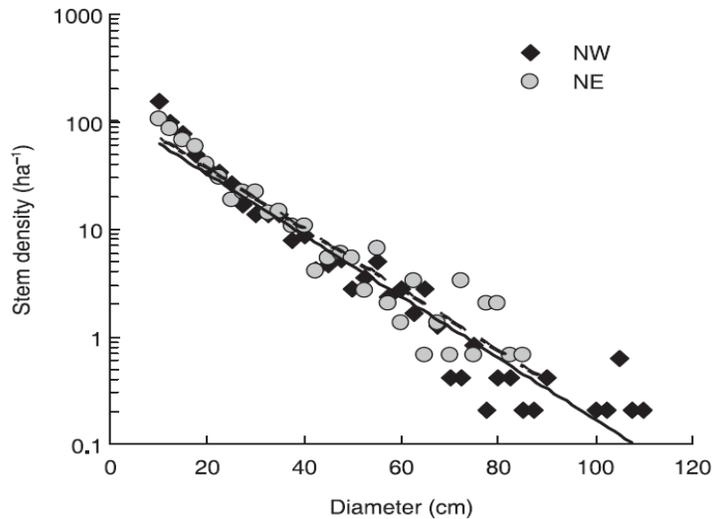


Figura 6. Variaciones de diámetros y densidad de la madera que predicen la mortalidad de los árboles en los bosques amazónicos (gráfico de Chao et al., 2008)

b. Dinámica de troncos leñosos en ríos:

Braudrick and Grant (2000) consideran el arrastre de troncos en relación a un modelo de balance de fuerzas actuando sobre cada tronco en movimiento (figura 7); es así que, modelaron un caso simple de un tronco cilíndrico circular recto en un campo de flujo uniforme, con un lecho suave de arena y plano. En sus estudios asumieron que el cilindro de madera se mueve inicialmente deslizándose, ya que en la naturaleza es típicamente más complejo, y que todas las fuerzas actúan sobre el centro de masa.

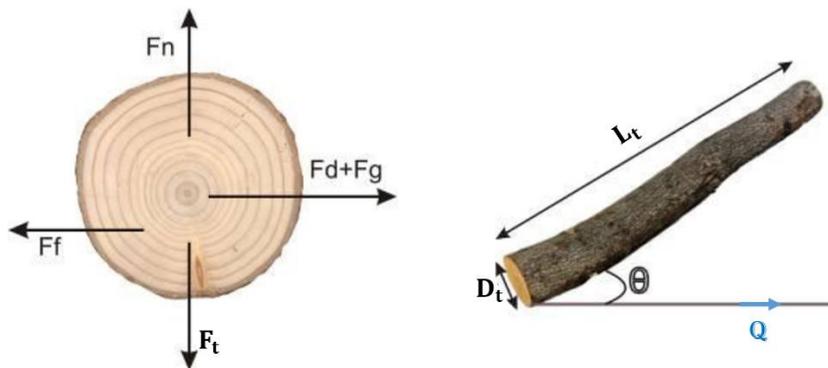


Figura 7. Balance de fuerzas sobre un tronco (gráfico modificado de Castellet et al., 2012).

El movimiento de los troncos depende de parámetros tales como la densidad de la madera, su longitud y diámetro, el ángulo que forma el leño con el flujo, las condiciones hidrodinámicas del flujo (calado y campo de velocidades) y coeficientes de fricción con el lecho y de arrastre (Ruiz-Villanueva et al., 2012).

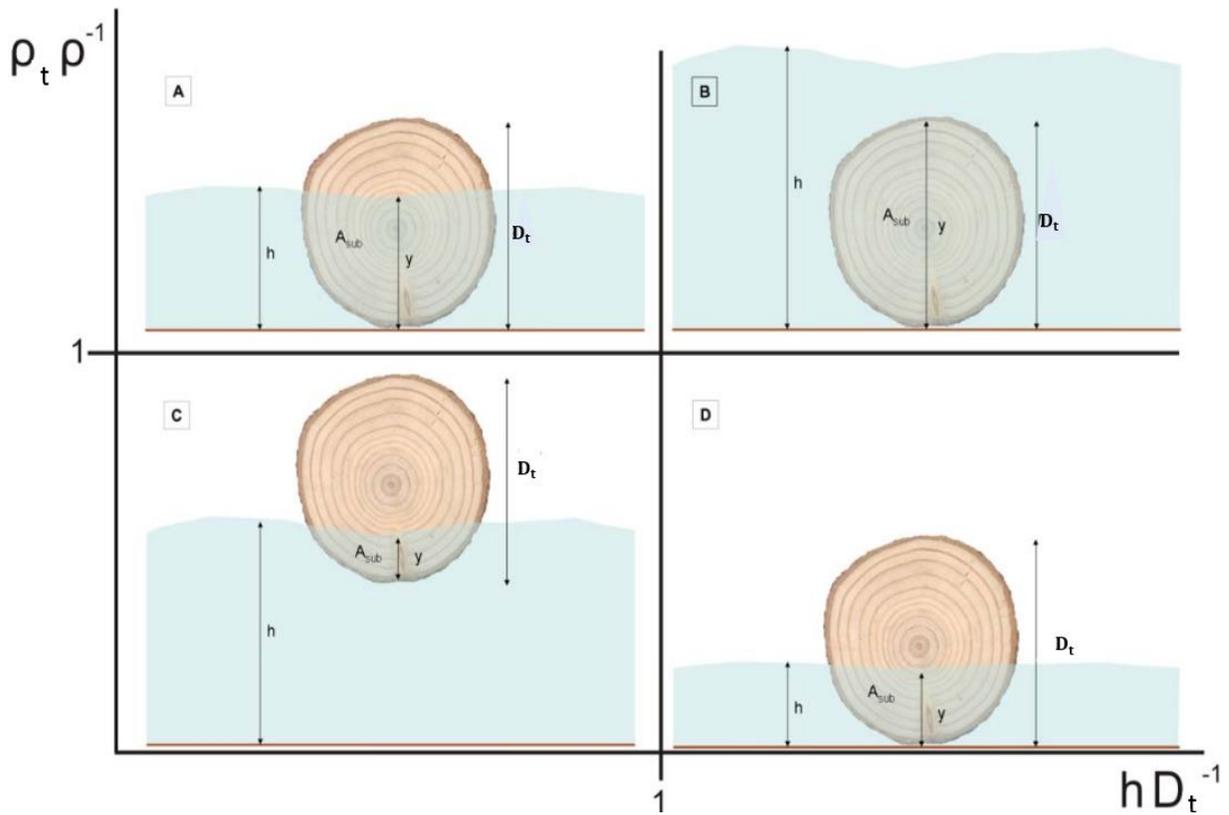


Figura 8. a) Densidad del tronco mayor a la del agua, y profundidad del agua menor al diámetro; b) Densidad del tronco mayor a la del agua, y profundidad del agua mayor al diámetro; c) Densidad del tronco menor o igual a la del agua, y profundidad del agua mayor o igual al diámetro; d) Densidad del tronco menor o igual a la del agua, y profundidad del agua menor al diámetro (gráfico modificado de Ruiz-Villanueva et al., 2012).

- Dinámica de troncos en contacto con el lecho

El análisis de la siguiente ecuación proporciona el balance de fuerzas en el movimiento inicial; siendo las fuerzas de arrastre, fricción y gravitacional las que facilitan el movimiento mediante la siguiente ecuación.

$$F_f = F_g + F_d \quad \dots (4)$$

- Para troncos sin raíz

El análisis es desarrollado por Braudrick and Grant (2000) y con algunas modificaciones hechas por Ruiz-Villanueva et al. (2012) a partir de lo siguiente:

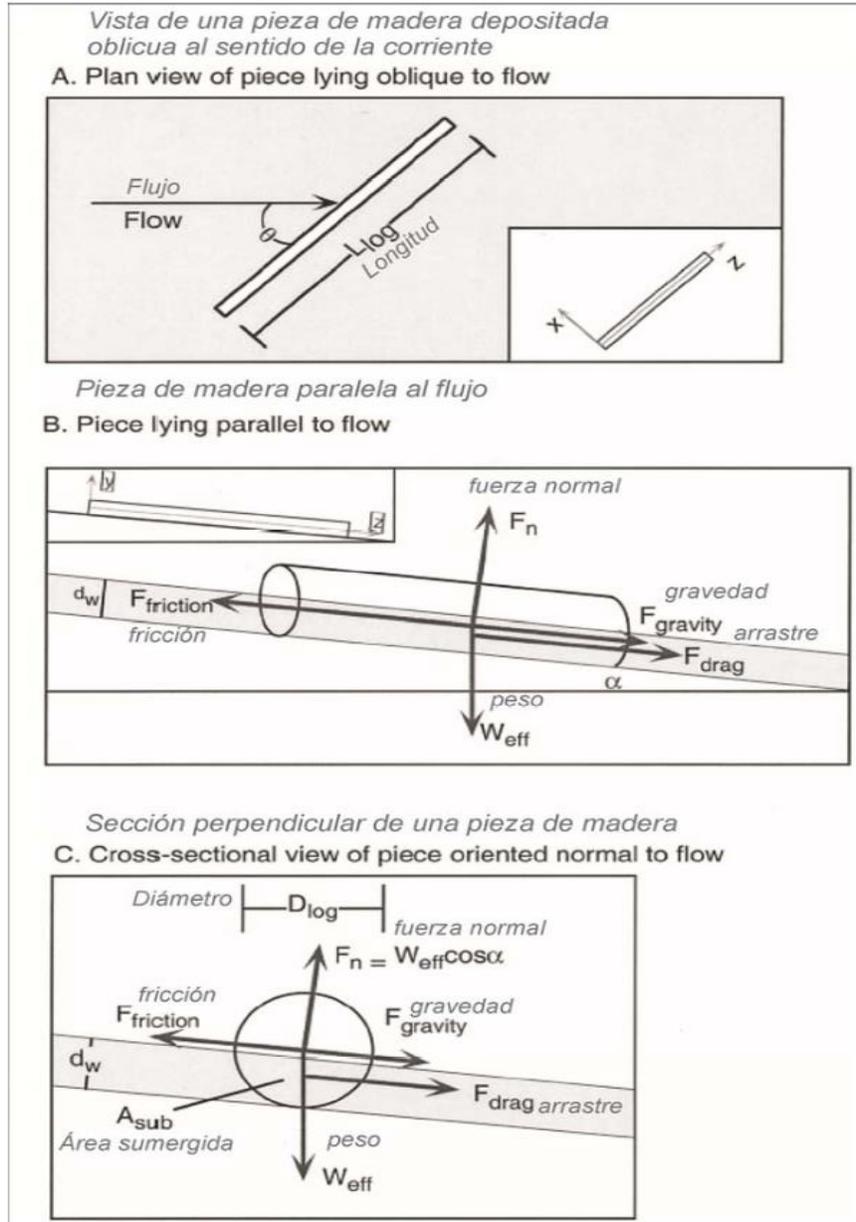


Figura 9. Diagramas de fuerza-cuerpo de las componentes del balance de fuerzas sobre un tronco sin raíz (De Braudrick and Grant, 2000 y traducido por Ruiz-Villanueva et al., 2012).

La fuerza gravitacional (F_g) actuando sobre el leño es igual al peso efectivo (F_t ó W_{eff}) del leño en dirección aguas abajo.

$$F_g = F_t \text{sen} \alpha = -(g\rho_t L_t A_t - g\rho L_t A_{sub}) \text{sen} \alpha \quad \dots (5)$$

Donde:

F_t : Peso efectivo del tronco (Fuerza del peso menos la fuerza boyante).

L_t : Longitud del tronco.

- ρ_t : Densidad del tronco.
 ρ : Densidad del agua.
 A_t : Área del tronco perpendicular a su longitud.
 α : Angulo de inclinación del lecho con respecto a la horizontal.
 g : Aceleración de la gravedad.
 A_{sub} : Área sumergida del tronco perpendicular a su longitud.

La fuerza de fricción (F_f) del detrito actúa en dirección río arriba y es igual a la fuerza normal ($F_n = F_t \cos \alpha$) actuando sobre el detrito por el coeficiente de fricción entre la madera y el lecho:

$$F_f = F_n \mu_f = (g \rho_t L_t A_t - g \rho L_t A_{sub}) \mu_f \cos \alpha \quad \dots (6)$$

Donde:

- F_f : Fuerza de fricción del detrito que actúa en dirección río arriba
 F_n : Fuerza normal
 μ_f : Coeficiente de fricción entre la madera y el lecho
 ρ : Densidad del agua
 ρ_t : Densidad del tronco
 L_t : Longitud del tronco
 A_t : Área del tronco perpendicular a su longitud
 A_{sub} : Área sumergida del tronco perpendicular a su longitud
 α : Angulo de inclinación del lecho con respecto a la horizontal

La fuerza de arrastre (F_d) es ejercida corriente abajo sobre el tronco por el moviendo del agua y es representado de la siguiente manera:

$$F_d = \frac{U^2}{2} \rho C_d (L_t y \sin \theta + A_{sub} \cos \theta) \quad \dots (7)$$

Donde:

- U : Velocidad del agua sobre lecho llano
 y : Diámetro sumergido del tronco
 C_d : Coeficiente de arrastre de la madera en agua
 θ : Angulo entre la longitud del tronco y la dirección del flujo
 ρ : Densidad del agua
 L_t : Longitud del tronco
 A_{sub} : Área sumergida del tronco perpendicular a su longitud

La combinación de las tres últimas ecuaciones en la ecuación (4) da el balance de fuerzas para el movimiento inicial de un cilindro recto circular de madera en lecho suave y llano (ecuación 8).

$$(g\rho_t L_t A_t - g\rho L_t A_{sub})(\mu_f \cos\alpha - \text{sen}\alpha) = \frac{U^2}{2} \rho C_d (L_t \text{ y } \text{sen}\theta + A_{sub} \cos\theta) \quad \dots (8)$$

Siguiendo los estudios realizados por Mazzorana et al. (2011) y Ruiz-Villanueva et al. (2012): la velocidad correspondiente a $F_g + F_d/F_f = 1$ llamada velocidad límite o umbral (U_{lim}) para el movimiento del tronco es determinado por:

$$U_{lim}^2 = \frac{(g\rho_t L_t A_t - g\rho L_t A_{sub})(\mu_f \cos\alpha - \text{sen}\alpha)}{0.5 \rho C_d (L_t \text{ y } \text{sen}\theta + A_{sub} \cos\theta)} \quad \dots (9)$$

Tomando la velocidad de flujo promedio (U_{flujo}) como referencia para el movimiento de la madera para un amplio rango de condiciones de flujo y entonces la velocidad a lo largo de la trayectoria para cada tronco (U_t) es estimado como:

$$U_t = (1 - C^*)U_{flujo} \quad \dots (10)$$

Siendo C^* es un parámetro de inhibición de transporte, el cual es 1 si el leño está en condiciones de reposo y $C^* = 1 - y/D_t$ si el transporte es por desliz o rotación. Luego C^* fue recalculado usando la velocidad relativa entre agua y tronco ($U_r = U_{flujo} - U_t$).

$$C^* = U_{lim}/U_{flujo} \quad \dots (11)$$

Sustituyendo C^* en la ecuación 12 se tiene:

$$U_t = U_{flujo} - U_{lim} \quad \dots (12)$$

En la figura 8 A si $U_{lim} \geq U_{flujo}$, el tronco estará en reposo; y si $U_{lim} < U_{flujo}$, el tronco se deslizará. En la figura 8 B si $U_{lim} < U_{flujo}$, el tronco también se deslizará caso contrario estará en reposo; luego como el tronco es totalmente sumergido la ecuación (9) será:

$$U_{lim}^2 = \frac{(\rho_t - \rho)g L_t A_t (\mu_f \cos\alpha - \text{sen}\alpha)}{0.5 \rho C_d (L_t D_t \text{sen}\theta + A_t \cos\theta)} \quad \dots (13)$$

- Para troncos con raíz

La raíz eleva al tronco del lecho a una determinada altura dependiendo de la relación entre la longitud del tronco y el diámetro de la raíz; esto reduce eficazmente la fuerza boyante y la porción del leño expuesto al fluir (Braudrick and Grant, 2000). Para el análisis se modela la raíz

como un disco unido al extremo de un tronco cilíndrico circular recto con suposiciones similares a la de uno sin raíz, tal como se muestra a continuación:

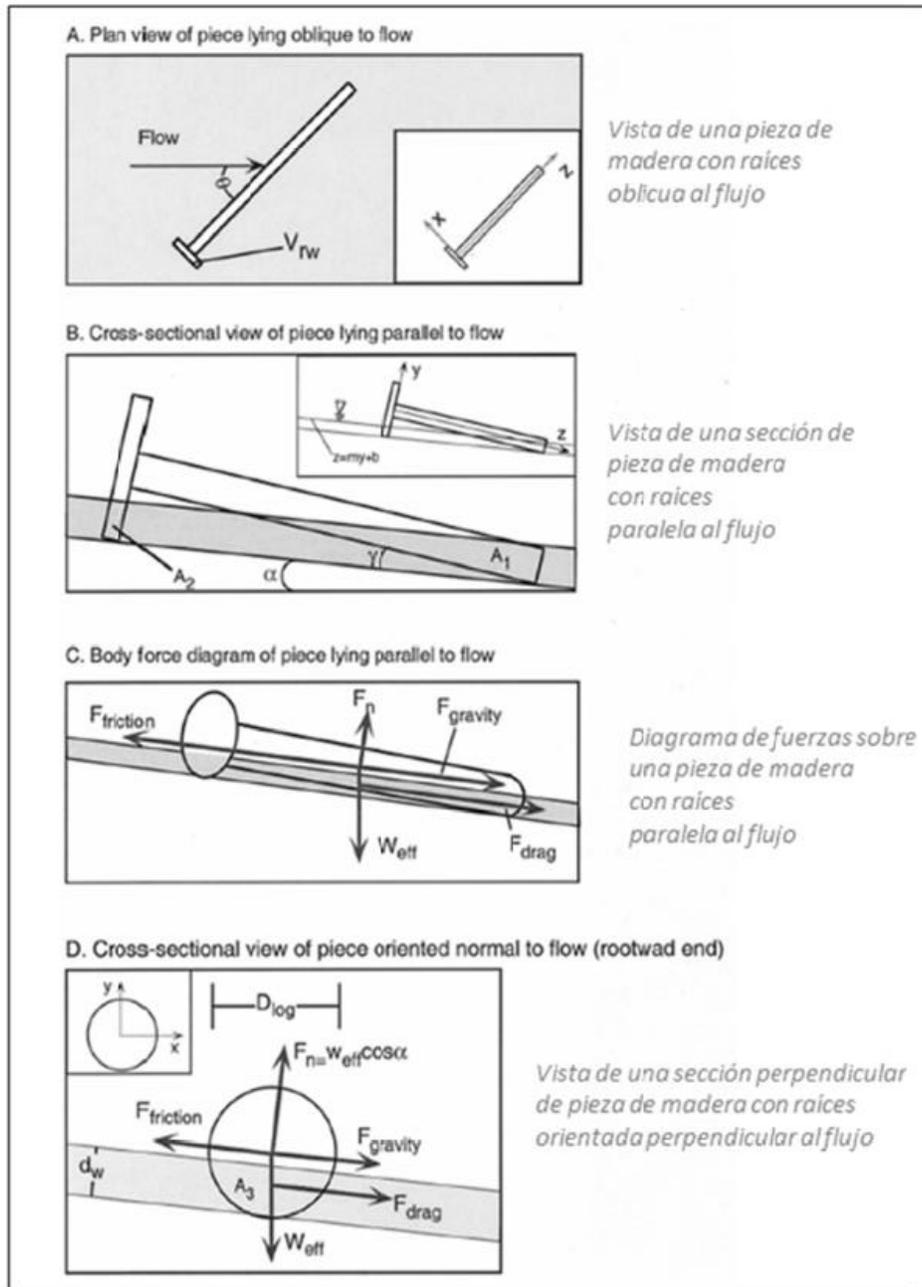


Figura 10. Diagramas de cuerpo-fuerza de las componentes del balance de fuerzas sobre un tronco con raíz (De Braudrick and Grant, 2000 y traducido por Ruiz-Villanueva et al., 2012).

La fuerza gravitacional (F_g) de un tronco con raíz es igual al peso del leño menos su fuerza de flotación:

$$F_g = - \left[g\rho_t \left(L_t \frac{\pi D_t^2}{4} + v_{rw} \right) - g\rho(v_1 + v_2) \right] \text{sen}\alpha \quad \dots (14)$$

Donde:

V_{rw} : Volumen de la raíz.

V_1 y V_2 : Volumen sumergido del tronco y la raíz respectivamente.

La fuerza de fricción (F_f) de un tronco unido a una raíz en forma de disco es:

$$F_f = \left[g\rho_t \left(L_t \frac{\pi D_t^2}{4} + V_{rw} \right) - g\rho(V_1 + V_2) \right] \mu_f \cos\alpha \quad \dots (15)$$

La fuerza de arrastre (F_d) actuando sobre un tronco con raíz en un flujo uniforme es:

$$F_d = \frac{U^2}{2} \rho C_d [(A_1 + A_2) \sin\theta + A_3 \cos\theta] \quad \dots (16)$$

Donde:

A_1 y A_2 : Áreas sumergidas del tronco y la raíz respectivamente.

A_3 : Área sumergida de la raíz perpendicular a longitud del tronco.

La combinación de estas tres ecuaciones da el balance de fuerzas en el movimiento inicial para un cilindro recto circular con raíz sobre un lecho suave y llano:

$$\left[g\rho_t \left(L_t \frac{\pi D_t^2}{4} + V_{rw} \right) - g\rho(V_1 + V_2) \right] (\mu_f \cos\alpha - \sin\alpha) = \frac{U^2}{2} \rho C_d [(A_1 + A_2) \sin\theta + A_3 \cos\theta] \quad \dots (17)$$

Posibles valores de V_1

Si la profundidad de agua es menor al diámetro del leño, el volumen sumergido (V_1) de un tronco cilíndrico con raíz en forma de disco es solucionado por:

$$V_1 = \frac{2}{3 \tan\gamma} [r^2 - (h - r)^2]^{3/2} + r^2 \left(\frac{h-r}{\tan\gamma} \right) \left[\sin^{-1} \left(\frac{h-r}{r} \right) + \frac{\pi}{2} \right] + \frac{1}{2} r^2 \left(\frac{h-r}{\tan\gamma} \right) \sin \left[2 \sin^{-1} \left(\frac{h-r}{r} \right) \right] \quad \dots (18)$$

Si la profundidad de agua es mayor al diámetro del leño, el volumen sumergido (V_1) sería:

$$V_1 = \pi r^2 \left(\frac{h-r}{\tan\gamma} \right) \quad \dots (19)$$

Donde “h” es la profundidad de flujo (d_w en la figura 10 D), “r” es el radio del tronco y “ γ ” es el ángulo entre el tronco y la superficie del agua (figura 10 B).

$$\gamma = \frac{D_{rw} - D_t}{2L_t} \quad \dots (20)$$

Posibles valores de A_1

Si la profundidad de agua es menor que el diámetro del leño, se tiene:

$$A_1 = \frac{1}{2 \tan \gamma} [(d_1 - r)^2 - r^2] + \frac{h-r}{\tan \gamma} (d_1 - 2r) \quad \dots (21)$$

Si la profundidad de agua es mayor al diámetro del leño, entonces:

$$A_1 = r \frac{(h-r)}{\tan \gamma} \quad \dots (22)$$

El área sumergida A_3 del fajo de la raíz, es:

$$A_3 = \left\{ 2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{2h}{D_{rw}} \right) - \sin \left[2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{2h}{D_{rw}} \right) \right] \right\} \frac{D_{rw}^2}{8} \quad \dots (23)$$

El volumen sumergido de la raíz V_2 es el área sumergida de la raíz por su espesor w_{rw} .

$$V_2 = w_{rw} \left\{ 2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{2h}{D_{rw}} \right) - \sin \left[2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{2h}{D_{rw}} \right) \right] \right\} \frac{D_{rw}^2}{8} \quad \dots (24)$$

- Dinámica de troncos en flotación

La NCHRP (2010) sostiene:

“La movilización de los restos grandes de árboles es dependiente de las características físicas de cada leño y se relaciona con la anchura del canal; su diámetro con la profundidad de flujo; su orientación dentro del canal; y con un grado menor, la pendiente del canal” (Swanson et al. 1982, Bilby and Ward 1989). “Los LWD se mueven más allá en corrientes grandes que en arroyuelos, y las piezas más pequeñas se mueven más allá que las más grandes” (Grant 1987, Lienkaemper y Swanson 1987). “Si se cuenta con grandes flujos, estos arrastran a los LWD acostándolos en sus trayectorias y transportándolos en canales de bajo gradiente” (Keller y Swanson 1979, Nakamura y Swanson 1993); el cual “la mayoría de los restos leñosos son transportados durante eventos que tienen niveles de flujo muy por encima de las bases de los bancos. Cuando no ocurre inundaciones la mayoría del movimiento de leños resulta de cualquier desintegración de acumulaciones” (Grant 1987) o de “la removilización de piezas introducidas entre eventos de inundación” (Lienkaemper y Swanson 1987).



Imagen 4. Bloqueo del transporte fluvial a causa del flujo de restos leñosos en un río de Malasia que amenaza grandes inundaciones aguas abajo (de Dominic Lee Ik Leong, 2010).

Trabajos iniciados con mayor énfasis desde Braudrick et al. (1997, 2001) y Braudrick y Grant (2000), proporcionan bases minuciosas de cómo abordar temas sobre la movilidad de restos leñosos en corrientes; y que luego Haga et al. (2002), Bocchiola et al. (2002, 2006), Ruiz-Villanueva et al. (2012) entre otros continuaron estudios para explorar aún más la dinámica de este tipo de leños.

- Para troncos sin raíz

El límite superior para el movimiento de un tronco sobre un lecho suave es dado por su profundidad boyante (Braudrick et al. 1997); la profundidad en la cual el flote ocurre en un canal horizontal se calcula estableciendo la fuerza gravitacional igual a cero y numéricamente solucionando las ecuaciones (Braudrick y Grant 2000). Un tronco sin raíz flota cuándo:

$$F_g = F_t \text{sen} \alpha = (g\rho_t L_t A_t - g\rho L_t A_{\text{sub}}) \text{sen} \alpha = 0$$

$$g\rho_t L_t A_t = g\rho L_t A_{\text{sub}} \quad \dots (25)$$

$$A_{\text{sub}} = \left\{ 2\cos^{-1} \left(1 - \frac{2h}{D_t} \right) - \text{sen} \left[2\cos^{-1} \left(1 - \frac{2h}{D_t} \right) \right] \right\} \frac{D_t^2}{8} \quad \dots (26)$$

Por otro lado, en la figura “8 C” si $U_{\text{lim}} = 0$, el tronco flotará y será transportado con velocidad igual a la del flujo, excepto si interactúa con otros troncos o uno de los bancos ribereños. En la figura “8 D” si $U_{\text{lim}} \geq U_{\text{flujo}}$, se impondrá la condición de reposo; y si $U_{\text{lim}} < U_{\text{flujo}}$, el tronco se deslizará; es importante mencionar que el tronco flotará cuando $\rho_t A_t < \rho A_{\text{sub}}$.

- Para troncos con raíz

La profundidad suficiente para que el tronco logre flotar es el diámetro del extremo más ancho del árbol más la distancia de masa de raíz que se extiende hacia fuera, o aproximadamente 3% al 5% de la longitud estimada del tronco; se indica también que la longitud de los troncos con raíces que se transportan excede raramente cerca de 30 veces la profundidad máxima del flujo (Diehl 1997, citado por NCHRP 2010).

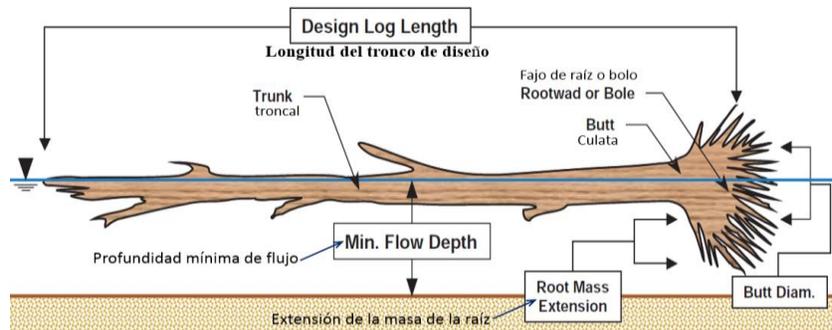


Figura 11. Esquema de la longitud de diseño de un tronco unido a su bulbo de raíz, diámetro extremo, y la extensión de la masa de la raíz (gráfico traducido de NCHRP 2010).

Dinámicamente los detritos con fajos de la raíz flotan cuando:

$$F_g = - \left[g\rho_t \left(L_t \frac{\pi D_t^2}{4} + \mathcal{V}_{rw} \right) - g\rho(\mathcal{V}_1 + \mathcal{V}_2) \right] \text{sen} \alpha = 0$$

$$\rho_t \left(L_{\log} \frac{\pi D_{\log}^2}{4} + \mathcal{V}_{rw} \right) = \rho(\mathcal{V}_1 + \mathcal{V}_2) \quad \dots (27)$$

El comportamiento de los troncos con raíces en flotación (figura 11) es diferente al del contacto con el lecho (figura 10). En este caso la altura sumergida es constante a lo largo de la clavija y el disco; siendo esto muy diferente a la realidad. De las ecuaciones deducidas a partir de la figura 10 se asume solamente el método de cálculo para el área sumergida (A_1) y volumen (\mathcal{V}_1) de acuerdo al gráfico de perfil mostrado en la siguiente figura:

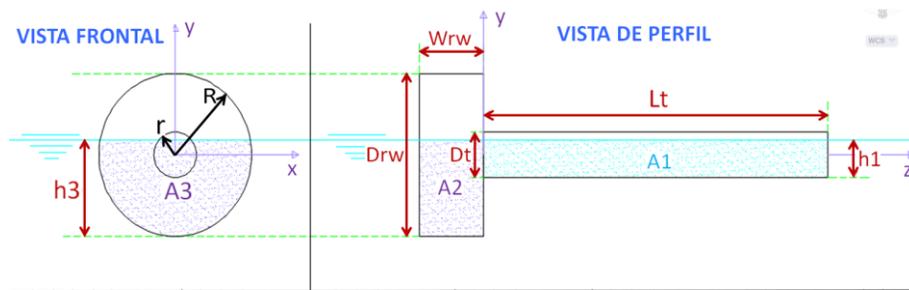


Figura 12. Características principales de una clavija sometida a flotación.

Similarmente al análisis de las clavijas sin discos, a partir de la ecuación 27 y figura 12 se hallan teóricamente los valores de “h” y demás datos.

El volumen de cada clavija sumergida (V_1) se hallaron mediante los métodos de integración.

$$V_1 = 2 \int_{-r}^{h_1-r} \int_0^{\sqrt{r^2-y^2}} L_t dx dy = 2L_t \int_{-r}^{h_1-r} \int_0^{\sqrt{r^2-y^2}} dx dy$$

$$V_1 = 2L_t \int_{-r}^{h_1-r} \int_0^{\sqrt{r^2-y^2}} dx dy = 2L_t \int_{-r}^{h_1-r} x \Big|_0^{\sqrt{r^2-y^2}} dy$$

$$V_1 = 2L_t \int_{-r}^{h_1-r} \sqrt{r^2-y^2} dy$$

Luego, de las fórmulas básicas de integración indefinida tomamos la formula a considerarse en este caso, la cual el integrando es una raíz cuadrada de una expresión cuadrática.

$$\int \sqrt{a^2 - u^2} du = \frac{u}{2} \sqrt{a^2 - u^2} + \frac{a^2}{2} \arcsen\left(\frac{u}{a}\right) + c$$

Siendo $u = f(x)$ una diferenciable en “x”, y “a” una constante, entonces para V_1 se tiene:

$$V_1 = 2L_t \left(\frac{y}{2} \sqrt{r^2 - y^2} + \frac{r^2}{2} \arcsen\left(\frac{y}{r}\right) + c \right) \Big|_{-r}^{h_1-r}$$

$$V_1 = 2L_t \left(\frac{h_1-r}{2} \sqrt{r^2 - (h_1-r)^2} + \frac{(h_1-r)^2}{2} \arcsen\left(\frac{h_1-r}{r}\right) - \frac{r^2}{2} \arcsen(-1) \right) \dots (28)$$

Reemplazando V_1 y V_2 en la ecuación 27 obtenemos el valor desconocido h_1 :

$$\rho_t \left(L_{\log} \frac{\pi D_{\log}^2}{4} + V_{rw} \right) = \rho (V_1 + V_2)$$

$$\rho_t \left(L_t \frac{\pi D_t^2}{4} + V_{rw} \right) = \rho \left(2L_t \left(\frac{h_1-r}{2} \sqrt{r^2 - (h_1-r)^2} + \frac{(h_1-r)^2}{2} \arcsen\left(\frac{h_1-r}{r}\right) - \frac{r^2}{2} \arcsen(-1) \right) + w_{rw} \left\{ 2\cos^{-1}\left(1 - \frac{2h_3}{D_{rw}}\right) - \sin \left[2\cos^{-1}\left(1 - \frac{2h_3}{D_{rw}}\right) \right] \right\} \frac{D_{rw}^2}{8} \right) \dots (29)$$

Siendo para $h_3 = h_1 + R - r$, tal como se indica en el grafico frontal de la figura 12.

c. Trayectorias en el transporte de restos leñosos

Las corrientes de circulación secundaria convergen en la superficie, haciendo que los restos de árboles flotantes sean transportados a lo largo de esta trayectoria relativamente confinada dentro de un canal (Diehl 1997; citado por NCHRP 2010, p 46).

- Trayectoria en tramos rectos

NCHRP (2010) sostiene:

“En tramos rectos de un canal, la trayectoria está generalmente en el centro del canal y estrechamente relacionado al thalweg. Por consiguiente, la mayoría del transporte de restos de vegetación en la superficie de agua se da en la zona de convergencia superficial (figura 13) donde el flujo es generalmente más profundo y más rápido, y como resultado, los leños son transportados sobre la velocidad media del agua” (Diehl 1997). Estos leños transportados en el canal seguirán generalmente esa trayectoria y algunos quedan alojados a lo largo de los bancos o en barras mientras se mueven río abajo.

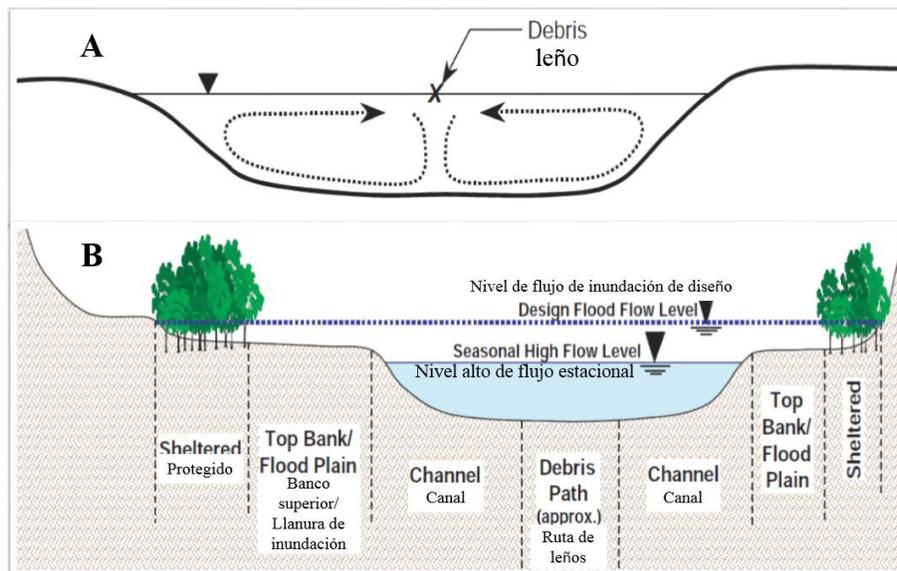


Figura 13. A) Patrones de flujo secundarios en canales rectos. B) Categorías de ubicación con respecto a la entrega local de restos leñosos en tramos rectos (gráficos traducidos de NCHRP 2010).

- Trayectoria en tramos curvos

NCHRP (2010) indica:

“En meandros de radio moderado el transporte de leños se observa a menudo y a lo largo del hilo de la corriente (figura 14), como por ejemplo entre en el thalweg (centro del canal) y el banco

exterior (lado cóncavo del río) que está en contacto con la vegetación del banco” (Diehl 1997). En corrientes o ríos con bosques alineados, el potencial para el transporte y entrega de restos de árboles durante cualquier inundación dada disminuye mientras la sinuosidad del canal aumenta y el radio de curvatura disminuye, porque los restos se transportan generalmente a lo largo del thalweg. Consecuentemente los restos de árboles en los ríos altamente sinuosos y bien forestados no serán transportados lejos de su área de fuente durante cualquier evento dado y a menudo es depositado a lo largo o encima del banco externo o en el punto de la barra de la curva siguiente aguas abajo. Sin embargo, algo de estos restos pueden moverse eventualmente río abajo durante flujos subsiguientes.

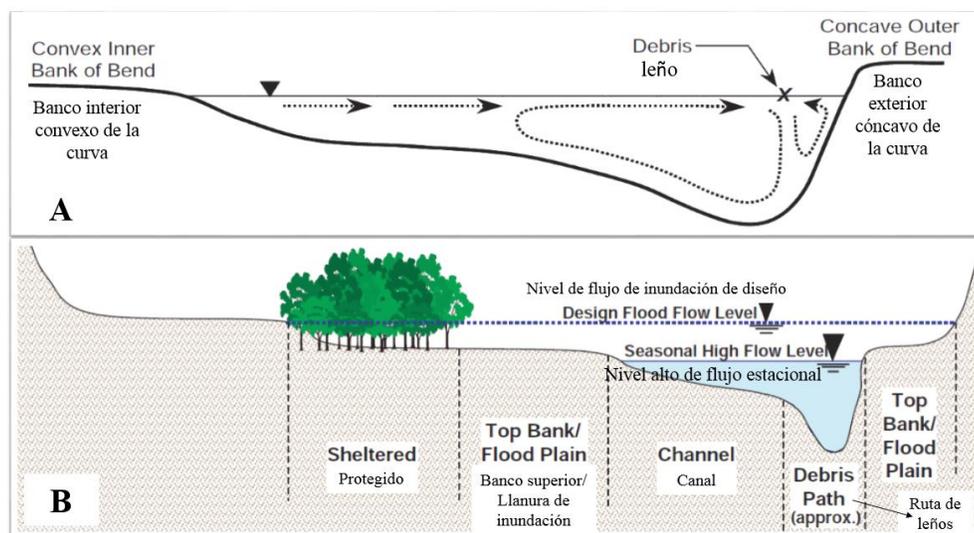


Figura 14. A) Patrones de flujo secundarios en canales curvos. B) Categorías de ubicación con respecto a la entrega local de restos leñosos en tramos curvos (gráficos traducidos de NCHRP 2010).

De otro lado, cuando WD en tránsito durante una inundación entran a un canal en curva, la aceleración angular y el momento del flujo y de los escombros pueden conducir a los WD dentro bosques adyacentes en pie. La vegetación de la ribera de suficiente tamaño puede formar una barrera donde los escombros son depositados y las aguas de inundación están dispersadas sobre la llanura de inundación (Abbe y Montgomery 2003).

d. Atasco y acumulación de los restos leñosos

El tamaño de los troncos controla la probabilidad de que estos sean atascados dentro del canal de un río, estabilizados en contra de árboles o alojados en las márgenes de los canales o áreas de inundación; en estos casos, la dimensión crítica es la longitud del tronco en relación al ancho del río (Gurnell et al. 2002).

NCHRP (2010) indica:

“Los atascos pueden formar estructuras que atraviesan el canal y que permanecen intactos aun después del retiro de las inundaciones. Si un árbol cae producto de la erosión del banco su taco de raíz permanecerá unido” (Johnson 1991, Coho y Burges 1994). “Estos tacos pueden ser importantes en el anclaje de leños sobre los lechos de los ríos (Figura 15), siendo más resistente al transporte” (Bisson y Col. 1987). Además, el tronco del árbol puede romperse en pedazos más pequeños al golpear al suelo u otros grandes árboles en pie; también los miembros, ramas, ramitas y hojas pequeñas desmenuzadas están disponibles para el reclutamiento; de manera que, se integran a las corrientes y se transportan río abajo a un determinado lugar y/o estructura hidráulica.

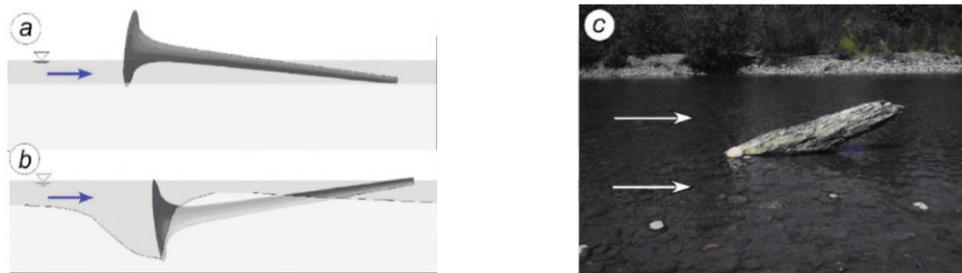


Figura 15. a) Si la raíz permanece estable después de que el transporte de la carga sobre el lecho ha iniciado, (b) La socavación puede comenzar el proceso cuando parte de la raíz sumergida es enterrado en el lecho. (c) Raíces enterradas tienen sus trocos señalando río abajo y crean siempre obstrucciones dentro del río (gráficos de Abbe and Brooks 2011).

Según Abbe and Montgomery 2003):

Los tascos en meandros establecen puntos duros locales dentro de los valles aluviales que limitan la migración del canal y la influencia en la curvatura del meandro; estos atascos se pueden iniciar en diversas partes de un canal aluvial, pero una vez formados estos atascos desvían el flujo y definen el desarrollo posterior del canal. “La obstrucción del flujo conduce a un aumento de la elevación de la superficie del agua corriente arriba a partir del meandro, permitiendo a los siguientes leños ser depositados en elevaciones más altas y aumentando el tamaño, masa, y estabilidad del atasco. El gradiente hidráulico resultante vuelve a dirigir la línea de corriente principal a lo largo del plano aguas arriba del atasco y también puede dar lugar a un flujo de desbordamiento a través de la inundación adyacente y posiblemente avulsión del canal” (Miller 1995). Con el tiempo, el radio de curvatura del meandro disminuye progresivamente a medida que la curva se contrae, resultando en un radio menor de curvatura para tramos con atascos que para tramos sin obstáculos.

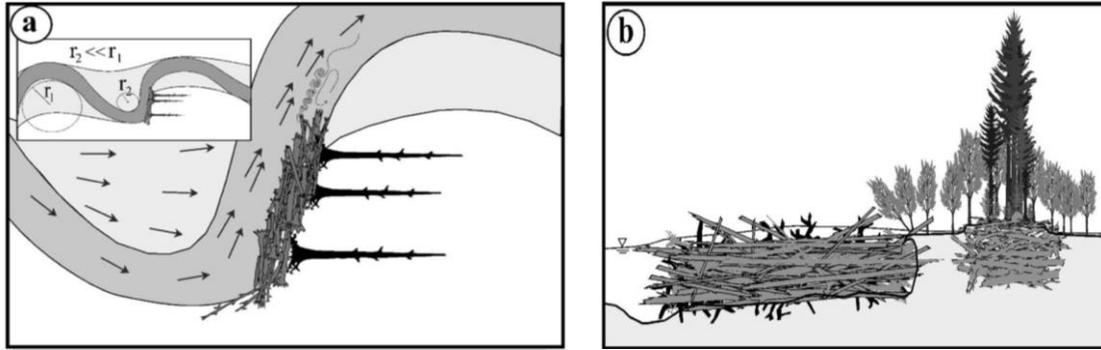


Figura 16. a) Vista en planta del flujo en un meandro con atascos. b) vista en sección transversal del canal mirando hacia aguas abajo dentro del atasco (gráficos de Abbe y Montgomery, 2003).

Por último, en NCHRP (2010):

El tamaño de las acumulaciones de LWD aumenta río abajo mientras que la frecuencia disminuye si el transporte se da en ríos pequeños (Swanson et al. 1982, Bilby and Ward 1989). En muchos casos, los restos leñosos pueden acumularse en las partes inferiores de las barras de meandros de punto de curvatura muy por debajo de la parte superior del banco.

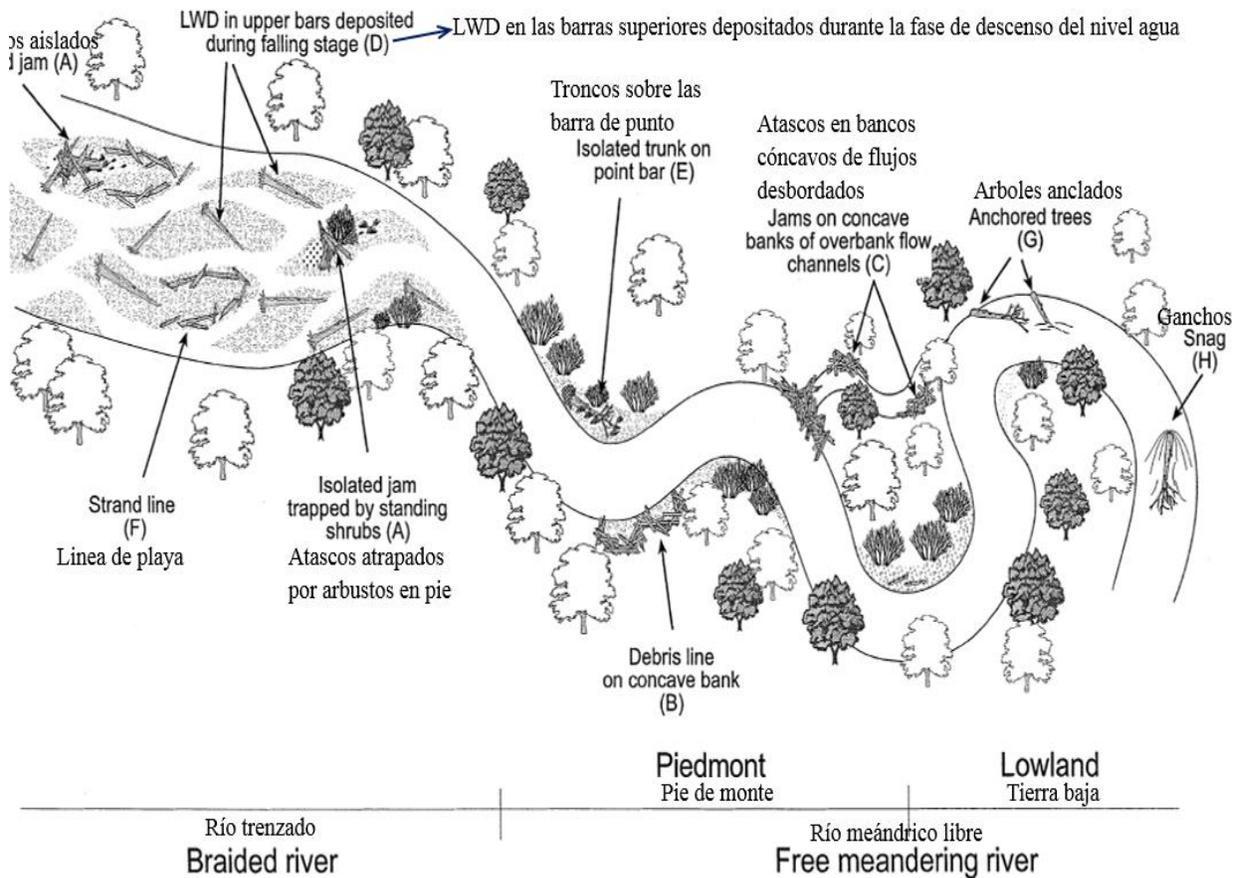


Figura 17. Tipología de grandes acumulaciones de madera observados en grandes ríos de sistemas trenzadas de tierras altas a las tierras bajas (gráfico traducido de Gurnell et al. 2002).

Una variedad de acumulaciones de restos de árboles ocurre a lo largo de los márgenes exteriores de las curvas en los meandros, muchas de estas son simplemente restos inestables depositados en zonas poco profundas del canal. Los atascos en meandros forman un tipo distinto de estructura estable que, a diferencia de los atascos de deflexión de flujo, son compuestos de restos que experimentan el transporte aguas abajo (Abbe and Montgomery 2003).

La acumulación de restos de madera en un atasco de desechos es un proceso relativamente aleatorio que es difícil de predecir debido a la naturaleza estocástica de entrada de madera y transporte (Manners y Doyle 2008).



Imagen 5. Izquierda) Cabecera del río Tajo, después de una crecida, donde grandes cantidades de leños fueron movilizados y atascados (fotografía de la universidad Complutense de Madrid, 1920-30'). Derecha) Palizada en Puerto Mazan en la ribera derecha del río Napo en 1998 (BID, 2010).

2.2.3. Espigones Engineering Log Jam (ELJ)

En la tesis de Jacay (2019), el cual también pertenece a este proyecto, se afirma:

El término "ingeniería de atascos de troncos" fue acuñado por el Dr. Tim Abbe (Abbe et al., 1997, Abbe 2000) para diseñar estructuras mediante entramados de troncos (ELJs), como una medida del control de la erosión en sistemas fluviales. Los espigones ELJ son competitivos en precio con respecto al revestimiento de roca, y probablemente mucho más baratos sobre la base del costo por metro lineal en bancos ribereños, si se dispone de una fuente de troncos (Abbe et al. 1997, Brooks et al. 2001).

Los espigones ELJ han sido construidos en numerosos ríos en América del Norte y “la experiencia de estos ensayos sugiere que el enfoque puede ser superior al revestimiento de roca como un tratamiento para los problemas de erosión por varias razones como costo, duración tiempo, etc.” (Brooks et al. 2006).

- **Función**

Los ELJs actúan para alterar la trayectoria del flujo que impacta en el banco, desviándolos lejos de los bancos que erosionan, así como proporciona el revestimiento o protección. Estas estructuras están diseñadas bajo el conocimiento de que se producirá una socavación significativa alrededor del borde frontal; sin embargo, la ingeniería de troncos que forma una red entrelazada de troncos (imagen 6), son tales que puedan soportar no sólo una fuerte corriente a lo largo de los bordes de las estructuras, sino que también debajo de ellas. Cabe indicar que, por la obtención de especies madereras de buena calidad, la estructura puede funcionar a lo largo de 50 años o más (Brooks et al. 2006).



Imagen 6. Construcción de un espigón ELJ que está siendo instalada en el río del salmón (fotografía de Knutson y Fealko, 2014).

- **Criterio de diseño**

Según Baird et al. (2015):

Una vez obtenidos los datos de hidrología, sedimentos, hidrodinámica de río y uso futuro de la tierra; se determina las condiciones físicas de los límites a través de un análisis espacial que sea apropiado para el número de ELJ's en el diseño. “El espaciamiento entre cada ELJ debe ser 3-4 veces la longitud de la estructura” (Sylte y Fischenich 2000). “La base del ELJ se coloca a una elevación por debajo del nivel de máxima socavación. La elevación superior del ELJ debe alcanzar la elevación de la superficie más baja de la planicie de inundación o hacia la descarga a banco lleno. La longitud sería la misma de los troncos claves que se colocan de manera que los trozos de raíz de los miembros adyacentes estén próximos entre sí” (Abbe et al. 2005). La anchura dependería de troncos secundarios apilados ortogonalmente, cuyo tamaño y cantidad debe ser suficiente para desviar y evitar que la socavación llegue los troncos claves.

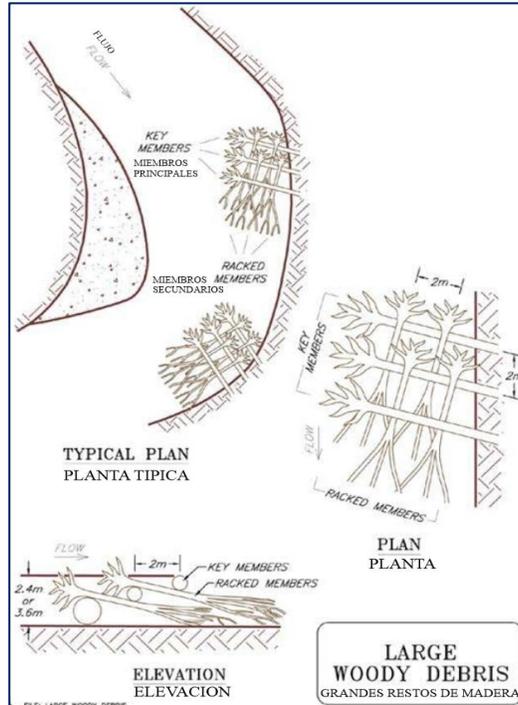


Figura 18. Detalles del diseño de los escombros árbolados (gráfico traducido del NCHRP, 2005).

Además, en Baird et al. (2015), citado por D'aoust y Millar (2000):

Las principales fuerzas para determinar la estabilidad de los ELJs son la fuerza de flotación neta actuando sobre el ELJ y transferida al anclaje (estos pueden ser de troncos, pedruscos, pilotes o anclas de tierra), fuerza de arrastre horizontal actuando sobre el LWD y transferida al anclaje, fuerza de arrastre horizontal actuando directamente sobre el anclaje, fuerza vertical de elevación actuando directamente sobre los anclajes, Peso inmerso de los anclajes y la fuerza de rozamiento en la base del ELJ que resiste al deslizamiento.

“Para el diseño, las fuerzas que actúan sobre el LWDS se dividieron en flotabilidad y arrastre del flujo, siendo obviados las fuerzas debidas impactos de cuerpos flotantes” (Shields et al. 2004, p. 210). “La fuerza de flotación en un LWD, F_b (en Newtons), es igual al producto de la diferencia entre el peso específico del agua (γ_w) y de los escombros leñosos (γ_d), con el volumen sumergido de los troncos” (Braudrick y Grant 2000).

$$F_b = (\gamma_w - \gamma_d) \left[\sum_{i=1}^{i=n+1} V_{k_i} + \sum_{i=1}^{i=n} n_{r_i} V_{r_i} \right] \quad \dots (30)$$

Donde: V_{k_i} y V_{r_i} son volúmenes sumergidos en m^3 para el i -ésima tronco principal y secundaria, respectivamente, en la i -ésima capa de un LWD compuesto de “ $n+1$ ” piezas principales y “ n ” capas de piezas secundarias. La cantidad n_{r_i} número de troncos secundarios en la capa i .

- **Estabilidad de los ELJs**

Con respecto a la estabilidad Brooks et al. (2006) afirman:

“Las acumulaciones de troncos naturales tienden a ser las partes más estables, en los paisajes aluviales dinámicos, y se ha demostrado que su estabilidad puede llegar hasta 700 años en América del Norte” (Abbe 2000). Bajo condiciones naturales, la estabilidad de los atascos de troncos está en función del entierro de los troncos clave en el lecho del río, entrelazado de troncos menores dentro de la estructura, el lastre asociado con la deposición posterior de sedimentos y la vegetación, que tienden a colonizar toda la estructura. “Las percepciones de que la madera era intrínsecamente inestable en arroyos y ríos, junto con las explicaciones físicas inadecuadas de por qué la madera era naturalmente estable, condujeron al uso generalizado de cables y anclas de acero para las colocaciones de madera en Norteamérica” (D’Aoust & Millar 2000, Fischenich & Morrow 1999, Shields et al. 2000, Nichols & Sprague 2003).

La longitud media de la raíz y el abanico promedio (diámetro de la sección de la raíz), el diámetro medio del tronco y la longitud son necesarios para determinar la estabilidad de ELJ. Estas dimensiones se usan para calcular la estabilidad de los miembros clave y otros basándose en la resistencia al arrastre, la flotabilidad, el esfuerzo cortante y la fricción (Baird et al. 2015).

Ver detalles en la tesis de Jacay (2019), pues ahí se abordó el diseño de los Espigones ELJ.

2.2.4. Modelos hidráulicos

Los estudios sobre la respuesta de un canal frente al desarrollo de situaciones complejas se hacen generalmente usando un modelo físico. Este sistema semejante reducido está diseñado para lograr un comportamiento similar al prototipo. La relación de los procesos y parámetros físicos que gobiernan debe ser de la misma para modelo y prototipo; es decir, deben ser mecánicamente similares, tanto en similitud geométrica, cinemática, dinámica, y similitudes relacionadas con los sedimentos. La similitud requerida implica dos condiciones (Richardson et. al 2001):

- A cada punto, tiempo y proceso en el prototipo, existe un punto, un tiempo y un proceso coordinados de manera única en el modelo.
- Las relaciones de magnitudes físicas correspondientes entre el prototipo y el modelo son constantes para cada tipo de cantidad física.

Las pruebas de eficiencia de diseño acerca de la predicción del comportamiento de estructuras hidráulicas en un río, propuestas pueden hacerse a costos moderados y pequeños riesgos en modelos de pequeña escala (Rocha 1998).

a. Similitud geométrica

Es la relación existente de longitudes, del prototipo con el modelo expresado en las mismas unidades; el cual, en algunas ocasiones, no se puede representar todas las características por un mismo factor de escala recurriéndose así a una distorsión (Sotelo 1997, García 2013).

La similitud contempla sólo la forma, es decir la relación de cualquier longitud en el modelo con respecto a su correspondiente en prototipo; siendo su propiedad característica representar sistemas geoméricamente similares, ya sea figuras planas, cuerpos sólidos o modelos de flujo (Sotelo 1997). Esta relación se conoce como factor de escala y puede expresarse como:

$$e_L = \frac{L_m}{L_p} \quad \dots (31)$$

Siendo L_m y L_p dimensiones lineales correspondientes en modelo y prototipo, respectivamente y e_L factor de escalas. Entonces:

Relación de áreas:
$$e_A = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^2 = e_L^2 \quad \dots (32)$$

Relación de volúmenes:
$$e_v = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^3 = e_L^3 \quad \dots (33)$$

b. Similitud cinemática

“La similitud cinemática entre dos sistemas de flujo se expresa como semejanza geométrica entre las líneas de corriente de ambos flujos, sin distorsión o con ella” (Sotelo 1997). “En este caso los vectores velocidad del fluido en el prototipo son proporcionales a su vector velocidad correspondiente en el modelo” (García 2013). “La similitud cinemática implica similitud en el movimiento, es decir similitudes de longitud y de intervalos de tiempo” (Sotelo 1997, Streeter et al. 1999, García 2013). Luego para la escala de tiempo e_T se tiene:

$$e_t = \frac{t_m}{t_p} \quad \dots (34)$$

La escala de aceleración puede ser derivada similarmente.

$$e_a = \frac{a_m}{a_p} = \frac{e_L}{e_t^2} \quad \rightarrow \quad e_a = \frac{e_L}{e_t^2} \quad \dots (35)$$

Cuando una magnitud interviene en modelo y prototipo la escala será igual a 1 (Sotelo Ávila 1997, Bulu s.f.), por lo tanto, para la aceleración de la gravedad se tiene:

$$e_g = \frac{e_L}{e_t^2} = 1 \quad \rightarrow \quad e_L = e_t^2$$

$$e_t = e_L^{1/2} \quad \dots (36)$$

Entonces, las magnitudes de las velocidades correspondientes están en la relación:

$$e_v = \frac{e_L}{e_t} = e_L^{1/2} \quad \rightarrow \quad e_v = e_L^{1/2} \quad \dots (37)$$

Cuando los movimientos de los fluidos son cinemáticamente similares, los patrones formados por líneas de corriente son geoméricamente similares en los tiempos correspondientes. Ya que los límites consisten de líneas de corriente, los flujos cinemáticamente similares sólo son posibles a través de límites geoméricamente similares. No obstante, esta condición no es suficiente para asegurar la similitud geométrica de los patrones de líneas de corriente, por tanto, el límite geométrico similar no es necesario que impliquen flujos similares de manera cinemática (Vegas 2002).

De otro lado, para determinar la relación de caudales e_Q es importante indicar lo siguiente:

$$e_Q = e_v e_A = e_L^{1/2} e_L^2 = e_L^{5/2} \quad \rightarrow \quad e_Q = e_L^{5/2} \quad \dots (38)$$

c. Similitud dinámica

La semejanza dinámica se adopta cuando existen fuerzas aplicadas al modelo y cuyo problema en la mecánica de fluidos radica en operar de forma conjunta con todas las fuerzas (Sotelo Ávila 1997, Streeter et al. 1999). Para Vegas (2002) la similitud dinámica entre dos sistemas geométrica y cinemáticamente similares requiere que la razón de todas las fuerzas homólogas en los dos sistemas sea la misma, luego la segunda ley de Newton puede escribirse como sigue:

$$\Sigma F = m a \quad \rightarrow \quad F_p + F_g + F_v + F_t + F_e = m a$$

$$e_F = \frac{m_m a_m}{m_p a_p} = \frac{(F_p + F_g + F_v + F_t + F_e)_m}{(F_p + F_g + F_v + F_t + F_e)_p} \quad \dots (39)$$

Donde:

$m a$: Reacción de la masa de las fuerzas actuantes o fuerza de inercia

F_p : Fuerza de presión

F_g : Fuerza debida a la acción de la gravedad

F_t : Fuerza producida por la tensión superficial

F_v : Fuerza de corte debido a la viscosidad

F_e : Fuerza producida por compresión elástica del fluido

El método dinámico depende de la variación constante de fuerzas en el modelo y en el prototipo, el cual la escala de fuerza se mantiene constante. Las fuerzas dominantes sobre las estructuras hidráulicas son las fuerzas de inercia, gravitacional y de viscosidad (Bulu s.f.).

$$e_F = \frac{m_m a_m}{m_p a_p} = \frac{(F_g)_m}{(F_g)_p} = \frac{(F_v)_m}{(F_v)_p} \quad \dots (40)$$

Pero no todas estas relaciones pueden considerarse como independientes debiendo determinarse algunas de ellas una vez establecidas las demás. Así tenemos fuerzas que actúan en forma mínima comparada con la fuerza actuante predominante y otras fuerzas no actúan según el caso que se esté tratando (Vegas 2002).

d. Número de Froude (Fr) como condición de similitud en canales abiertos

El número de Froude tiene importancia en flujos con velocidades grandes que ocurren por la acción exclusiva de la gravedad; tal es el caso cuando se presentan problemas con superficie libre, donde los efectos viscosos son despreciables. A medida que aumenta el número de Froude, mayor es la reacción inercial de cualquier fuerza; en tanto disminuye, mayor el efecto de la fuerza gravitacional. Cuando el flujo es horizontal, la acción del peso desaparece y con ella la influencia del número de Froude (Sotelo 1997).

En obras hidráulicas de ingeniería fluvial las fuerzas predominantes son las gravitatorias, denominándose la ley en este caso semejanza de Froude (García 2013), tal número es representado por:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad \dots (41)$$

Donde: “V” velocidad del fluido, “g” aceleración de la gravedad y “h” altura.

Los números de Froude calculados para el modelo y prototipo en un punto deben ser los mismos (Streeter et al. 1999, Bulu s.f.); y como la gravedad es la misma para los dos sistemas, tenemos:

$$Fr_m = Fr_p \quad \rightarrow \quad \frac{V_m}{\sqrt{g_m h_m}} = \frac{V_p}{\sqrt{g_p h_p}} \quad \dots (42)$$

e. Material del lecho móvil

De acuerdo a Vegas (2002) se afirma que:

El material del lecho móvil deberá seleccionarse cumpliendo, por lo menos, con la identidad del número de Froude, relacionado al grano (Fr^*), en modelo y prototipo.

$$Fr^* = \frac{\tau}{\Delta\rho g d} = \frac{\gamma_w R S}{(\gamma_s - \gamma_w) d} \quad \dots (43)$$

Donde:

- R : Radio hidráulico en metros
- S : Pendiente energética
- d : Diámetro del grano
- γ_w : Peso específico del agua cuyo valor es igual a 9810 N/m³
- γ_s : Peso específico del sedimento igual a 26683 N/m³
- τ : Esfuerzo cortante N/m²
- ρ : Densidad en Kg/m³

De la identidad del número de Froude, si se desprende que la escala de diámetro del grano es igual a la geométrica, se considera un modelo sin distorsión y usando sedimentos de igual origen natural que el prototipo.

$$(Fr^*)_m = (Fr^*)_p$$

$$\frac{\gamma_w R_m S_m}{(\gamma_s - \gamma_w)_m d_m} = \frac{\gamma_w R_p S_p}{(\gamma_s - \gamma_w)_p d_p} \quad \dots (44)$$

Se tiene en cuenta que el modelo no tenga distorsión de escala ($S_m = S_p$) y si se usa los sedimentos de origen natural igual que en el prototipo ($(\gamma_s - \gamma_w)_m = (\gamma_s - \gamma_w)_p$), se trata de materiales del mismo peso específico.

$$\frac{R_m}{d_m} = \frac{R_p}{d_p} \quad \dots (45)$$

2.3. Términos básicos

Leños (WD): Son restos de vegetación (LWD y FWD) conformado por troncos, árboles completos, ramas y raíces que quedan a la intemperie debido a la erosión en bancos, longevidad, volteo y deslizamiento en pendientes montañosas (V. Ruiz-Villanueva et al, 2014).

Leños gruesos (Large Woody Debris o Lwd): Son grandes restos de árboles (LWD), comúnmente definidos como leños más grandes que 1 metro de longitud y 0.1 metros de diámetro (troncos), es un elemento principal de la morfología de corrientes en sistemas fluviales boscosos del Pacífico Noroeste y otras partes (Braudrick et al., 1997).

Leño finos (Fine Woody Debris o FWD): Son los escombros pequeños de árboles; definidos como maderos menores de 1 metro de longitud y 0.1 metros de diámetro, es un elemento de la morfología de corrientes en sistemas fluviales boscosos (Braudrick et al., 1997).

Clavijas: Término propio denominado a los troncos a escala reducida que simulan, en el canal experimental, el material leñoso que arrastran las corrientes de los ríos.

Discos: Término propio denominado a las raíces gruesas a escala reducida que van adheridas tanto a las clavijas como a las varillas de madera (miembros) de los espigones ELJ.

Engineering Log Jam (ELJ): Término acuñado por el Dr. Tim Abbe para describir un tipo de estructura que consiste en un espigón de troncos entrecruzados diseñado primordialmente para el control de erosión en canales naturales. Los espigones ELJ, denominado en esta tesis, actúan como un tipo natural de protección de bancos sobre largas temporadas y mejoran el carácter natural de ríos; sustituyendo de manera óptima a la ingeniería tradicional como reforzamientos con rocas, espigones herméticos, entre otros (Abbe et al. 1997, Abbe 2000).

Tronco principal: Son los miembros más grandes en diámetro y longitud de los espigones ELJ, y la mayoría con fajos de raíz simétricos (Abbe et al. 2005) y van empotrados en el banco sometido a erosión.

Tronco secundario: Son los miembros de menos longitud que los clave, y van entrecruzados con estos miembros clave para formar los espigones ELJ (Abbe et al., 2005).

Estabilidad: Término considerado a los espigones ELJ, siempre y cuando, no colapse durante avenidas máximas al proteger el lado sometido a socavación de un canal de lecho móvil.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El meandro pertenece al río Madre de Dios, afluente del río Madeira (Brasil) en la cuenca del río Amazonas, y se halla localizado en la zona “La Pastora - Puerto Maldonado” a una altimetría promedio de aproximadamente 171 msnm. El río Madre de Dios o río Amaru (Amaru mayu en Runa Simi) es un largo río que pertenece a la cuenca del Amazonas, un afluente del río Beni. Este río tiene una longitud aproximada de 1 150 km y es un río binacional, ya que discurre por la parte suroriental del Perú (655 km por la región de Madre de Dios) y noroccidental de Bolivia. El río drena una cuenca de más de 100 000 km² (Río de Madre de Dios, 2016). La ciudad de Puerto Maldonado es la capital de la provincia de Tambopata que se encuentra dentro de la delimitación del departamento de Madre de Dios. Las coordenadas geográficas de la ciudad de Puerto Maldonado son: Longitud 69°10'04'' W, latitud 12°30'34'' S y altitud 210.000 m.s.n.m.

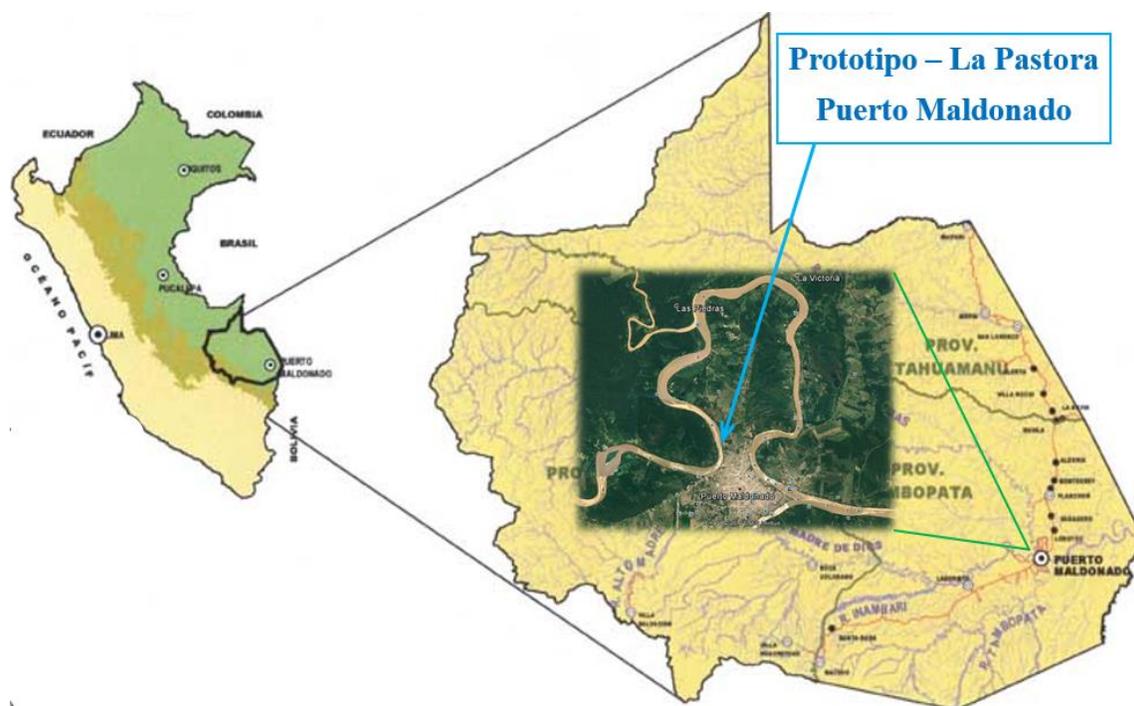


Figura 19. Ubicación política del meandro en el departamento Madre de Dios a la altura de la ciudad de Puerto Maldonado (Mapa modificado de propuesta de zonificación ecológica económica, s.f.).

El meandro presenta una longitud de aproximadamente 4.2 km, pendiente de 0.000022, calados que varían en un promedio de 10 m en épocas de sequía a 22 m en avenidas máximas, un espejo de agua en estiaje que varía de 200 m a 290 m y que llega hasta 430 en máximas, y un avance promedio de socavación de 26 m desde el año 2005 al 2011 (Odebrecht SAC, 2012).

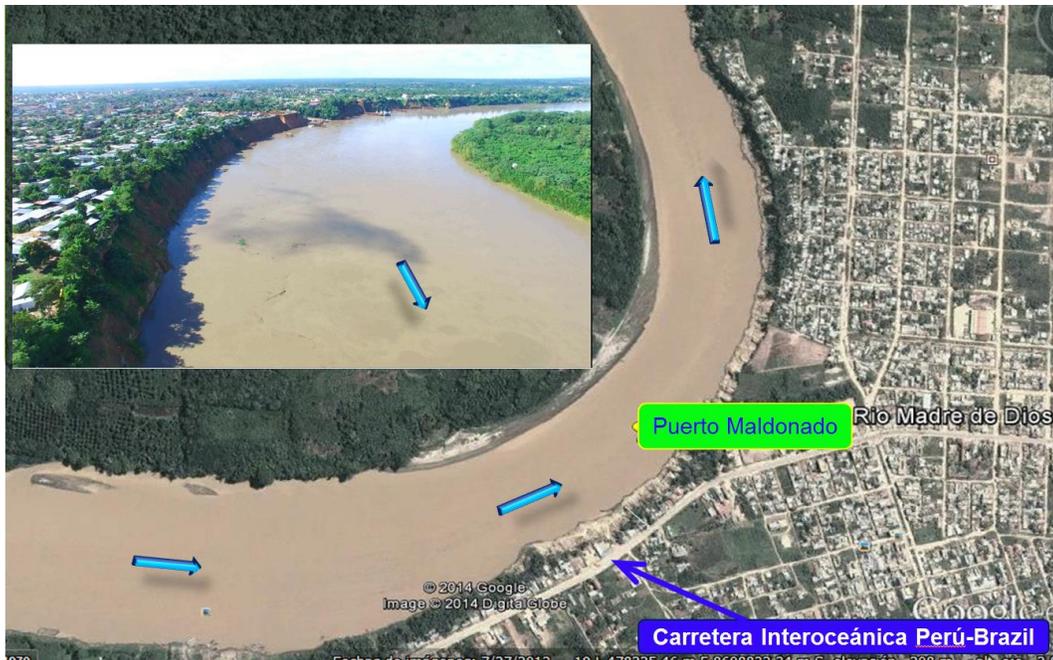


Imagen 7. Fotografía del prototipo (tramo curvo) del río Madre de Dios ubicado en la zona de riesgo “La Pastora - Puerto Maldonado”. Las flechas indican el sentido del flujo.

3.2. Unidades geográficas

Se trata de una planicie extendida con suave inclinación al Sur Este desde el arco de Fitzcarrald hasta la frontera con Bolivia, alcanzando alturas promedio de 400.00 m. a 200.00 m. Se caracteriza por su relieve suave a ligeramente ondulado con pendientes de 0.0% a 8.0%. Está constituido por sedimentos horizontales a subhorizontales del Neógeno y depósitos fluviales, aluviales del Cuaternario que conforman terrazas bajas y altas. Presenta un modelado fluvio-aluvial donde los ríos discurren con lentitud formando una red de drenaje extendida y meandriforme que disecta suave a profundamente la superficie. Se forman planicies de inundación, complejos de orillares, barras de arena y pequeños lagos (INDECI, 2006).

3.3. Unidades geomorfológicas

Según INDECI (2006):

El río Madre de Dios va excavando las secuencias de estratos de la Formación Madre de Dios y de este modo produce perfiles en “U” con una sección amplia debido a que al disminuir la velocidad del agua la erosión lateral ensancha el fondo del valle. En su estado avanzado el río Madre de Dios discurre lentamente sobre un llano aluvial en el que el material depositado forma diques laterales ya sea barras longitudinales o “point bar”.

Llanuras de Inundación: Son terrenos de drenaje pobre con depósitos mayormente argilíticos producto de los procesos de intensa erosión fluvial lateral. Los cursos de estos ríos tienden a migrar periódicamente y forman depósitos de playas, terrazas y por lo general se desbordan y depositan sedimentos arcillosos, limosos o limoarenosos producto de la erosión de las secuencias de las formaciones Ipururo y Madre de Dios.

Terrazas bajas inundables: Se ven periódicamente afectadas por inundaciones, en épocas de lluvias. Tienen sedimentos finos, limo-arcillosos y arenosos, la mayoría tiene poca altitud, pero se pueden formar depósitos de hasta 8.0 m. de altura (desde el nivel de agua hasta el nivel superior del cauce); aun así, el desborde de estos ríos es tan intenso que afecta a las comunidades nativas que se ubican en sus riberas.

Colinas: Son elevaciones del terreno cuyas laderas pueden divagar en varias direcciones a partir de su cima como también pueden formar series lineales encontrándose profundamente disectadas en ambos casos por numerosas quebradas.

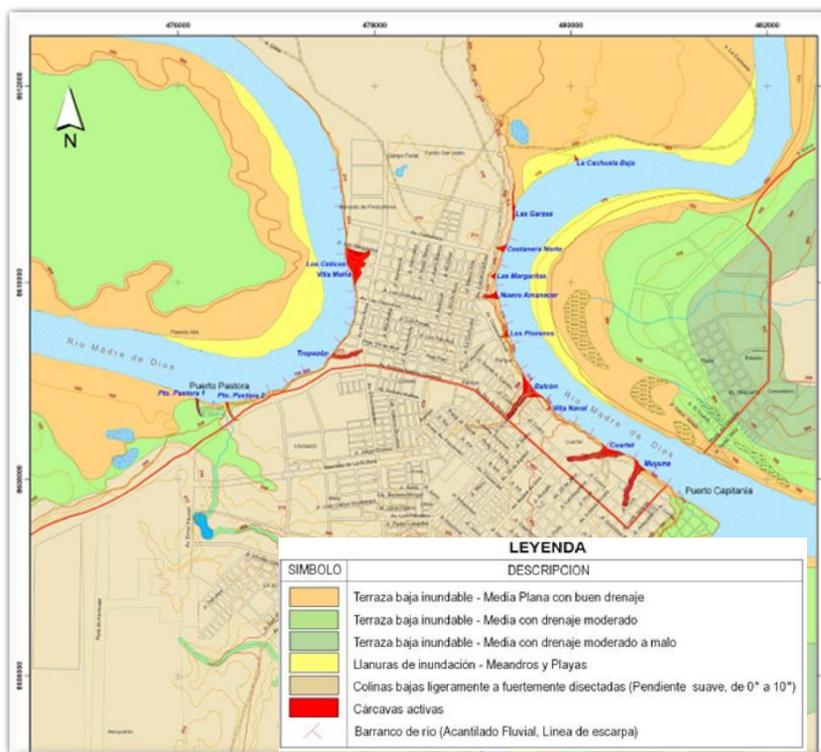


Figura 20. Geomorfología del mapa de peligros en la ciudad de Puerto Maldonado (gráfico modificado de INDECI, 2006).

Las Planicies son terrazas de morfología plana no inundables, localizadas sobre el nivel de colinas bajas ligeramente disectadas y generalmente se encuentran a 400.00 m.s.n.m. Están

constituidas por capas delgadas de suelos arcillosos, sedimentos cuaternarios de la formación Madre de Dios.

3.4. Clima y vegetación

El clima es de tipo tropical cálido y húmedo, según datos meteorológicos registrados en la ciudad de Puerto Maldonado indican que la temperatura media anual es 26°C, fluctuando entre los 10.0°C y los 38°C, con una precipitación total anual promedio de 1,423 mm, oscilando entre 1,600 a 2,400. Predominan los vientos procedentes del Noroeste con velocidades que fluctúan entre los 0,3 a 0,6 ms, y la humedad relativa mensual entre 80% y 89%. En Madre de Dios, también se registra el característico patrón presente en la mayor parte de la Amazonía Peruana, con una época más seca entre los meses de junio y setiembre (Kometter, 2003).

La vegetación del área consiste en bosques de segundo brote con presencia de Pacas Asociación Pacal con pasto Yaragua y especies arbustivas de menor tamaño; además, se tiene la presencia de Asociación de Pacales sobre los Aguajales, con especies de Chonta en menor cantidad (INDECI, 2006).

a. Tipos de Bosques

Estudios realizados por Grande (1995) y Kometter (2003) en el departamento de Madre de Dios clasifican a los bosques de la siguiente manera:

Bosque Aluvial inundable o inundado (BAi): Son bosques que se desarrollan sobre terrenos planos o depresionados localizados en áreas adyacentes al curso de ríos grandes que tienen problemas de drenaje y están conformados por materiales aluviónicos recientes.

Bosque de Terraza Baja (BTb): Este bosque se desarrolla sobre terrenos localizados generalmente después de la zona aluvial inundable, con una altura relativa sobre el nivel del río menor a 10 metros, relativamente planos con algunas depresiones, drenaje de regular a malo.

Bosque de Terraza Alta (BTa): Generalmente se ubican circundando ríos o quebradas de segundo orden. En algunas zonas del área de estudio, se encuentran en las partes más altas formando una especie de mesetas. Son de topografía plana a ligeramente ondulada, presentan pendientes que van de 0 a 8%, no tienen problemas de drenaje.

Bosque de Terraza Disectada I (BTdI): Es un bosque que se ha formado a partir de bosques de terrazas altas, que han sido sectadas a través de los años por el cauce de quebradas, simulando en

la actualidad un área de ligera a moderadamente colinosa, por lo general circundan a terrazas altas. Presentan una topografía que va de suave a medianamente accidentada con pendientes que están en un rango de 10 a 60%.

Bosque de Terraza Disectada II (BTdII): Como en el caso anterior se originan a partir de bosques de terrazas altas, han sido sectadas por las quebradas, mostrándose en la actualidad fuertemente accidentada. Presenta pendientes que superan el 60%.

También, en el departamento Madre de Dios hay presencia de bosques en colinas y montañas, las cuales se omiten detallarlos por razones que son explicados más adelante. Los datos de cada tipo de bosque fueron elaborados en mapas gracias a imágenes satelitales y ejecución de inventarios exploratorios de estos Bosques de Producción Permanente (BPP).

Tabla 1. Superficies por Tipo de Bosque por Fisiografía del BPP de Madre de Dios.

Tipos de Bosque	Simbolo	Superficie (Ha)	%
Bosque Aluvial Inundable	BAi	166 922.63	6.62
Bosque de Terraza Baja	BTb	301 761.26	11.96
Bosque de Terraza Alta	BTa	91 620.82	3.63
Bosque de Terraza Moderadamente Disectada	BTdI	514 139.51	20.39
Bosque de Terraza Fuertemente Disectada	BTdII	249 538.59	9.89
Bosque de Galería	BG	10 019.52	0.40
Bosque de Colina Baja Suave	BCbI	298 158.78	11.82
Bosque de Colina Baja Fuerte	BCbII	692 743.51	27.47
Bosque de Colina Alta Suave	BCaI	99 741.38	3.95
Bosque de Colina Alta Fuerte	BCaII	72 210.97	2.86
Bosque de Montaña Suave	BMI	19 517.92	0.77
Bosque de Montaña Fuerte	BMII	3 414.88	0.14
Cocha	C	2 351.22	0.09
TOTAL		2 522 141.00	100.00

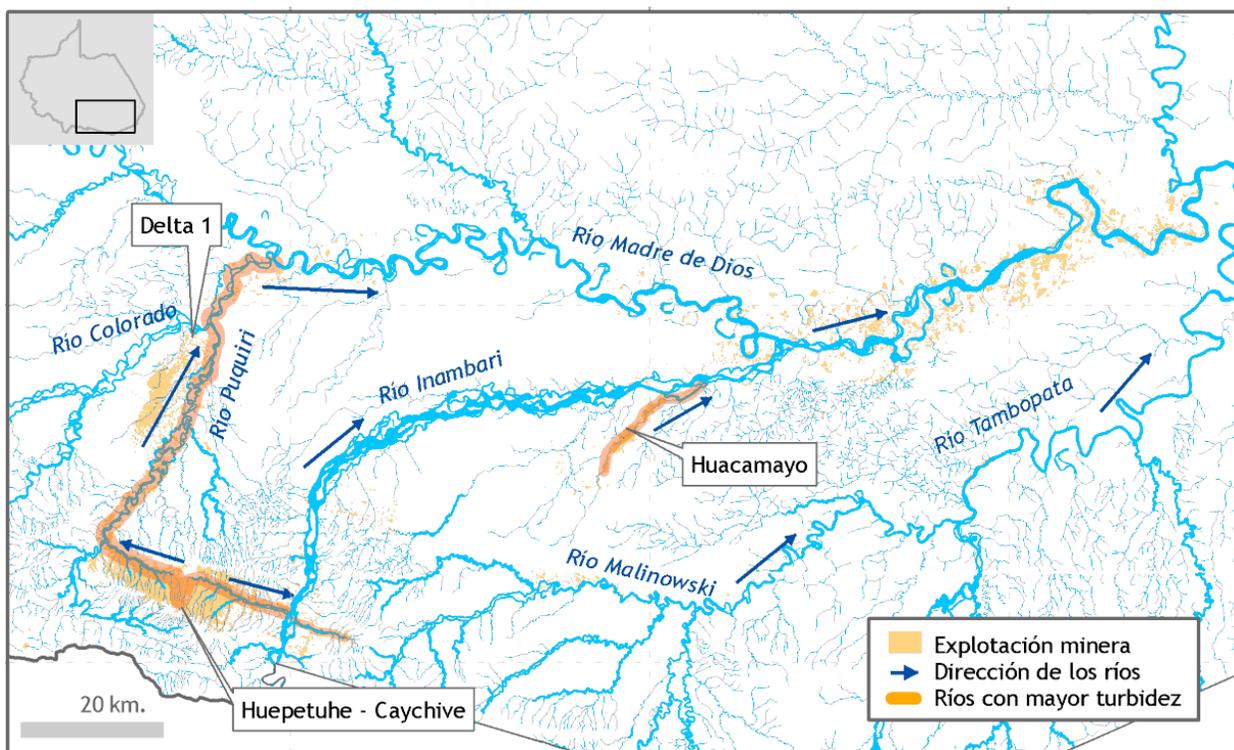
Fuente: Grande 1995 y Kometter 2003.

3.5. Zonas de deforestación

MINAG-ANA-DCPRH-ASUP-ALA MALDONADO (2010) estudió las áreas de esta región afectadas por la deforestación y afirma que:

La minería informal o ilegal es la actividad principal que causa un impacto ambiental negativo por la destrucción de extensas áreas de bosques de la región de Madre de Dios; ocasionando perjuicios a la población local, manejo sostenible de las concesiones forestales y castañeras, y otras actividades productivas mermando la posibilidad de desarrollo sostenible de la región.

“Según estudios, ya se han destruido al menos 18 000 hectáreas de bosques por la minería aurífera en Madre de Dios y cada año se destruyen unas 400 hectáreas adicionales. Si se ejecutaran todos los derechos mineros, se destruirán unas 400 000 hectáreas adicionales de bosques” (IIAP y el Ministerio del ambiente 2011), tal como se observa en la figura siguiente:



Elaborado por CooperAcción

Fuentes: Imagen Landsat y Aster 2008

Figura 21. Impacto de Minería en la Turbidez de los ríos (gráfico de MINAG-ANA-DCPRH-ASUP-ALA MALDONADO 2010).

Los problemas se observan comúnmente en los ríos Huapetuhe, Pukiri y Colorado en la cuenca del Alto Madre de Dios. El río Caychive, Dos de Mayo y quebrada Huacamayo en la cuenca del Inambari. La Quebrada Yarinal, río Malinowski en la cuenca del Tambopata. El río Madre de Dios en la Cuenca del Medio Alto Madre de Dios.

En el río Huapetuhe y Caychive se puede observar que han sido totalmente alterados en su paisaje. Los ríos han sido ampliados en su cauce por lo menos 5 veces más y el grado de turbidez el muy alto. El grado de deforestación en esta zona a Setiembre del 2008 es de 18,000 ha.

Mucho de los mineros informales van migrando de un lugar a otro, en busca del preciado metal, y muchos de ellos se encuentran en aguajales o zonas pantanosas, como es el caso de la Quebrada Huacamayo (figura 21) ubicado en km 108 de la carretera Mazuco-Puerto Maldonado.

3.6. Productividad de restos leñosos

Es de importancia indicar que se cuenta con estudios elaborados por Aragao et al. (2009) en la Amazonía de diferentes países sudamericanos incluido el río Madre de Dios en el Perú.

Estos sitios son parte de parcelas examinadas dentro de la red RAINFOR (Red Amazónica de Inventarios Forestales) donde se miden los principales componentes del ciclo del carbono desde finales de 2004 o principios de 2005, y donde la productividad del tallo se ha medido desde ya en la década de 1980 (Aragao et al. 2009).

Luego, Araujo-Murakami et al. (2011) mejoraría e incrementaría la data respecto a restos vegetativos en el río Madre de Dios y afluentes principales del departamento del mismo nombre.

a. Productividad primaria neta de carbono

Aragao et al. (2009) sostiene que la producción primaria neta de carbono (PPN) es directamente proporcional a la biomasa total (BMT o madera viva más muerta) tanto sobre como debajo la superficie del suelo; razón por el cual, se tomaron las ecuaciones de la productividad de carbono para el cálculo del volumen de madera leñosa.

$$NPP_{total} = NPP_{AG} + NPP_{BG} \quad \dots (46)$$

Cada uno de los componentes de NPP_{total} pueden ser descritos como la suma de sus subcomponentes (Clark et al. 2001a; Malhi et al. 2009).

- La productividad Primaria Neta sobre tierra (NPP_{AG}) según Aragao et al. (2009) puede ser expresado como:

$$NPP_{AG} = NPP_{canopy} + NPP_{branch} + NPP_{stem} + NPP_{VOC} \quad \dots (47)$$

Donde:

NPP_{canopy} : Es la producción de la copa de árboles (hojas, varitas de leña < 2 cm de diámetro, flores y frutos).

NPP_{branch} : Es la producción de ramas > 2 cm de diámetro.

NPP_{stem} : Es la producción de la biomasa de árboles gruesos (troncos), calculado como el cambio en la biomasa del tallo de árboles > 10 cm de diámetro más la biomasa reclutada durante el intervalo de medición.

NPP_{VOC} : Es la emisión de compuestos orgánicos volátiles del carbón (Malhi et al. 2009).

- La productividad Primaria Neta bajo tierra (NPP_{BG}) puede estar dividido en tres subcomponentes principales:

$$NPP_{BG} = NPP_{fineroot} + NPP_{coarseroot} + NPP_{exudates} \quad \dots (48)$$

Donde:

$NPP_{fineroot}$: Es la producción de raíces finas (< 2 mm de diámetro).

$NPP_{coarseroot}$: Es la producción de raíces gruesas (> 2 mm diámetro).

$NPP_{exudates}$: Es la pérdida de carbón a través de exudates y mycorrhizae, lo cual es un desafío su medición y no es considerado aquí.

b. Métodos de cálculo del material leñoso

- Método en base a transectos

Es el trazo de líneas de intersección de cierta longitud que son enlazadas a las diferentes parcelas dispersas. Cada una de las líneas parte desde una parcela y es orientada en dirección perpendicular a la otra línea, estando a una distancia considerada entre ellas para mantener la independencia. En líneas se mide toda madera muerta caída que cruza la línea de intersección. Este método de líneas de intersección es aplicado para estimar el volumen de madera muerta sobre el suelo (Baker et al., 2007).

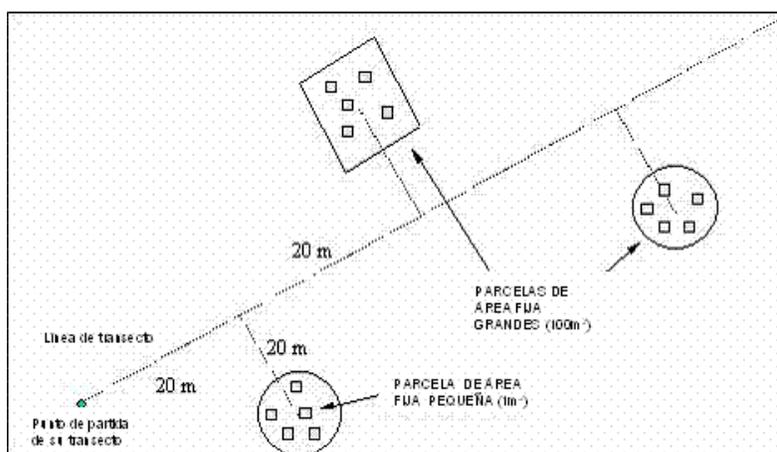


Figura 22. Establecimiento de una línea de transectos con parcelas para un estudio (Portland State University, s.f.)

El volumen para todas las piezas de madera caída sobre el suelo se calcula según:

$$V = \frac{\pi^2 \sum d_i^2}{8L} \quad \dots (49)$$

Donde: V es el volumen por unidad de área, d_i es el diámetro (en cm) del tronco i y L (m) es la longitud de la línea o transecto (Wagner 1968).

- Método en base a parcelas

“El método en base a parcelas consiste simplemente de buscar en toda la parcela de una hectárea los árboles muertos o restos leñosos” (Araujo-Murakami et al. 2011). “Este método de parcela es para estimar la madera muerta parada” (Baker et al. 2007).

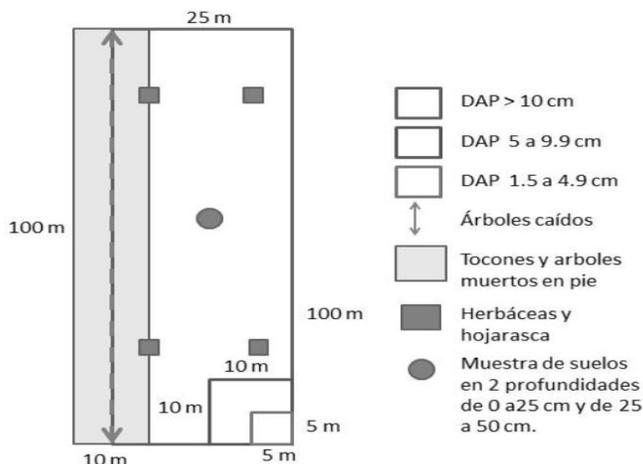


Figura 23. Diseño anidado de la parcela de muestreo de biomasa, necromasa y de carbono en el suelo (gráfico de García Soria et. al, 2012)

En la figura anterior se indican las medidas de la parcela principal y de las parcelas anidadas.

Para el cálculo del volumen de troncos en pie se utiliza la fórmula de Chambers et al. (2001), que se expresa la siguiente fórmula:

$$V = 0.0011D_b^{1.8516}H^{0.9053}((2H^{0.118}) - H^{0.118}) \quad \dots (50)$$

Donde: D_b es el diámetro a la altura de pecho, y H es la altura del tronco hasta el punto más alto donde tiene 10 cm de diámetro.

c. Puntos de muestro

Araujo-Murakami et al. (2011) realizó trabajos de campo en tres diferentes lugares del departamento de Madre de Dios (Perú) tales como: el Centro de Investigación y Capacitación Río Los Amigos (CICRA) (12°34'07"S; 70°05'57"W), la estación Biológica Cocha Cashu del Parque Nacional Manu (PNM) (11°53'8,27"S; 71°23'51,79"W) y en el Río Tambopata (12°50'12,86"S; 69°17'39,27"W); muestran los sitios de estudio (figura 24) que incluyen bosques inundables o “bajíos” y bosques que nunca se inundan o “Tierra Firme”. Los bosques de

bajíos se encuentran detrás de las barreras ribereñas de los ríos de aguas blancas, donde frecuentemente el relieve desciende formando áreas anegables periódicamente. En los bosques de tierra firme el suelo está por encima del nivel máximo de las aguas, y nunca o muy raras veces pueden ser inundados.

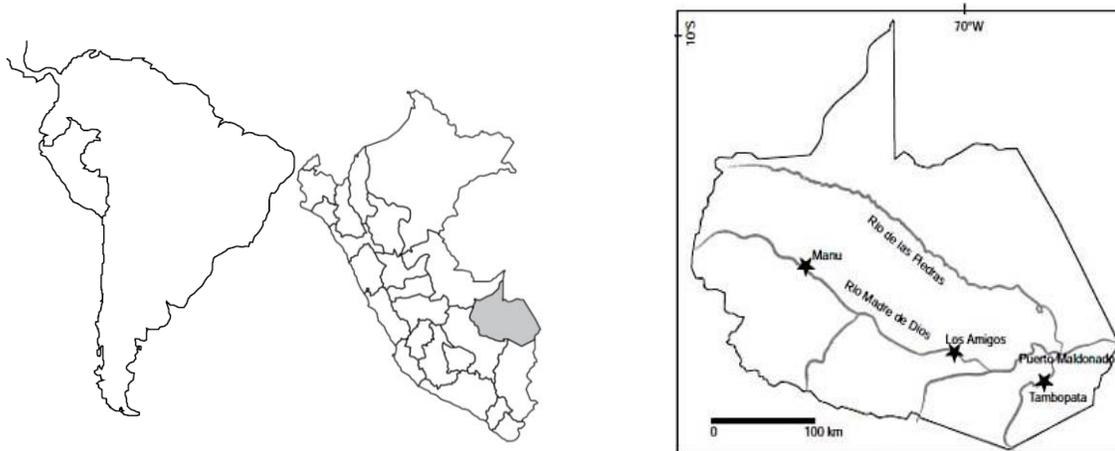


Figura 24. Ubicación del estudio indicando las áreas de estudio en el departamento de Madre de Dios, Perú (gráfico de Araujo-Murakami et al. 2011)

d. Producción estimada de madera gruesa muerta

Araujo-Murakami et al. (2011) indica que:

“Para estimar el total de la necromasa (madera muerta) del departamento de Madre de Dios el promedio de la necromasa por hectárea es multiplicado con el total del área boscosa; tal departamento contiene una extensión de **8,476 millones** de hectáreas” (FAO 2005), de los cuales se estima que por lo menos 80% constituye bosque tropical. La necromasa o el peso del volumen de madera muerta en una hectárea se calcula en base a las densidades de la madera (N1, N2) en los bosques de bajío y altura; N1 es basado en la densidad de madera muerta del estudio realizado en Tambopata por Baker et al. (2007), y N2 se basa en la densidad de la biomasa (madera viva) de cada parcela y las ecuaciones de Chao et al (2009).

El siguiente cuadro, elaborado por Araujo-Murakami et al. 2011, muestra al detalle cálculos de necromasa y biomasa en los 11 sitios del departamento de Madre de Dios. Donde; AGB es la Biomasa Aérea Gruesa (Mg/ha) estimada con las ecuaciones de Chambers et al. (2001) y ajustadas por Baker et al. (2004); ρ_j , promedio de densidad de madera muerta de cada parcela j (g/cm^3); Volumen de la necromasa en pie y en el suelo (m^3/ha); N, necromasa (Mg/ha) usando los valores de densidad de madera en N1 (Baker et al. 2007) y N2 (Chao et al. 2009).

Tabla 2. Necromasa y biomasa en 11 sitios del departamento de Madre de Dios.

Tipo de Bosque	Código	AGB	ρ_j	Volumen en pie	Volumen sobre suelo	Vol. Total (m ³ /ha)	N1	N2	Fuente
Altura	LAS-01	248.40	0.55	55.00	48.90	103.90	46.50	37.70	Araujo-Murakami et al, 2011
Altura	MNU-03	226.50	0.51	21.00	53.90	74.90	32.40	23.60	Araujo-Murakami et al, 2011
Altura	MNU-04	230.30	0.55	21.00	42.90	63.90	27.40	21.80	Araujo-Murakami et al, 2011
Altura	TAM-05	215.20	0.61	9.90	56.20	66.10	27.80	25.60	Baker et al. 2007
Altura	TAM-07	223.60	0.58	16.20	85.30	101.50	39.70	33.10	Baker et al. 2007
Altura	TAM-08	188.80	0.60	16.10	73.30	89.40	37.80	34.00	Baker et al. 2007
Promedio		222.13	0.57	23.20	60.08	83.28	35.27	29.30	
Bajío	LAS-02	240.20	0.52	14.50	41.40	55.90	24.20	18.20	Araujo-Murakami et al, 2011
Bajío	MNU-05	299.50	0.54	14.90	47.00	61.90	25.90	20.30	Araujo-Murakami et al, 2011
Bajío	MNU-06	272.30	0.52	9.00	51.00	60.00	27.20	20.30	Araujo-Murakami et al, 2011
Bajío	TAM-01	201.90	0.53	15.90	53.20	69.10	28.00	21.50	Baker et al. 2007
Bajío	TAM-02	210.60	0.54	11.00	43.80	54.80	21.30	16.80	Baker et al. 2007
Promedio		244.90	0.53	13.06	47.28	60.34	25.32	19.42	

Fuente: Araujo-Murakami et al. 2011.

Además, según Araujo-Murakami et al. 2011:

“Se estima además que en los bosques de la Amazonía la necromasa constituye casi el 13% de la biomasa aérea” (Chao et al. 2009); “las estimaciones de la necromasa en la Amazonía varían mucho desde casi ausente hasta más de 60 Mg/ha, constituyendo hasta el 33% de la biomasa aérea” (Clark et al. 2002, Nascimento y Laurance 2002, Rice et al. 2004); “la variación entre los estudios se debe en general a las diferencias entre los diferentes tipos de bosques y suelos. En una comparación de bosques en el norte de Perú, por ejemplo, se observa que los bosques de tierra firme almacenan tres veces más necromasa que los bosques inundables” (Chao et al. 2008).

Aragao et al. (2009) determinan la producción de la biomasa media por hectárea en la Amazonia:

Tabla 3. Porcentaje de la productividad primaria neta de carbono sobre y bajo terrenos.

Producción Primaria Neta (NPP) de Carbono	NPP (ton/ha/año)	Porcentaje (%)
Copa de árboles (C)	5.6	33.1
Ramas (R)	1	5.9
Troncos (T)	2.8	16.6
Raíz gruesa (Rg)	0.6	3.6
Raíz gruesa (Rf)	6.8	40.2
Compuestos orgánicos (VOC)	0.1	0.6
Sobre el nivel del terreno (C+R+T)	9.5	55.6
Bajo el nivel del terreno(Rg+Rf+VOC)	7.4	44.4
Total (C+R+T+Rg+Rf+VOC)	16.9	100

Fuente: Arago et al. 2009.

e. Productividad de las raíces gruesas

Según Aragao et al. (2009):

La producción de raíces gruesas es un término muy difícil de cuantificar. Se asume la productividad por unidad de masa de todas las raíces, que no incluyen la productividad de raíces finas (raíces < 2 mm de diámetro), es la misma que la productividad de la biomasa sobre suelo. Además, “la biomasa de raíz gruesa bajo suelo es $21 \pm 3\%$ de la biomasa sobre el suelo” (Malhi et al. 2009). Por lo tanto, la NPP de la raíz gruesa es igual a 0,21 ($\pm 0,03$) la NPP de los tallos.

De acuerdo a Aragao et al. (2009), citado por Malhi et al. (2009):

No es posible medir raíces gruesas mayores de 5 mm de diámetro por: a) la imposibilidad de instalar instrumentos donde se producen las raíces más grandes (es decir, raíces a tope directamente debajo de los tallos del árbol), b) lejos de los tallos de los árboles son poco frecuentes (Metcalfe et al. 2008b) y (c) son probablemente de crecimiento demasiado lento para invadir el crecimiento en un intervalo de 3 meses. Debido a que todos los métodos de medición conocidos para raíces gruesas son destructivos (Clark et al. 2001a, Ravindranath y Ostwald 2008), actualmente no existe un protocolo ampliamente aceptado para medir este componente de biomasa (Brown 2002).

3.7. Hidrología de la cuenca

El estudio hidrológico fue elaborado por Odebrecht SAC (2012).

a. Ubicación de la cuenca del río Madre de Dios hasta la zona en estudio

El río Madre de Dios, que se encuentra en esta cuenca, tiene una variación altimétrica desde aproximadamente 171 msnm (en la zona de estudio La Pastora-Puerto Maldonado) hasta 5980 msnm en el límite con la cuenca del Lago Titicaca.

b. Parámetros Geomorfológicos

La cuenca, por su magnitud y ubicación, tiene tres zonas bastante diferenciadas:

- Una zona de llanura amazónica, con vegetación densa, terrenos de escasa pendiente y suelos potentes arcillosos pesados, generalmente húmedos y con precipitación durante la mayor parte del año.
- Una zona de selva alta, compuesto de pequeñas colinas cubiertas con vegetación tupida.
- Una zona de sierra que llega hasta una altitud máxima de 5980 msnm.

Tabla 4. Parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Madre de Dios.

Parámetros	Cuenca del Río Madre de Dios
Área hasta la zona La Pastora (km ²)	56 553
Perímetro (km)	1929.48
Longitud del Cauce Principal (km)	817.071
Pendiente Promedio del Cauce Principal en la zona de estudio (%)	0.0005
Factor de Forma (adimensional)	0.45
Índice de Compacidad (adimensional)	2.29
Altitud Media (m.s.n.m.)	1442
Pendiente de la Cuenca (%)	0.0031

c. Caudales máximos de diseño

Tabla 5. Río Madre de Dios, zona La Pastora – Puerto Maldonado. Caudales máximos de diseño a ser usados en el proyecto de defensas ribereñas.

Periodo de retorno Tr (años)	Qmax (m ³ /s)
2.2	8003
25	12997
50	14341
100	15789

3.8. Modelo físico y descripción de instalaciones

El modelo físico se ubicó en el área de modelamiento físico del Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH) de la Universidad Nacional de Ingeniería con dirección en la Av. Túpac Amaru 210 - Lima 25 - Rímac - Lima - Perú.



Imagen 8. Vista de la fachada del laboratorio nacional de hidráulica en la ciudad de Lima-Perú.

El modelo físico se encuentra en la parte posterior del edificio celeste como indica la imagen anterior. El modelo representó un tramo curvo de 4.2 km del meandro del río Madre de Dios, sector “La Pastora - Puerto Maldonado” a escala de longitudes no distorsionada 1/60.

3.8.1. Inicio del modelo

El flujo turbulento, proveniente de un reservorio elevado, fue disipado por mallas metálicas dentro de unos tanques vertederos metálicos. Luego, limnímetros fueron colocados cerca al vertedor rectangular de cada tanque para medir caudales. El caudal de diseño medido se obtuvo mediante la manipulación de válvulas compuerta colocadas en las tuberías que conectan al reservorio. Las medidas de estos vertedores rectangulares fueron de 1 m x 0.5 m y 1.2 m x 0.5 m. Luego, el flujo cae a una poza de disipación que lo evacua a una poza de transición por medio de filtros colocados en la parte inferior del muro que divide ambas posas. La poza de transición vertió el agua de manera lenta y uniforme al lecho móvil del canal. Cabe indicar que, la poza de disipación y transición fueron de las mismas dimensiones; cuyas medidas fueron de 0.92 m de ancho, 8 m de largo, y 2 m de profundidad con respecto al inicio del nivel del lecho.

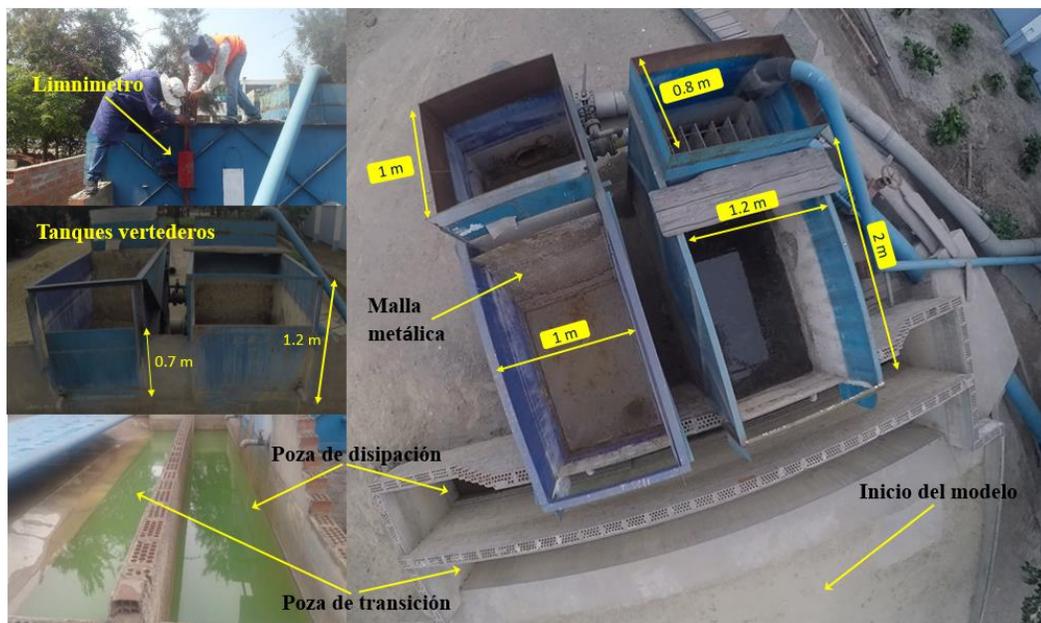


Imagen 9. Vistas de los tanques vertederos, las pozas de disipación y transición ubicadas antes del inicio del canal experimental.

Posteriormente, sobre el inicio del lecho del canal se colocó una faja transportadora de clavijas para arrojar las clavijas (troncos leñosos). La faja transportadora necesitó contar de un área

máxima a fin de colocar la mayor cantidad posible de clavijas, ya que fue muy complicado simular en el modelo la cantidad total hallada de troncos.

Para la elaboración de la faja se analizó y seleccionó los materiales idóneos que permitieron arrojar con facilidad las clavijas. Para ello se eligieron tuberías metálicas, cuyas medidas se encuentran en tamaño y diámetro comercial, de 6 m de longitud y 4" de diámetro. La tela textil sintética, usada como faja, fue de poco más de 6 m x 4 m de color azul, el cual fueron cocidos ambos extremos de 6 m entre sí, para formar la faja giratoria. Los 5 elementos giratorios hechos de tuberías fueron colocados perpendicularmente al eje donde se inicia el lecho. Los muros laterales se emplearon como soportes para la fijación de los tubos, cuya longitud es menor a la distancia (9 m) entre muros laterales. Es así que, para lograr la misma medida que hay entre muros y poder girar las tuberías se procedió a soldar una tubería estándar de 6 m con otra mitad de 3 m, sumando en total 9 m. Luego se soldó los ejes junto con las platinas en ambos extremos de cada tubería (Imagen 10 izq.) verificando simultáneamente que encaje y ajuste con la faja.



Imagen 10. Fotografía izq.) Soldado de los ejes junto a las platinas circulares en los extremos de las tuberías. Fotografía Der.) Distribución de las 5 tuberías en base al ajuste con la faja textil.

Con la faja de tela textil giratoria se cubrió las 5 tuberías de 9 m, siendo ajustada y templada la faja con los tubos extremos. Las tuberías se distribuyeron equidistantemente entre sí, después a cada eje (pieza de barra metálica soldada al extremo de cada tubería) de 1 ½" de diámetro y 20 cm de longitud se acopló una chumacera, y luego estas chumaceras fueron fijadas con pernos sobre los muros (Imagen 11 izq.). Para lograr que el sistema gire se adhirió al extremo derecho de la tubería delantera un regulador manual; este regulador permitió manipular la cantidad de material leñoso requerida a ser arrojado (Imagen 11 der.); por último, sobre la faja se procedió al trazado de líneas paralelas a los ejes con fines explicados más adelante.



Imagen 11. Fotografía izq.) Acoplamiento y empernado de las chumaceras sobre el muro izquierdo del canal. Fotografía Der.) Regulador manual para adecuarse al caudal de troncos, y trazado de líneas para las subáreas.

3.8.2. Estructura principal

Los límites del modelo fueron conformados por un canal rectangular con un fondo y muros de ladrillos, revestidos para evitar filtraciones. Los muros fueron de 1.50 m de altura y el fondo o ancho variable de máximo de 9 m. Además, el canal fue de un aproximado de 70 m de longitud. Sobre el canal se trasladó la topografía y batimetría del río escalado a 1/60, respetando la semejanza geométrica no distorsionada.

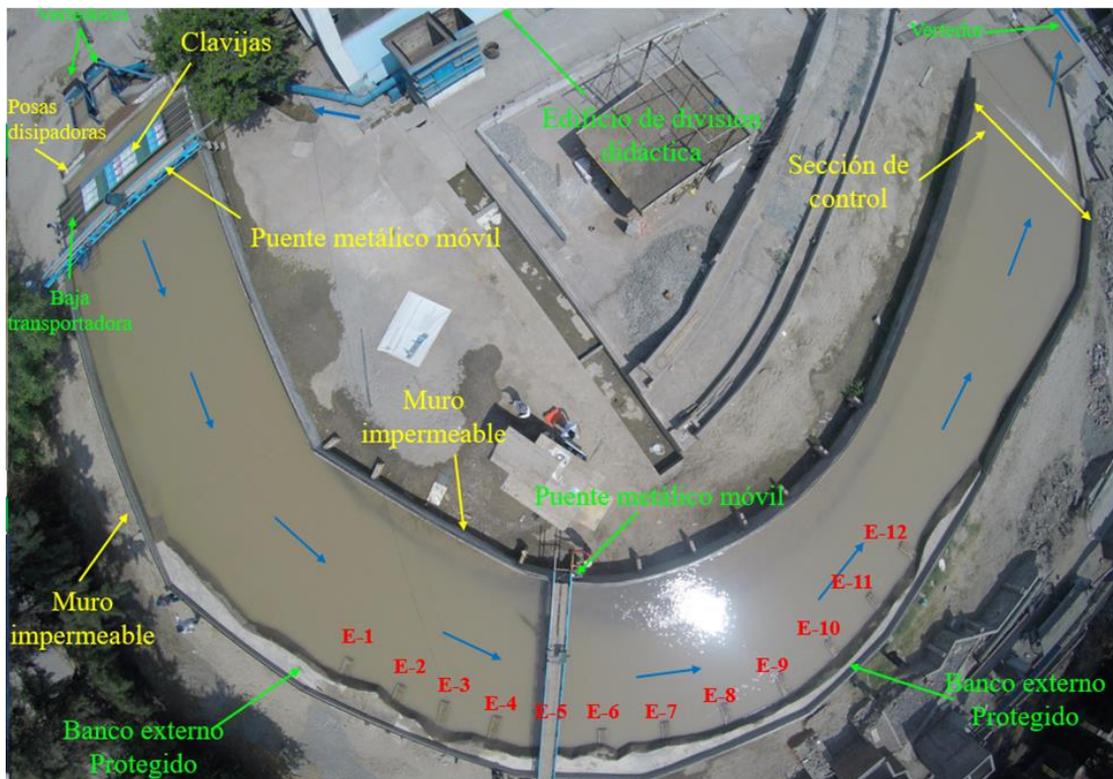


Imagen 12. Estructura principal o canal curvo de lecho arenoso protegido por espigones ELJ.

- Granulometría del material arenoso del lecho

Los datos de granulometría fueron determinados por ODEBRECHT SAC (2012):

Tabla 6. Granulometría del material del lecho del río Madre de Dios - Zona La Pastora

Tamiz	Abertura de Malla (mm)	% parcial Retenido	% Acumulado	
			Retenido	Pasa
1 1/2"	38.100			100.0
1"	25.400	20.0%	20.0%	80.0
3/4"	19.050	9.1%	29.1%	70.9
1/2"	12.700	7.5%	36.6%	63.4
3/8"	9.525	3.5%	40.1%	59.9
1/4"	6.350	3.7%	43.8%	56.2
N° 4	4.760	2.1%	45.9%	54.1
N° 10	2.000	1.8%	47.7%	52.3
N° 20	0.840	0.2%	47.9%	52.1
N° 30	0.590	1.7%	49.6%	50.4
N° 40	0.426	1.6%	51.3%	48.7
N° 60	0.250	23.5%	74.8%	25.2
N° 100	0.149	19.0%	93.8%	6.2
N° 200	0.074	5.7%	99.5%	0.5

Estos datos son representativos de la curva granulométrica muestra D-6, obtenida de la ribera del río Madre de Dios, zona La Pastora. Esta curva indica que el lecho del río está formado principalmente por arenas limosas, clasificados como SM y SP, de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Tabla 7. Granulometría a escala que representa el material del lecho del meandro en estudio.

Abertura de Tamiz		Peso parcial retenido (g)	(%) Material acumulado en tamiz	
Prototipo (pulg.)	Modelo (mm)		Retenido	Que pasa
1 1/2"	0.635		0.00	100.00
1"	0.423	20	0.46	54.34
3/4"	0.318	9.1	0.66	33.56
1/2"	0.211	7.5	0.84	16.44
3/8"	0.154	3.5	0.92	8.45
1/4"	0.106	3.7	1.00	0.00

Para determinar la granulometría del lecho del río a escala para el modelo, se tuvo en cuenta que esta no puede ser muy pequeña porque puede dejar de comportarse como material granular y presentarse fuerzas inter granulares de cohesión. Este fenómeno ocurre cuando $D < 0,1 \text{ mm}$. Por esta razón, se tomó parte de la curva granulométrica del material del lecho del río que cumple con esa condición. Cabe señalar que, se analizaron las granulometrías de diversas canteras, luego de lo cual se obtuvo una arena procedente de la cantera Lurín que en promedio se aproxima a la requerida en el modelo (ODEBRECHT SAC, 2012).

- Espigones ELJ colocados en el modelo

Los espigones empleados en el modelo constaron de capas principales y secundarias de varillas (troncos) que fueron ubicados alternadamente. Las capas principales constaron de 3 o 4 unidades, y las capas secundarias variaron ascendentemente en función al talud.

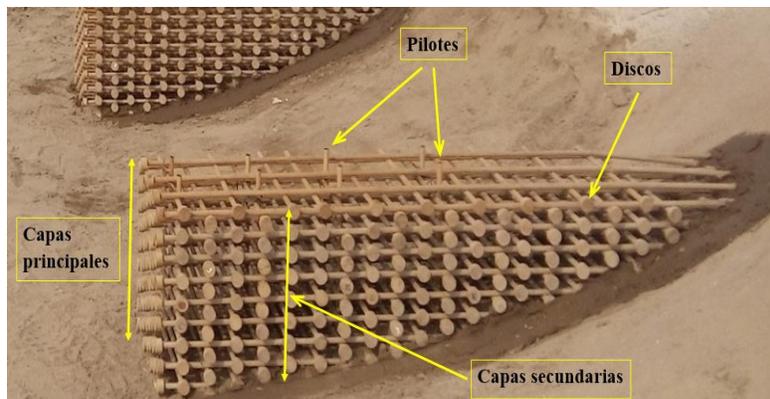


Imagen 13. Vista de la permeabilidad y empotramiento y distribución de los espigones ELJ en el modelo.

El ensamble de los troncos fue tal como se detalla a continuación: Primero se tuvo una capa principal de 4 varillas, sobre de esta capa se ubicaron los troncos secundarios con una cantidad necesaria hasta que llegue completamente al talud, después de esto se colocó otra capa principal de 3 varillas, luego fue otra capa de elementos secundarios, se continuó otra vez con 4 varillas principales y así sucesivamente se repite el proceso hasta alcanzar la altura de diseño. En dos capas continuas no pueden ir la misma ubicación y cantidad de troncos, esto se tuvo que variar continua y alternadamente. Con respecto a las medidas, las varillas de madera tuvieron un diámetro de 1 cm, los discos de madera que simularon las raíces fueron de un diámetro de 2.5 cm y un espesor de 1.25 cm. Las medidas de los espigones variaron, llegando los más grandes a medir hasta casi 1 m de longitud, 45 cm de alto y 33 cm de ancho.

3.8.3. Fin del modelo y canal de retorno

Al final del lecho arenoso del modelo se fijaron ladrillos, empleando sus lados como bases, de manera alternada; con el fin de que los calados no disminuyesen debido a la caída del flujo hacia la primera poza de decantación (imagen 14). Las dos pozas de decantación, localizadas en serie después del modelo, permitieron retener los granos gruesos de sedimentos. Además, en el muro que separa las dos pozas decantadoras fue colocada una malla de acero galvanizado para retener todo el material leñoso (clavijas) arrojado. Después de la segunda poza decantadora se presencia un canal abierto de 1 m x 1 m y que luego de unirse al canal de 0.5 m x 0.5 m que conecta a la poza de calibración, esta pasa a ser un canal cerrado de 1 m x 1 m. Finalmente, el canal de retorno conduce el agua de regreso a la cisterna que alimenta de agua al sistema de bombeo.



Imagen 14. Vista del final del modelo. Las flechas verdes indican la recirculación del flujo.

3.8.4. Estructuras auxiliares

Las estructuras auxiliares nos permitieron manipular y controlar las condiciones de entrada y salida del modelo, y así lograr fenómenos hidrodinámicos similares a prototipo.

a. Sistema de bombeo y reservorio elevado

La alimentación de agua se realizó desde un reservorio elevado, cuya agua fue impulsada mediante un sistema de bombeo desde una cisterna subterránea de 80 m³. El abastecimiento de agua al reservorio elevado rectangular de 27 m³ de capacidad fue impulsada a través de las bombas 1 y 2. La superficie del agua en el reservorio está por encima de 5 m del nivel del suelo

(Imagen 14). Las bombas 3, 4 y 5 impulsaron el agua directamente desde la cisterna hacia los tanques vertedores de metal ubicados al inicio del modelo físico. Todas las electrobombas en teoría deberían impulsar un caudal total aproximado de 740 lt/s, pero esto no sucedió debido a las deficiencias por desgates, averías entre otros efectos negativos que éstas han sufrido con el paso del tiempo. Sin embargo, las electrobombas fueron capaces de cubrir el flujo requerido de 514.28 lt/s para simular las avenidas máximas del meandro en estudio.

El LNH dispone de cuatro electrobombas con las siguientes características:

Bomba 1:

- Serie: L386284
- Caudal: 200 l/s
- Altura: 9 m
- Potencia: 50 HP

Bomba 2:

- Serie: L386285
- Caudal: 200 l/s
- Altura: 9 m
- Potencia: 50 HP

Bomba 3:

- Serie: 122764M
- Caudal: 200 l/s
- Altura: 10 m
- Potencia: 50 HP

Bomba 4:

- Serie: 122831M
- Caudal: 80 l/s
- Altura: 10 m
- Potencia: 20 HP

Bomba 5:

- Serie: 117013M
- Caudal: 60 l/s

b. Tuberías de conducción

El reservorio elevado ubicado en el exterior del edificio de didáctica alimentó de agua a los tanques vertedores mediante una tubería metálica de color azul de 356 mm (14”) de diámetro. La bomba 3 impulsó el agua directamente desde la cisterna por medio de una tubería de PVC de 356 mm (14”) de diámetro; del mismo modo, las bombas 4 y 5 alimentaron los tanques por medio de una tubería metálica de color azul y de PVC de 153 mm (6”) de diámetro cada una respectivamente. Los flujos de cada tubería se manipularon y controlaron mediante válvulas de compuerta.

c. Pozas de apoyo para la carga de agua

El modelo necesitó de gran cantidad de agua para lograr su equilibrio en la recirculación, y así se evitó alteraciones del caudal en el modelo a causa de lo siguiente: Al iniciar el bombeo parte del agua se mantuvo en el reservorio elevado, tuberías, tanques vertedores de metal, poza de

disipación y transición, pozas de decantación, canal de retorno, y sobre todo en la saturación total del lecho arenoso del canal experimental curvo. Por otro lado, se tuvo las pérdidas de agua a lo largo de la recirculación (detectables), en las uniones de la base de concreto con muros cubiertos por lecho arenoso (no detectables) entre otros. Por tal motivo, el volumen de agua de 80 m³ que posee la cisterna subterránea no fue suficiente frente a estos inconvenientes, así que se tuvo la necesidad de usar la carga de agua de las dos pozas siguientes:

- Poza calibradora de correntómetros

La poza ocupa todo un edificio ubicado en la parte norte-oeste del modelo, cuya función es específicamente para otros tipos de ensayos. Las dimensiones de esta poza son de 3 m de ancho, 5 de profundidad y 60 m de largo; por consiguiente, su nivel de agua aporta bastante a mantener el equilibrio estable del nivel de agua, requerido por el sistema de bombeo, en la cisterna. La poza se conecta a la recirculación a través de un canal de 0.5 m x 0.5 m.

- Poza de suministro a instrumentos didácticos

El volumen de agua de esta poza es usado para el suministro de instrumentos de laboratorio con fines didácticos, pero en este caso se emplea su volumen para ayudar a mantener el nivel de agua estable de la cisterna de bombeo. Esta poza está ubicada por debajo del edificio de didáctica de la misma manera que la cisterna, pero al extremo opuesto dentro del edificio. Las medidas de la poza son 2.5 m de ancho, 4 de profundidad y 19 m de largo. El agua de la poza se bombea a un reservorio elevado ubicado dentro del edificio y esta envía el agua hacia la cisterna donde operan las 5 electrobombas ya descritas. Además de estas dos pozas, antes de iniciar los ensayos se abren todos los grifos de agua presentes en el canal de retorno y pozas.

3.9. Equipos y materiales

a. Para el replanteo topográfico y colocación de espigones ELJ

Antes de realizar cada ensayo experimental, el lecho alterado del ensayo anterior fue llevado a condiciones iniciales de batimetría, mediante un replanteo topográfico de gran precisión. De la misma forma para ubicar los espigones se acondicionó la posición de cada espigón a las cotas y ángulos establecidos en el diseño.

Para realizar el replanteo del lecho se hizo uso de dos niveles de ingeniero (equialtimetros), miras topográficas, nivel de mano tubular, martillos y badilejos.

ESPECIFICACIONES	PENTAX MODELO AFL-321	LEICA MODELO NA-820
Aumentos	32x	24x
Factor de multiplicación	100	100
Precisión de la reflexión	± 0.3"	
Desviación estandar*	± 0.8 mm	± 0.8 mm
(1km niveladas de doble recorrido)**	± 0.4 mm	± 0.4 mm

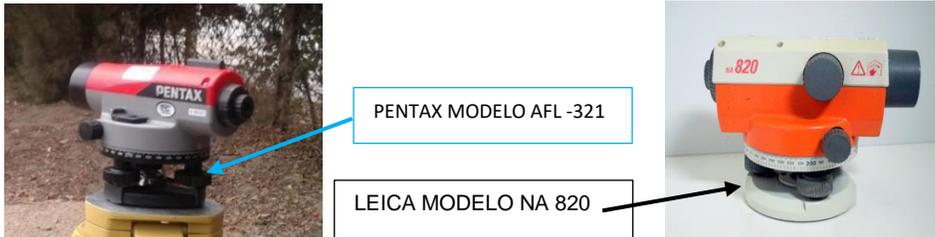


Imagen 15. Especificaciones técnicas de los niveles de ingeniero.

Así mismo, un pequeño carro deslizante junto a una regla graduada de aluminio de 12 metros fue construido y colocado sobre los muros laterales para la ubicación de cotas en cada sección. Para la regla, los materiales usados fueron 2 perfiles de aluminio 2" x 3" de sección y 6 m de longitud cada una y una cinta métrica de 20 m de longitud. El carro deslizante fue de madera, cuyas dimensiones fueron de 20cm x 10cm x 14cm y lleva consigo una varilla de aluminio de ½" de diámetro y 1.4 m de longitud.



Imagen 16. Regla, carro deslizante y varilla metálica vertical.

Para la ubicación de los espigones en el modelo físico se hizo uso de una estación total de la marca TOPCOM, un prisma, nivel de mano tubular, martillo y badilejo.

b. Para medición de velocidades de flujo

Las velocidades del flujo fueron registradas por un Vectrino Profiler de la marca holandesa Nortek, de nombre Acoustic Doppler velocimetry (ADV). El ADV es un equipo de alta precisión que puede medir velocidades en tres direcciones. Adicionalmente, este equipo mide la

temperatura del fluido con rangos que van desde -4°C a 40°C y puede hacer una detección de distancia al fondo del lecho mostrando datos de profundidades en tiempo real.

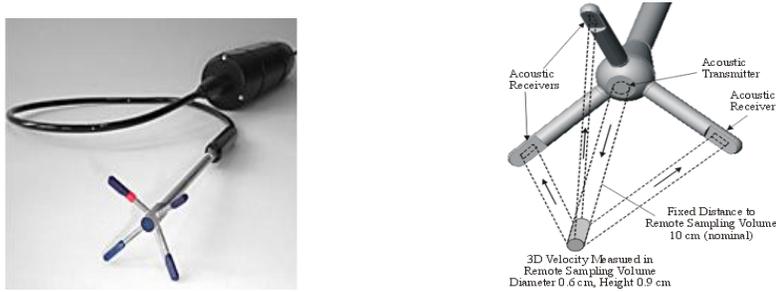


Imagen 17. Imagen referencial del Vectrino Profiler. Fuente: Folleto de Nortek AS.

Para su uso el ADV debe estar conectado a una computadora personal y a una fuente de energía constante. Mediante su software se puede ajustar la tasa y cantidad de datos recolectados, visualizar los datos de muestreo en tiempo real y exportar datos en formatos mat y ASCII para un posterior post procesamiento en Matlab y Excel.



Imagen 18. Laptop conectada ADV mediante un cable azul de 30 metros.

Además, el ADV necesitó de un soporte metálico móvil que se deslizará sobre un puente metálico de 10 m de longitud, a fin de realizar mediciones correspondientes sobre los puntos asignados en secciones distribuidas a lo largo de la curva del canal ver imagen siguiente:



Imagen 19. Soporte Metálico móvil del ADV construido por el LNH.

c. Para medición de caudales y tirantes

Los equipos utilizados para cuantificar los caudales fueron dos limnímetros que se colocaron del lado de los vertedores rectangulares.



Imagen 20. Limnómetro para la medición de caudales en el vertedero izquierdo.

Para hacer las mediciones de tirantes se usó el equaltímetro antes mencionado de la marca Leica Modelo NA 820, una mira topográfica y un nivel de mano tubular.

d. Para grabación de ensayos

Las tomas fotográficas y filmaciones aéreas que nos permitan visualizar el transporte de clavijas y patrones de flujo, una cámara 4k Gopro Hero 4 montado en un dron de la marca 3DR-Solo.



Imagen 21. Cámara filmadora Gopro Hero 4 montada en un dron 3DR-Solo.

e. Para escaneo del lecho alterado

El levantamiento del lecho alterado después de cada ensayo se realizó con un Escáner Laser que emplea tecnología 3D. Este equipo permite capturar la superficie del lecho en una fotografía tridimensional basada en una nube de millones de puntos, que son exportados a formato de modelo digital de terreno. El trabajo en campo del Escáner Laser consistió en ubicar puntos de control en lugares específicos fuera del lecho y así armar un conjunto de estaciones. Usando las estaciones se hace un barrido con el escáner.



Imagen 22. Trabajos de escaneo en el modelo usando laser modelo Focus3D X 330.

3.10. Estimación de la cantidad y dimensionamiento de leños en arrastre

Cabe precisar que, el material leñoso simulado en este estudio fue solo raíces gruesas y troncos (leños con longitud > 1 m. y diámetro > 0.1 m, según Braudrick et al. 1997). Estos troncos y raíces tuvieron forma cilíndrica simétrica y fueron arrojados poco después de iniciado el caudal que representa máximas avenidas. Para el estudio se eligió solo este material leñoso grueso debido a la dificultad de simular y representar leños de menores dimensiones a escala 1/60. Otro motivo, de la elección de este material grueso fue se cuenta con estudios acerca de la dinámica de troncos en cauces, que se los detalló anteriormente.

Para estimar la cantidad de los leños gruesos, que arrastra el flujo del meandro en estudio, se consideró solo la madera proveniente de las llanuras Amazónicas. La madera proveniente de las montañas no se tomó en cuenta por razones que son explicados más adelante. El método de cálculo se explica secuencialmente a continuación:

3.10.1. Volumen de troncos que aportan las áreas inundables

Estas áreas se encuentran adyacentes a los ríos, donde principalmente el material leñoso proviene de la tala ilegal y árboles caídos por su longevidad.

a. Áreas inundables (A_i)

Durante la época de crecientes, los ríos amazónicos suben de nivel e inundan extensas áreas de bosques a ambas orillas quedando el bosque inundado durante varios meses. Por ejemplo, el nivel de agua del río Amazonas puede aumentar aproximadamente hasta alrededor de 13 metros de altura, esta estimación es notoria gracias a los rastros que el nivel de agua deja en los tallos de

los árboles. Bajo este criterio y de acuerdo a la tabla 1 se eligió el bosque aluvial inundable (BAi).

El punto emisor de la subcuenca en estudio fue tomado a partir de la zona La Pastora, obteniéndose un área de es de 56 553 km² (Odebrecht SAC., 2012). Por otro lado, el área del departamento Madre de Dios es de 85 874 km², de donde de 166 923 ha es área inundable (Kometter, 2003). Como es notorio se cuenta con datos del área de inundación del departamento de Madre de Dios, pero no con los de la subcuenca hasta la zona La Pastora – Puerto Maldonado. Por lo que, para estimar el área inundable de la subcuenca en estudio se creyó conveniente aplicar una regla de tres simple. Como resultado se tiene un área inundable (A_i) de **109 928 ha** hasta la zona La Pastora.

b. Densidad de troncos sobre las áreas inundables (ρ_{ti})

La densidad de los troncos en las áreas inundables es referida al volumen de madera en **m³ por hectárea**. Se tomó únicamente en cuenta, el volumen promedio de la necromasa recostado sobre el suelo del tipo de bosque de bajío o inundable. Pues, sólo es necesario tomar la madera muerta en estas condiciones, debido a que no ofrecen mucha resistencia al ser arrastrados cuando el nivel de agua baja después de las inundaciones. Este arrastre no ocurre con la madera muerta en pie (ρ_{mpi}) o la madera viva (árboles), porque tienen sus raíces ancladas bajo el suelo. Así que, de la tabla 2 que representa a 11 sitios del departamento Madre de Dios se extrajo la información de los bosques en bajío para la estimación del volumen de troncos recostados sobre las áreas de inundación. Cabe indicar que, la madera en pie ya sea muerta (necromasa) o viva (AGB) no es arrastrada por las corrientes, por lo que, su volumen por hectárea es igual a cero. Como en este caso sólo es arrastrada la madera muerta recostada sobre el suelo se tiene:

$$\rho_{ti} = \rho_{mi} + \rho_{vi}$$

$$\rho_{ti} = (\rho_{mpi} + \rho_{msi}) + \rho_{tvi} \quad \dots (51)$$

Donde:

- ρ_{vi} : Densidad de la madera gruesa viva o volumen de árboles por hectárea.
- ρ_{mi} : Densidad de la madera gruesa muerta o volumen de troncos por hectárea.
- ρ_{mpi} : Densidad de la madera gruesa muerta en pie.
- ρ_{msi} : Densidad de la madera gruesa muerta sobre el suelo.

Reemplazando valores en la ecuación (51) se tiene:

$$\rho_{ti} = 47.28 \text{ m}^3/\text{ha}$$

c. Volumen de troncos que aportan las áreas inundadas

El volumen de troncos que aportan estas zonas se halló multiplicando el área de inundación en las llanuras por la densidad de madera caída o recostada sobre estas áreas (ρ_{ti}).

$$V_{ti} = A_i \rho_{ti} \quad \dots (52)$$

Reemplazando los datos anteriormente encontrados en la ecuación (85) se tiene:

$$V_{ti} = 5197395.84 \text{ m}^3/\text{año}$$

3.10.2. Volumen de troncos que aportan las áreas elevadas.

Según lo clasificado por Kometter (2003) las áreas más cercanas a las orillas son de bosques de terraza baja (BTb) seguido de los Bosques de Terraza Alta (BTa); por tanto, se puede deducir que estos bosques son los que aportarían la mayor cantidad de restos de vegetación.

a. Áreas elevadas adyacentes a los ríos (A_e)

Son las superficies de los bancos que no logran ser alcanzadas por los niveles de agua durante las crecidas; pero estas superficies cubiertas con frondosos bosques a lo largo de las riberas son destruidas cuando colapsan los bancos debido a las socavaciones en sus bases. Luego todo el material leñoso es arrastrado aguas abajo por las corrientes de los cauces, donde tendrán un largo recorrido hasta ser atascado en una ribera o estructura hidráulica. Este fenómeno ocurre simultáneamente con la migración lateral, que es el resultado de la erosión del banco externo combinado con la sedimentación cerca del banco interno.

- **Cálculo de la erosión en la cuenca del río madre de dios mediante imágenes satelitales**

En primer lugar, se trabajó con las cartas nacionales del IGN necesarias para poder delimitar la cuenca hidrográfica. Además, se utilizaron imágenes satelitales provenientes de la constelación de satélites Landsat descargadas del portal web EarthExplorer de la USGS que comprendan el área analizada. De las imágenes satelitales descargadas una de ellas pertenece al año 2000 (Landsat 7) y otra al año 2015 (Landsat 8). El objetivo de su uso es determinar las áreas erosionadas debido a las fuertes corrientes del río entre estos años.

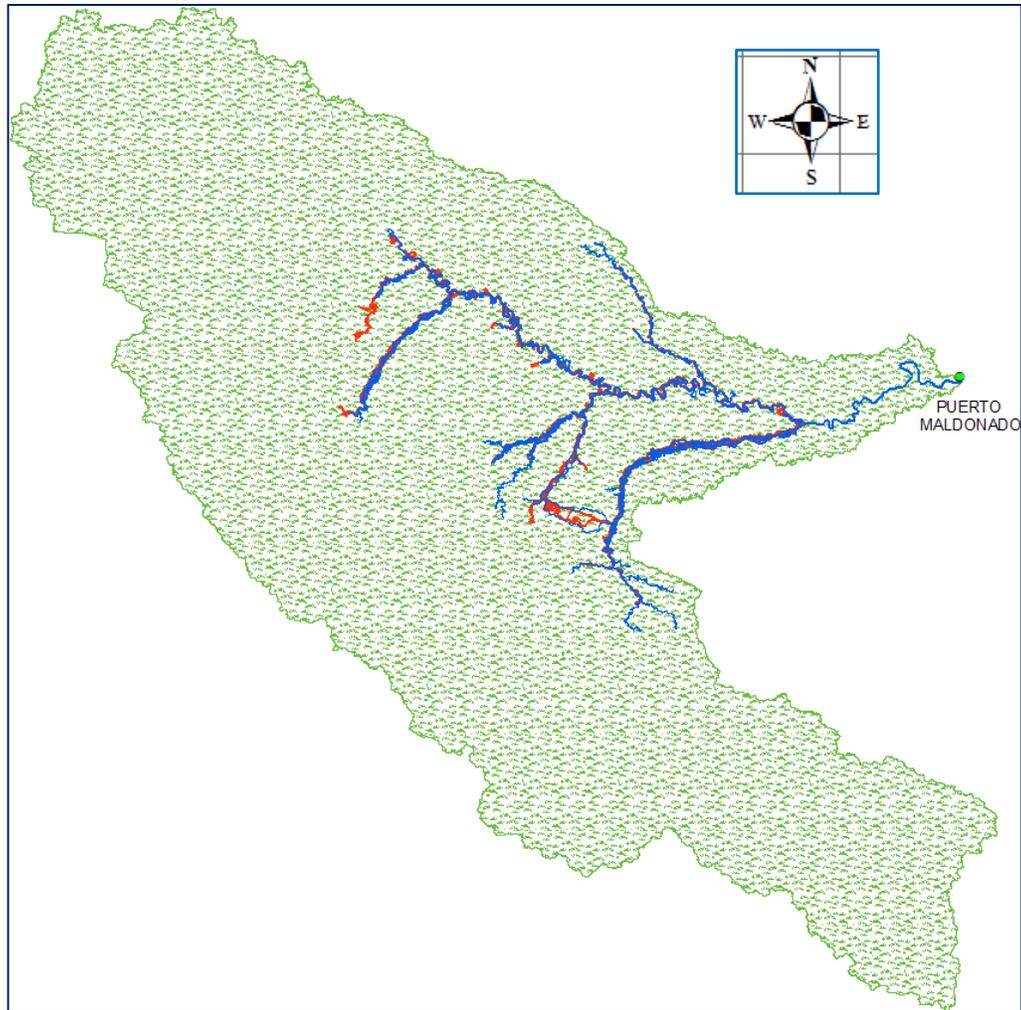


Figura 25. Delimitación de ríos en la cuenca para determinar la erosión del año 2000 (líneas de color rojo) al 2015 (líneas de color azul).

Se utilizaron imágenes satelitales Landsat de los años 2000 y 2015 para poder conocer las áreas erosionadas analizando como se ha desplazado los ríos entre estos años. Las imágenes se descargaron de la web EarthExplorer y tienen una resolución espacial de 30x30m por pixel. La del año 2000 pertenece al satélite Landsat 7 y la del 2015 pertenece al satélite Landsat 8. Para el análisis de las imágenes satelitales se utilizó el programa ArcGIS. Se realizaron tres etapas de trabajo que fueron la composición de bandas, delimitación de los márgenes de los ríos y determinación de las áreas erosionadas.

Los cauces delimitados en la figura 25 fueron con el fin de hallar el volumen de troncos de las zonas erosionadas. Por lo que, en el presente trabajo se tomaron áreas aledañas a los ríos Madre de Dios y ríos tributarios de considerable magnitud (imagen 23). Los riachuelos fueron descartados por ser estrechos y presentar baja migración en sus cauces, en contraste, a los ríos de

mayor magnitud. Según la información bibliográfica, la dinámica de leños en pequeños ríos depende de la relación del ancho canal y el largo de los troncos; por ello, los leños de los riachuelos no fueron considerados en este estudio. No obstante, el aporte de leños de estos riachuelos no sería despreciable y debería considerarse en estudios más detallados.



Imagen 23. Cauce del río Madre de Dios (líneas roja y violeta) y afluentes principales (líneas amarillas y verdes) de la subcuenca hasta la zona La Pastora-Puerto Maldonado.

Para la estimación de estas áreas se tomaron los siguientes criterios tales como: áreas de tramos de llanura amazónica con densa vegetación, y algunos tramos de baja montaña que sean visiblemente boscosos. Descartamos los leños de ríos de alta montaña porque presentan bosques poco densos, además, tardan en llegar a las zonas de llanura debido a que van atascándose en los estrechos cauces a lo largo de su recorrido.

- **Áreas erosionadas**

Con los márgenes del río ya delimitados tanto para el año 2000 como para el 2015, se prosiguió a analizar cuáles fueron las áreas erosionadas, superponiendo ambos trazos en el programa ArcGIS y diferenciándolos. Es decir, usando las herramientas del programa ArcGIS y estimando el desplazamiento de los ríos entre estos años se obtuvieron las áreas erosionadas.

- Áreas erosionadas desde el sector La Pastora hasta la boca del río Inambari

Este tramo activo de 107 km se tomó como muestra patrón (figura 26) a través de imágenes satelitales landsat TM en formato digital de los años 2000 y 2015. Para determinar estas áreas se

empleó el programa CIVILCAD 2014 y ARGIS 2015 bajo una resolución de 20 pikceles. Se pudo observar, como el cauce cambia sus posiciones y formas a consecuencia de los procesos fluviales y fuerzas hidrodinámicas que ejerce el flujo sobre los lechos a lo largo del tiempo.

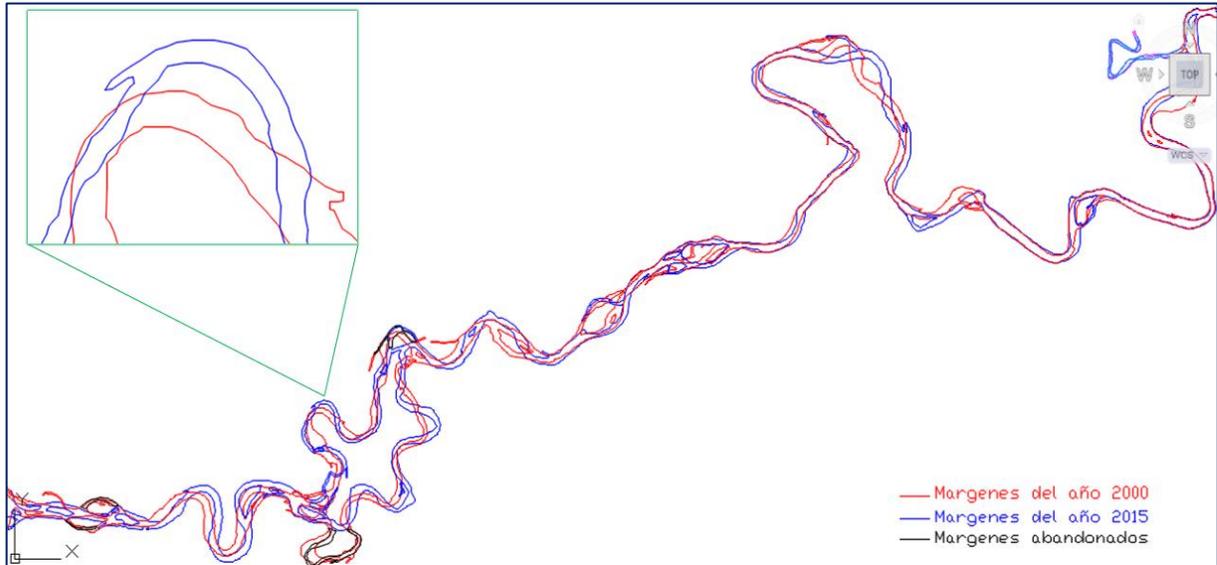


Figura 26. Márgenes del cauce principal del río Madre de Dios desde La Pastora-Puerto Maldonado hasta la boca del río Inambari para los años 2000 – 2015.

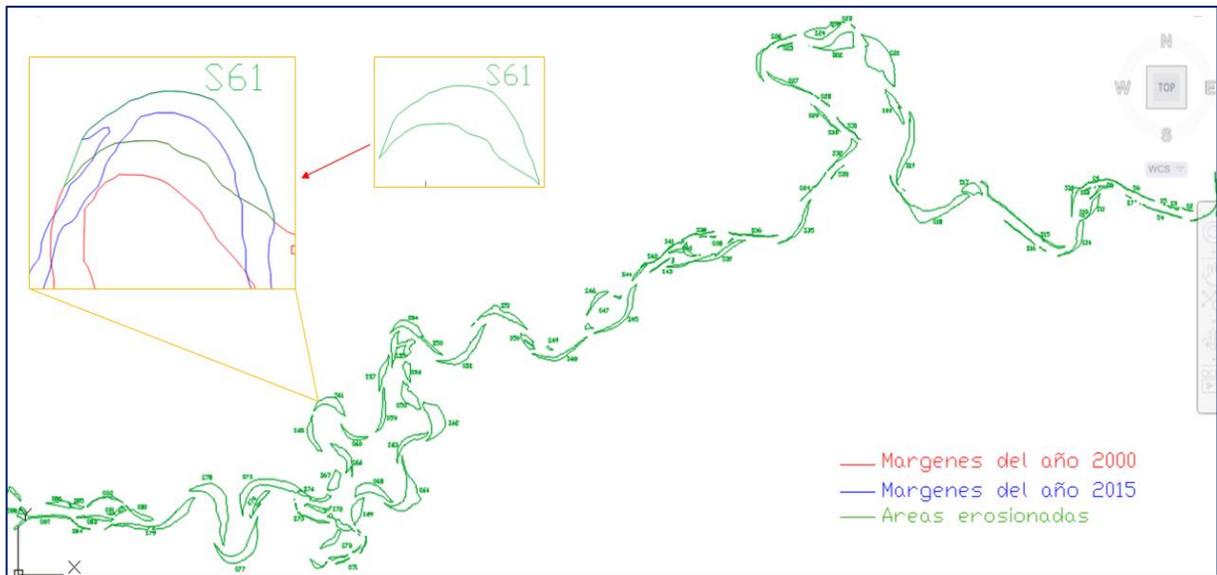


Figura 27. Áreas erosionadas del tramo activo desde La Pastora-Puerto Maldonado hasta la boca del río Inambari durante los años 2000 – 2015.

Luego como resultado a partir de las áreas erosionadas durante 15 años (2000 – 2015) del tramo de 107 km se obtuvieron los siguientes datos:

TOTAL:	27732621.11	m2
Tiempo:	15.00	años
Áreas socav.	184.88	has/año

- Áreas erosionadas en el río Madre de Dios y principales tributarios aguas arriba de la boca del río Inambari.

Se completa el resto de las áreas erosionadas de la subcuenca, siguiendo el mismo criterio desarrollado anteriormente. En este segundo tramo sólo se determina las áreas elevadas mediante el trazo de polígonos.

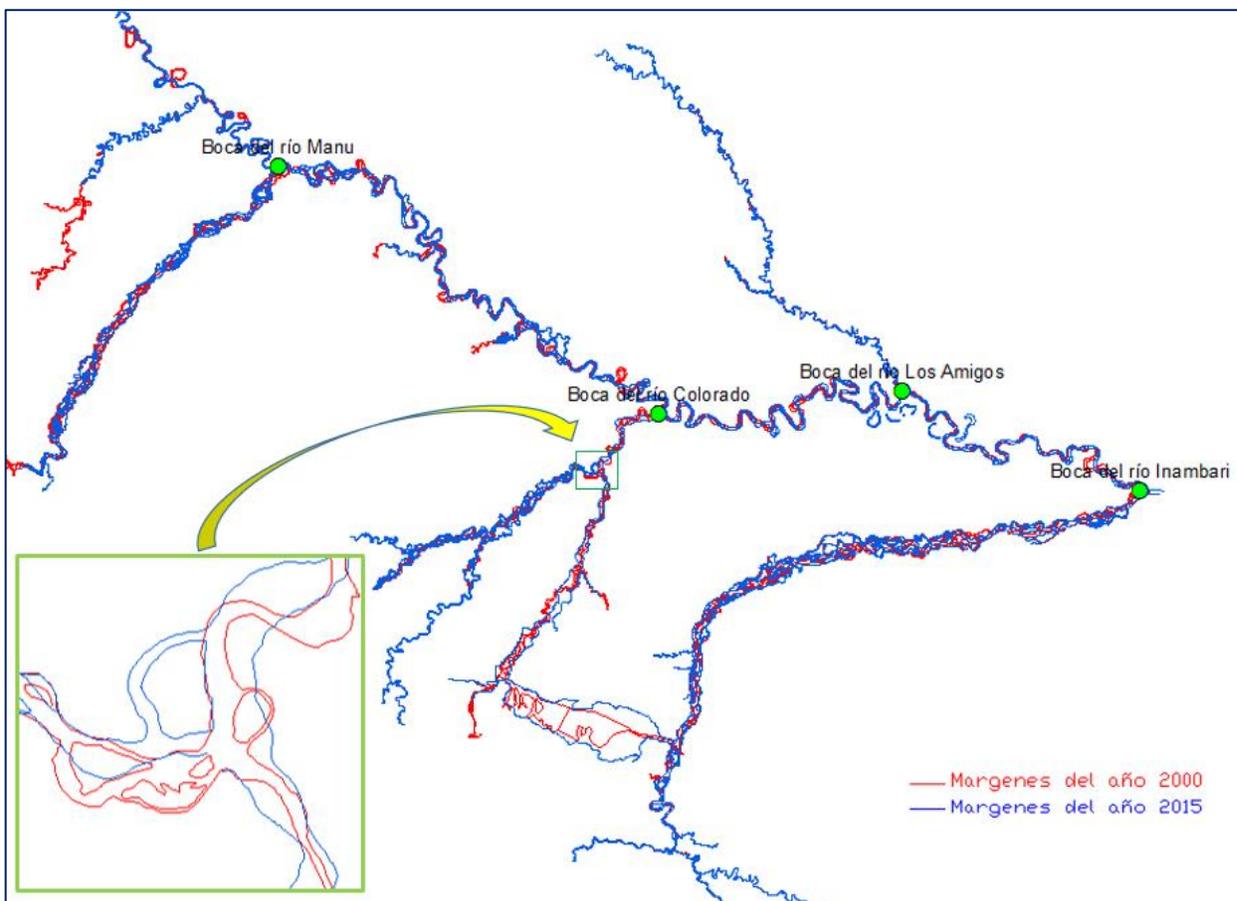


Figura 28. Márgenes de los cauces del río Madre de Dios y principales tributarios para el año 2000 y 2015. Tramo activo desde la boca del río Inambari hacia aguas arriba en ArcMap 10.3.

Como se nota en el gráfico, los principales tributarios considerados para el suministro de troncos fueron el río Inambari, Los Amigos, Colorado y Manú.

La cuantificación de las áreas erosionadas se analizó mediante la movilización de las márgenes de los ríos durante los 15 años establecidos. Si los trazos rojos (riberas del año 2000) se alejan

del eje del río y/o se desplazan hacia el trazo azul (riberas del año 2015) ocurre erosión; y si los trazos rojos se acercan hacia su eje ocurre sedimentación. En este trabajo sólo se necesitó de las áreas erosionadas, el cual, han sido identificados mediante el trazado de polígonos sombreados de color verde claro, tal como se pueden observar en las figuras 29 y 30. Es importante mencionar que, los limites o bordes de las áreas verdes corresponden a los trazos de color rojo y azul. Los tramos en donde sólo se presencian un solo trazo ya sea de color rojo o azul no se tomaron en cuenta, por motivos que, significan alta montaña y/o baja forestación como ya se explicó anteriormente.

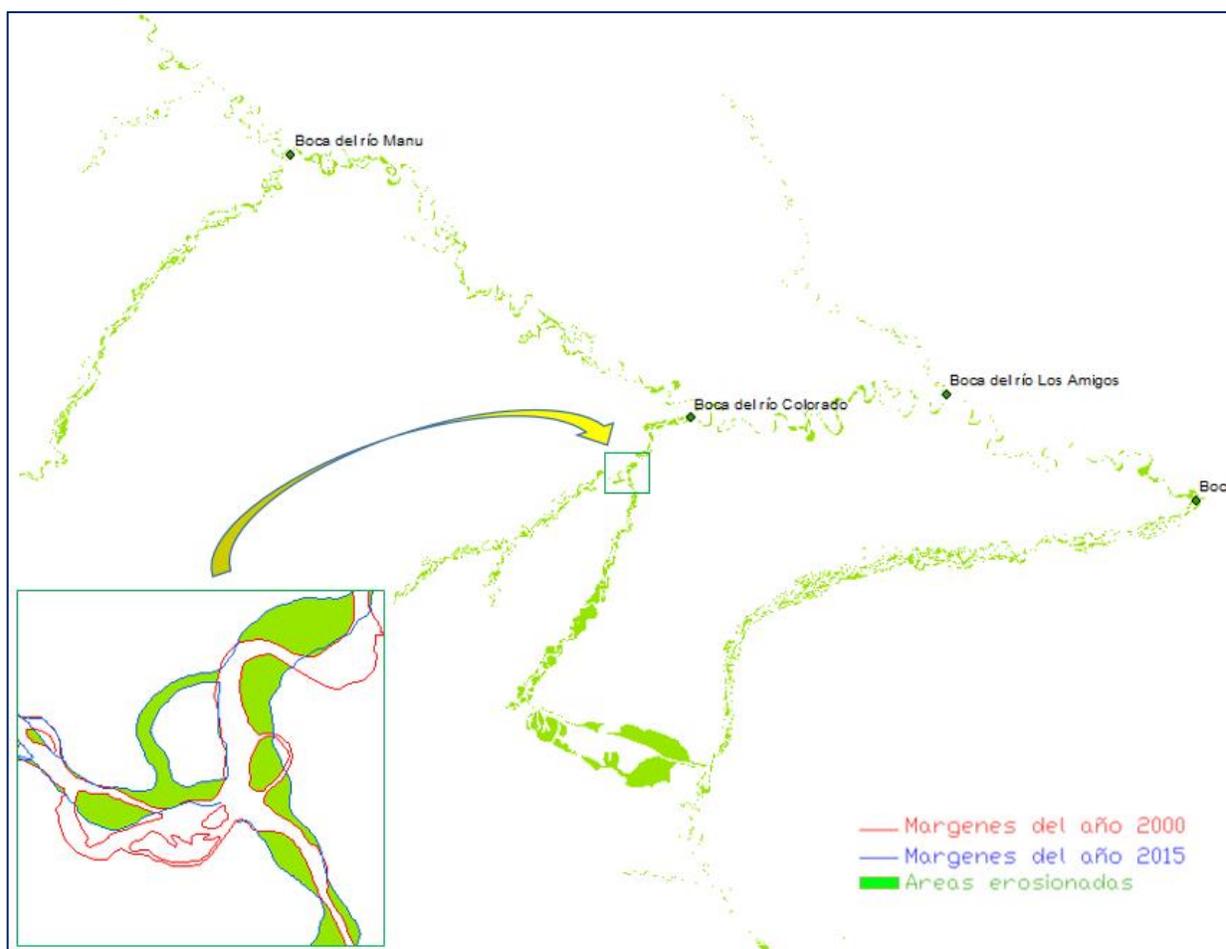


Figura 29. Áreas erosionadas por los ríos aguas arriba de la boca del río Inambari durante el transcurso de los años 2000 – 2015.

El resultado de la suma de las áreas poligonales (áreas de color verde) aguas arriba de la boca del río Inambari durante los 15 años, equivale a 1756.68 ha/año

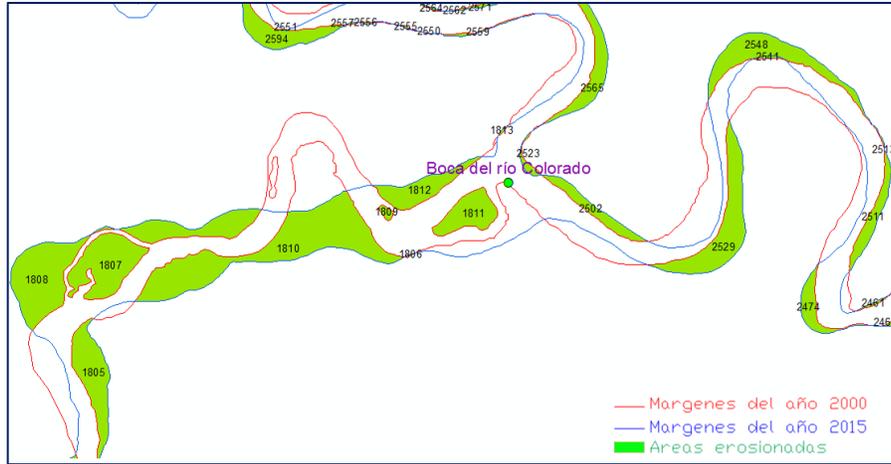


Figura 30. Numeración de las áreas erosionadas próximas a la boca del río Colorado.

Finalmente, el área total erosionada (A_e) es la suma de las áreas aguas abajo desde la boca del río Inambari hasta la zona La Pastora en Puerto Maldonado más las áreas aguas arriba a partir de la boca del río Inambari.

$$A_e = 1941.56 \text{ ha/año}$$

b. Densidad de los troncos en las áreas elevadas (ρ_{te})

La densidad de este material leñoso se determinó tomando tanto la madera gruesa viva como la muerta; debido que, al desplomarse los bancos también ocurrirá lo mismo con todo el material que se encuentra en la superficie. Por lo que, para cuantificar la madera leñosa se tomó tanto la madera en pie, así como la madera recostada sobre el suelo. De la tabla 2 se toman datos necesarios de los 11 sitios de altura del departamento de Madre de Dios, luego se tiene:

$$\rho_{te} = \rho_{me} + \rho_{ve}$$

$$\rho_{te} = (\rho_{mpe} + \rho_{mse}) + \rho_{tve} \quad \dots (53)$$

Donde:

- ρ_{ve} : Densidad de la madera gruesa viva en volumen de troncos por hectárea.
- ρ_{me} : Densidad de la madera gruesa muerta en volumen de troncos por hectárea.
- ρ_{mpe} : Densidad de la madera gruesa muerta en pie.
- ρ_{mse} : Densidad de la madera gruesa muerta sobre el suelo.

No se tomó AGB por estar en Mg/ha, pero según Chao et al. (2009) en los bosques de la Amazonía la necromasa constituye casi el 13% de la biomasa gruesa aérea, luego tenemos:

$$\rho_{me} = 13\% \rho_{ve} \quad \rightarrow \quad \rho_{ve} = \frac{100}{13} \rho_{me} = \frac{100}{13} (\rho_{mpe} + \rho_{mse}) \quad \dots (54)$$

De la tabla 2 se tomó el volumen promedio de necromasa de pie y sobre el suelo del tipo de bosque de altura, luego:

$$\rho_{mpe} + \rho_{mse} = 83.28 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Reemplazando en la ecuación (54) se tiene:

$$\rho_{ve} = 640.64 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Finalmente, en la ecuación (53) tenemos:

$$\rho_{te} = 723.92 \text{ m}^3/\text{ha}$$

c. Volumen de troncos que aportan las áreas elevadas

El volumen de troncos que aportan las áreas elevadas se determinó multiplicando tales áreas por la cantidad de madera sobre las zonas sometidas a socavación y erosión.

$$V_{te} = A_e \rho_{te} \quad \dots (55)$$

Reemplazando los datos encontrados A_e y ρ_{te} se tiene:

$$V_{te} = 1405545.58 \text{ m}^3/\text{año}$$

3.10.3. Caudal de troncos (Q_t)

“Es muy difícil determinar con alguna precisión la cantidad de palizada que transportan los ríos, pues es tan aleatoria y tantas las variantes que ocasionan la presencia de palizadas y restos de vegetales en los ríos, que ésta es difícil de cuantificar. A simple vista se podría decir que transportan millones de toneladas de palos y troncos, ya que alfombran la superficie de los ríos por varias horas” (MTC, 2005). Sólo se contó con videos acerca de ríos vecinos que nos servirá como medio de observación para hacer una semejanza de cantidad aproximada de troncos.

$$Q_t = \frac{V_t}{T} \quad \dots (56)$$

Donde:

V_t : Volumen total de troncos en m^3 .

T : Tiempo que tarda en transitar los troncos en días.

El volumen total de troncos es la cantidad de madera que aporta las áreas inundadas más el aporte de troncos provenientes de las áreas erosionadas por las fuertes corrientes durante los

meses de precipitaciones; luego se obtuvo, una cantidad aproximada de troncos que transportan los ríos en algunos días después de haber iniciado las avenidas máximas.

$$V_t = V_{ti} + V_{te} = 6602941.42 \text{ m}^3$$

Se carece de datos con respecto al tiempo sobre el transporte de troncos por esta zona, pero se consideró lo narrado por profesionales que sostienen: El arrastre de troncos se da entre noviembre o diciembre y que la mayoría son transportados en los primeros días de iniciar los incrementos de caudales en los ríos. Por otro lado, hay observaciones en el río Amazonas que durante varios días no dejan de pasar grandes cantidades de palizadas y restos de vegetales (MTC, 2005). De acuerdo a lo mencionado y apoyándose en algunos videos e imágenes del arrastre de desechos leñosos en ríos amazónicos se asumió para “T” un valor de 10 días, como el tiempo que tarda en transitar estos desechos a lo largo del punto en estudio, luego:

$$Q_t = 7.642 \text{ m}^3/\text{seg}$$

3.10.4. Dimensionamiento de troncos y raíces

Los troncos y raíces se acoplaron a formas circulares simples y simétricas para la simulación, por la razón de que se cuenta con estudios ya elaborados sobre la dinámica de troncos en canales experimentales de laboratorio realizados por C. Braudrick and Grant (2000) entre otros.

- **Dimensiones y volumen de los troncos**

Primero ante todo se tuvo en cuenta, los diámetros y longitudes de clavijas de madera disponibles en el mercado que representarán los troncos a escala en el modelo. Además, de los rangos según información bibliográfica de Chao et al. (2009) quienes encontraron diámetros en el rango de 0.001 a 1.10 metros, cuya cantidad de troncos por hectáreas es inversamente proporcional al diámetro. El número varía desde 100 troncos con diámetro 0.10 metros a menor número de troncos con diámetro de 1.10 metros.

Por otro lado, se tuvo en cuenta el caudal de troncos ($7.642 \text{ m}^3/\text{s}$), para determinar un cierto número de clavijas (troncos escalados) que puedan ser colocados a lo ancho de la faja y arrojados al canal experimental en un tiempo dado. Para las medidas de los troncos se manipularon diferentes longitudes y diámetros comerciales de madera disponibles en el mercado.

Luego se eligieron las medidas que cumplieron dentro del rango de troncos hallados en la Amazonía, concluyéndose en el siguiente cuadro de información:

Tabla 8. Dimensiones y número de troncos con su respectivo volumen.

Cálculo de los Troncos						
Tipo	Long. (m)	Diámet. (m)	Area (m2)	Vol unit (m3)	# troncos	Vol # tronc.
1	7.02	0.54	0.229	1.608	3	4.82
2	6.24	0.48	0.181	1.129	8	9.03
3	4.68	0.36	0.102	0.476	30	14.29
4	3.90	0.30	0.071	0.276	60	16.54
5	3.12	0.24	0.045	0.141	100	14.11
			suma:	3.630	201.000	58.803

Nota: De aquí en adelante la suma de 201 troncos equivalen a una porción, ya que representan la cantidad de madera que fueron lanzados en un determinado tiempo al canal.

El número de troncos se estimó en base a que los troncos de menor diámetro son los más abundantes, siendo esto inversamente para los de mayor diámetro. Las dimensiones de los troncos se eligieron sólo con la condición de que permanezcan a rangos indicados, ya que no se encontró ningún estudio que pueda afirmar medidas precisas de troncos arrastrados por un caudal dado en vías fluviales. Para la conformidad de esto, los datos de la información bibliográfica guardan coherencia y relación con videos observados de ríos de llanura en la Amazonía y del continente asiático, además de experiencias vividas en algunos ríos amazónicos visitados por el mismo tesista.

De los resultados de la tabla 8 se tiene:

A partir de los 201 troncos, cuyo volumen ($V_{porción}$) es de 58.803 m³, se estimó el tiempo de tránsito de estos troncos a través de una determinada sección del río Madre de Dios, exactamente en el meandro La Pastora.

$$t_p = \frac{V_{porción}}{Q_t} \rightarrow t_p = 7.694 \text{ seg}$$

Es importante mencionar que, fue necesario manipular “ t_p ” en la hoja Excel conjuntamente con el cuadro de cálculos de los troncos (tabla 8) mediante la siguiente ecuación que representa el tiempo a escala para el modelo.

$$t_m = t_p \sqrt{e_1} \rightarrow t_m = 0.993 \approx 1 \text{ seg}$$

Fue recomendable que “ t_m ” fuese un numero entero. En este caso la razón es: con el tiempo de 1 segundo hubo mayor facilidad de arrojar los troncos a escala 1/60 (clavijas) al canal; es decir, fue más fácil para las personas quienes manipularon el regulador de la faja trasportadora contabilizar el tiempo escalado de 1 segundo. Las razones se explican más adelante.

Para comprobar la precisión de cálculos se necesitó conocer el número de veces que se deben arrojar las porciones, de 58.803 m³, mediante lo siguiente:

$$\# \text{ veces} = \frac{V_t}{V_{\text{porción}}} = 112290$$

Según el resultado es bastante obvio que fue imposible lanzar la inmensa cantidad de porciones al canal experimental, en definitiva, se tuvo que tomar un pequeño porcentaje del total para desarrollar la simulación.

En la tabla 9, las columnas que representan la cantidad de troncos (# troncos) de cada tipo y el volumen correspondiente (vol # tronc.) son multiplicados por las 112290 porciones (# veces); a fin de estimar el volumen total de troncos que son arrastrados por el meandro La Pastora.

Tabla 9. Volumen total anual de troncos que arrastran las corrientes en el meandro.

Tipo	# troncos	Vol # tronc.	total # troncos	Vol total # tronc.
1	3	4.82	336870.28	541598.20
2	8	9.03	898320.75	1014351.27
3	30	14.29	3368702.83	1604735.42
4	60	16.54	6737405.66	1857332.66
5	100	14.11	11229009.43	1584923.87
suma	201.000	58.803	22570308.95	6602941.42

En este cuadro se puede observar que cumple y coincide los cálculos de la suma del volumen total de troncos (vol total # tronc.) con la cantidad de V_t estimada anteriormente. Se necesitó siempre relacionar los cálculos entre sí con forme se avanzó cada paso.

- **Dimensiones y volumen de las raíces**

Por condiciones de tamaño que significan las raíces a escala se simularon solamente las raíces gruesas para el modelo físico. Como la mayoría de raíces gruesas vienen adheridas y arrastradas junto a los troncos, provenientes de los derrumbes de bancos ribereños, fue necesario estimar el

volumen anual de estas raíces. Las raíces a escala fueron adheridas a las clavijas anteriormente detalladas. Con el fin de estimar la cantidad de raíces en los bosques amazónicos se tomó los resultados necesarios de los estudios de la productividad primaria neta de carbono (PPN) de la tabla 6 elaborada por Aragao et al. (2009). Es importante mencionar que, Aragao et. al (2009) sostienen que la producción primaria neta de carbono es directamente proporcional a la biomasa total (BMT); luego podemos deducir que el volumen de troncos hallado ($v_t = 6602941.42$) representa el 16.6 % de la vegetación total.

$$\begin{array}{r} v_t \text{ ----- } 16.6 \% \\ X \text{ ----- } 100 \% \\ \hline X = 39776755.52 \text{ m}^3 \end{array}$$

Siendo X la producción total (100%) de los restos de vegetación, luego a partir de esta determinamos el volumen total de raíces gruesas (Y):

$$\begin{array}{r} X \text{ ----- } 100 \% \\ Y \text{ ----- } 3.6 \% \\ \hline Y = 1431963.20 \text{ m}^3 \end{array}$$

Los diámetros y espesores de las raíces son equivalentes al diámetro a la altura del pecho (DHP) del tronco por un factor, cuyo rango se indica en tabla 10. Los intervalos de los rangos son expresados por shield; por lo que, para adecuarse a los diámetros comerciales que representaron las raíces en el modelo físico se eligieron factores que se indican a continuación:

Tabla 10. Factores elegidos para las dimensiones de las raíces de acuerdo cada tipo de tronco.

		Tipo	1	2	3	4	5
Diam. raíz = 2 a 3 DHP	Shield ⇨	Elegimos el factor =	2.67	2.50	2.50	2.80	3.00
Espesor raíz = 1 a 1.5 DHP	Shield ⇨	Elegimos el factor =	1.499				

Los factores se eligieron en la hoja de cálculo Excel de acuerdo a los diámetros comerciales mediante la siguiente relación de longitudes:

$$e_l = \frac{l_m}{l_p} = \frac{1}{60}$$

Los diámetros comerciales son las medidas establecidas de las varillas de madera que se pueden adquirir en un aserradero o ferretería. Teniendo en cuenta esta aclaración se concluyó con el siguiente cuadro de cálculos.

Tabla 11. Número de raíces con su respectivo volumen pertenecientes a una porción de troncos.

Raíces gruesas (Rg)						
Tipo	Espes. (m)	Diamet. (m)	Area (m2)	Vol unit (m3)	# raíces	Vol # raíces
1	0.81	1.44	1.629	1.318	1	1.32
2	0.72	1.20	1.131	0.814	2	1.63
3	0.54	0.90	0.636	0.343	8	2.75
4	0.45	0.84	0.554	0.249	16	3.99
5	0.36	0.72	0.407	0.146	21	3.08
			suma:	2.870	48	12.75

Efectivamente, los resultados de la tabla 11 disponen de una porción de 48 raíces que representan un volumen de 12.76 m³. Este número de raíces fueron unidas a 48 troncos de los 201 de acuerdo a su tipo como corresponda respectivamente. Por consiguiente, se pudo determinar el porcentaje que las raíces representaron del total de cantidad de madera estimada para la simulación en el modelo físico.

$$\% \text{tronc}_{\text{raiz}} = \frac{\# \text{raices}}{\# \text{troncos} + \# \text{raices}} (100)$$

$$\% \text{tronc}_{\text{raiz}} = 19.28 \approx 19 \%$$

Fue necesario, proceder a comprobar los cálculos. Otra manera de determinar el volumen de una porción de raíces gruesas de 12.75 m³ tal como se indica en la tabla 11, fue dividiendo el volumen total de raíces gruesas entre el número total de porciones.

$$\frac{Y}{\# \text{ veces}} = 12.757 \text{ m}^3 \approx \mathbf{12.76} \quad (\text{cumple})$$

Por último, el siguiente cuadro determina la cantidad total anual del número de raíces de cada tipo y su volumen respectivo según corresponde.

Tabla 12. Volumen total anual de raíces gruesas que arrastran las corrientes en el meandro.

Tipo	Vol # raíces	# raíces total	Vol total # raíces
1	1.32	12127	148129.42
2	1.63	32340	182875.83
3	2.75	121273	308602.96
4	3.99	242547	448045.79
5	3.08	404244	345635.32
suma	12.76	812531	1433289.32

3.11. Transferencia de información leñosa de prototipo a modelo

Los troncos y raíces gruesas pasan a ser denominados en modelo físico como clavijas y discos respectivamente. Cabe señalar que, los discos fueron adheridos a un cierto porcentaje de clavijas.

3.11.1. Dimensiones de clavijas (troncos) y discos (raíces)

Los resultados de los leños gruesos estimadas en la tabla 8 y 11 fueron reducidos a escala 1/60. Luego, a estas pequeñas piezas de madera (clavijas y discos) fueron pintados de colores diferentes, a fin de facilitar las observaciones en las filmaciones gravadas desde una posición aérea por el Dron.

Tabla 13. Volumen y número de clavijas correspondientes a una porción.

Cálculo de las clavijas (troncos)						
Tipo, Color	Long. (cm)	Diámet. (cm)	Area (cm ²)	Vol unit (cm ³)	# clavijas	Vol clavijas
1, Blanco gran.	11.70	0.90	0.64	7.44	3	22.33
2, Rosado	10.40	0.80	0.50	5.23	8	41.82
3, Celeste	7.80	0.60	0.28	2.21	30	66.16
4, Verde	6.50	0.50	0.20	1.28	60	76.58
5, Blanco peq.	5.20	0.40	0.13	0.65	100	65.35
			suma:	16.81	201.00	272.23

Tabla 14. Volumen y número de discos adheridos al 19% de una porción de clavijas.

Discos (Raíces gruesas)						
Tipo, color	Espes. (cm)	Diamet. (cm)	Area (cm ²)	Vol unit (cm ³)	# discos	Vol. discos
1, Blanco gran.	1.35	2.40	4.52	6.10	1	6.10
2, Rosado	1.20	2.00	3.14	3.77	2	7.53
3, Celeste	0.90	1.50	1.77	1.59	8	12.71
4, Verde	0.75	1.40	1.54	1.15	16	18.45
5, Blanco peq.	0.60	1.20	1.13	0.68	21	14.24
			suma:	12.61	48	59.03

3.11.2. Caudal total de clavijas con y sin discos ($Q_{T\text{ clav}}$)

El caudal empleado en las simulaciones fue estimado a partir de los datos de prototipo. Para ello, el volumen de una porción de clavijas (272 cm³) fue sumado con una de discos (59 cm³), obteniéndose un volumen total de clavijas con y sin discos de 331cm³. De modo que, esta porción total de piezas de madera fue arrojada al canal en 1 segundo, tal como ya se lo explicó.

$$Q_{T \text{ clav}} = 331 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

El caudal total de clavijas o porción fueron arrojadas durante la avenida máxima de cada ensayo. Estas avenidas fueron estimadas para periodos de retorno de 25 y 50 años.

3.12. Procedimiento experimental

3.12.1. Elaboración de las clavijas con y sin discos

Se eligió la madera conocida con el nombre de capirona para los ensayos, ya que esta madera leñosa es la más común en la región. La carpintería del laboratorio no cuenta con la máquina para habilitar varillas circulares de madera; por tal razón, esta madera de forma circular sólo se encontró en el mercado, mediante varillas de alrededor de 1 metro de longitud y diámetros ya establecidos o comerciales.



Imagen 24. Corte a longitudes determinadas de las clavijas en la maquina cortadora y su respectivo pintado en el taller de carpintería.

Las longitudes de las clavijas y unión con discos, así como su pintado, fueron habilitadas por el personal de carpintería del laboratorio de hidráulica. Aprovechando que la madera es poco permeable, para la unión de los discos con las clavijas se empleó pegamento triz. Las clavijas más grandes en un inicio fueron pintadas de color blanco y las restantes de 4 colores oscuros diferentes, luego los colores oscuros fueron cambiados a colores claros por los motivos que serán explicados más adelante.

3.12.2. Densidad y profundidad boyante de las clavijas con y sin discos

La cantidad de clavijas empleadas en los ensayos fueron almacenadas en 32 bolsas. Cada bolsa contuvo 2 porciones de clavijas, o sea 402 clavijas de diferentes tamaños o colores. Las clavijas dentro de estas bolsas fueron pesadas en una balanza analítica y/o en una electrónica. Además, el

volumen de cada bolsa que contiene 2 porciones de clavijas con y sin discos (raíces a escala reducida) sería el doble del que contiene una porción.

$$V_{bolsa} = 662.65 \text{ cm}^3$$

- Estimación de la densidad con datos de una balanza analítica: Se tomó una bolsa al azar y se midieron las masas por cada color, luego se sumaron las masas de todos los colores y se dividieron entre el volumen ($662.65 \text{ m}^3/\text{s}$).

Tabla 15. Masa de las clavijas de diferente color dentro de una bolsa.

Colores	Masa (gr)
Blanco peq.	117.31
Verde	135.34
Celeste	106.16
Rosado	71.43
Blanco gran.	41.47
suma	471.71

Luego la densidad es: $\rho_{clav} = 0.712 \text{ gr/cm}^3$

- Estimación de la densidad con datos de una balanza electrónica: Se tomaron cinco bolsas al azar y se tomaron notas de las masas de cada bolsa para luego promediar las masas. El resultado se dividió nuevamente entre el volumen.

Tabla 16. Masa promedio de 5 bolsas escogidas al azar.

bolsas	Masa (gr)
1	471.9
2	469.9
3	466.3
4	470.9
5	469.2
Promedio	469.64

Luego la densidad es: $\rho_{clav} = 0.709 \text{ gr/cm}^3$

Por último, de las densidades halladas se tomó la densidad promedio de la madera.

$$\rho_{clav} = 0.71 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

La Capirona es una madera que pertenece a la especie *Calycophyllum spruceanum* (Benth.) Hook, familia Rubiaceae. Esta madera es muy pesada y presenta contracciones lineales bajas y de contracción volumétrica moderadamente estable. La densidad de la capirona en la Amazonía es de una densidad básica 0.76 g/cm³, pero la razón por la que obtuvimos una densidad de 0.71 g/cm³ pudo ser por el tiempo expuesto a secado en el mercado u otros factores.

Como la densidad de las clavijas de madera (0.71 gr/cm³) es menor a la densidad del agua (1 gr/cm³), se hace el análisis de flotabilidad en un flujo en condición estática. Los resultados de las profundidades boyantes de estas pequeñas piezas de madera se muestran a continuación:

- Profundidad boyante de las clavijas sin discos

El movimiento de cada clavija sobre el lecho suave es dado por su profundidad boyante, el cual se denominó como altura sumergida “h” (similar a h1 en la figura 12). En el caso de arrastre “h” sería igual a “y” y “dw” en la figura 8A y 9 respectivamente. Las alturas de sumergimiento se determinaron teóricamente a partir de la ecuación 25, es decir donde la fuerza gravitatoria (F_g) igual a cero. Luego, estas alturas fueron confirmadas en campo a través de mediciones directas en un flujo estático. Los datos de “h” calculados teórica mente y en campo se muestran en el cuadro siguiente:

Tabla 17. Altura y área sumergida determinada teóricamente y en campo.

"h" y "Asub" de las clavijas						
Tipo, Color	Lt (cm)	Dt (cm)	At (cm²)	h (cm) teórico	Asub (cm²)	h (cm) campo
1, Blanco gran.	11.70	0.90	0.636	0.601	0.452	0.59
2, Rosado	10.40	0.80	0.503	0.535	0.357	0.54
3, Celeste	7.80	0.60	0.283	0.401	0.201	0.41
4, Verde	6.50	0.50	0.196	0.334	0.139	0.32
5, Blanco peq.	5.20	0.40	0.126	0.268	0.089	0.26

- Profundidad boyante de las clavijas con discos

Se asume que la altura sumergida es constante a lo largo de la clavija y el disco; siendo esto variable en realidad, pero insignificante en la escala trabajada de este modelo. A partir de la figura 12 y de la ecuación 27 se hallan teóricamente los valores de “h” y demás datos.

Tabla 18. Dimensiones de las clavijas con discos sometidas a flotación.

Dimensiones de las clavijas con discos												
Tipo, Color	Dimensiones de las clavijas					Dimensiones de los snags						
	Lt (cm)	Dt (cm)	h1 (cm)	A1 (cm ²)	∇1 (cm ³)	Wrw (cm)	Drw (cm)	h3 (cm)	A2 (cm ²)	A3 (cm ²)	∇rw (cm ³)	∇2 (cm ³)
1, Blanco gran.	11.70	0.90	0.744	8.710	5.618	1.35	2.40	1.49	2.016	2.962	6.10	3.99
2, Rosado	10.40	0.80	0.655	6.811	3.898	1.20	2.00	1.25	1.505	2.075	3.77	2.49
3, Celeste	7.80	0.60	0.491	3.831	1.644	0.90	1.50	0.94	0.846	1.167	1.59	1.05
4, Verde	6.50	0.50	0.417	2.709	0.972	0.75	1.40	0.87	0.649	1.001	1.15	0.75
5, Blanco peq.	5.20	0.40	0.339	1.764	0.508	0.60	1.20	0.74	0.443	0.731	0.68	0.44

3.12.3. Replanteo del lecho móvil

El replanteo se inició después del levantamiento con Scanner 3D del lecho erosionado correspondiente al ensayo anterior. El lecho de material arenoso tuvo que ser restaurado a condiciones similares de prototipo; por lo que, para llevar a cabo este trabajo se necesitó de datos batimétricos del lecho. En este caso el levantamiento de la batimetría la realizó la empresa ODEBRECHT SAC.

El tramo del río fue subdividido en 94 secciones que abarcan desde las progresivas 0+120 hasta 4+320, siendo en modelo una longitud de 70 m. Además, el lecho fue de material arenolimoso y de 0.000022 de pendiente. Cada sección contó con distancias positivas y negativas a partir de un punto cero que se ubica en el eje del canal, además estuvieron separadas cada 1 metro. Cada sección contuvo una gama de puntos que indican las cotas de la batimetría, siendo estos puntos materializados mediante tarugos de madera pintados de diferente color.

Procedimiento del replanteo:

Paso 1. El lecho arenoso necesitó de riego continuo y diario, con mayor frecuencia en la estación de verano; adicional a esto, regar el área a trabajar fue recomendable antes de iniciar la jornada diaria de trabajo.

Paso 2. Se instaló el nivel de ingeniero a una distancia adecuada para barrer las progresivas de las secciones a trabajar durante el día.

Paso 3. Se seleccionó para la lectura, el BM más próximo de la zona a trabajar. Los BMs fueron ubicados en ambos lados del exterior del modelo físico. La mira siempre tuvo que sostenerse con la ayuda de un nivel ojo de pollo en cualquier trabajo relacionado al modelo.

Paso 4. Las progresivas se encontraron marcadas sobre los muros laterales del modelo, de tal modo que se procedió a ubicar la progresiva de la sección a trabajar, y luego se colocó la regla graduada de aluminio sobre los muros. Cabe indicar que, el punto cero (centro de la longitud de la regla) se ubicó sobre el eje del lecho.

Paso 5. Usando una varilla de aluminio se procedió a marcar los puntos (cotas) de la sección a partir del eje, el cual los puntos ubicados a la derecha del eje son positivos (+) y a la izquierda son negativos (-). Cabe mencionar que el número total de secciones fue de 72, perteneciendo a una sección de tramo recto una cantidad aproximada de 25 puntos (cotas) y en el tramo curvo una de 65 puntos. Se colocaron mayor cantidad de puntos en la curva, por ser el foco de estudio y complejidad que representa la hidrodinámica en esta zona.

Paso 6. Para levantar las cotas batimétricas del lecho se trabajó en base a BMs que se eligen a conveniencia y en puntos rígidos inamovibles, fuera del área ocupada por el modelo físico. Para el caso se tomaron los siguientes BMs.

Tabla 19. Cotas de los puntos tomados en el modelo y adaptados a prototipo.

	Punto	Cota Prototipo (m)
1	BM1 Cota (m)	156.891301
2	BM2 Cota (m)	152.653101
3	BM3 Cota (m)	211.859438
4	BM4 Cota (m)	207.612472
5	BM5 Cota (m)	203.351358
6	BM6 Cota (m)	151.511358
7	Indicar BM	_____

Luego estos puntos fueron adicionados al plano topográfico del prototipo. El procedimiento se explica a continuación:

Primero se delimita el área donde se construirá el modelo, después bajo criterio se ubican una cierta cantidad de puntos fijos (6 BMs en este caso) fuera del área que ocuparía el modelo. Con estos puntos se fijan la cota máxima y mínima del talweg del lecho escalado. Después se lleva a cabo un levantamiento topográfico de toda el área delimitada para la construcción del modelo.

Finalmente, la batimetría del prototipo se acopla y ajusta sobre el plano topográfico de tal área delimitada para el modelo.

El replanteo del lecho se realiza por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Cot. pto}_p = \text{Cot. BM}_p + (\text{Lect. BM} - \text{Lect. pto}) 0.60 \quad \dots (57)$$

Donde:

Lect. BM : Lectura sobre el punto BM_p (cm)

Lect. pto : Lectura sobre el punto pto_p (cm)

Cot. BM_p : Cota del BM en prototipo (m)

Cot. pto_p : Cota del punto en prototipo (m)

También, es lo mismo según la siguiente figura:

$$x = H - \frac{h}{60}$$

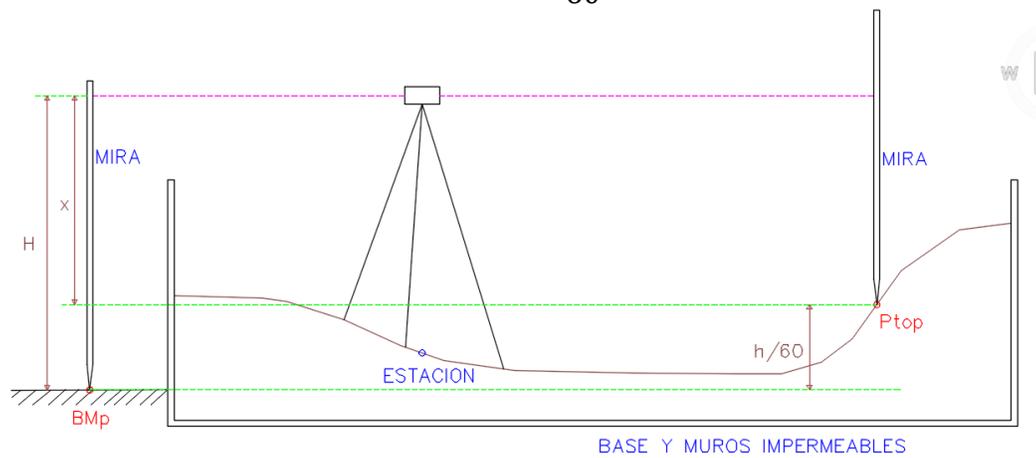


Figura 31. Vista de perfil para el replanteo de una sección del lecho en el modelo físico.

Donde:

h : es la diferencia de cotas del BM y un punto en prototipo

H : es la altura de medida en la mira

x : es la altura de lectura de la mira, cuya punta debe estar sobre la cabeza del tarugo, para ubicar el punto “Pto_p” que representa una cota del lecho.

A continuación, como ejemplo para una mejor visualización de los puntos en la vista de perfil (figura 31) se muestra la vista en planta de la sección 0+840 (línea punteada de color verde fosforescente) de las curvas de nivel del siguiente plano topográfico.

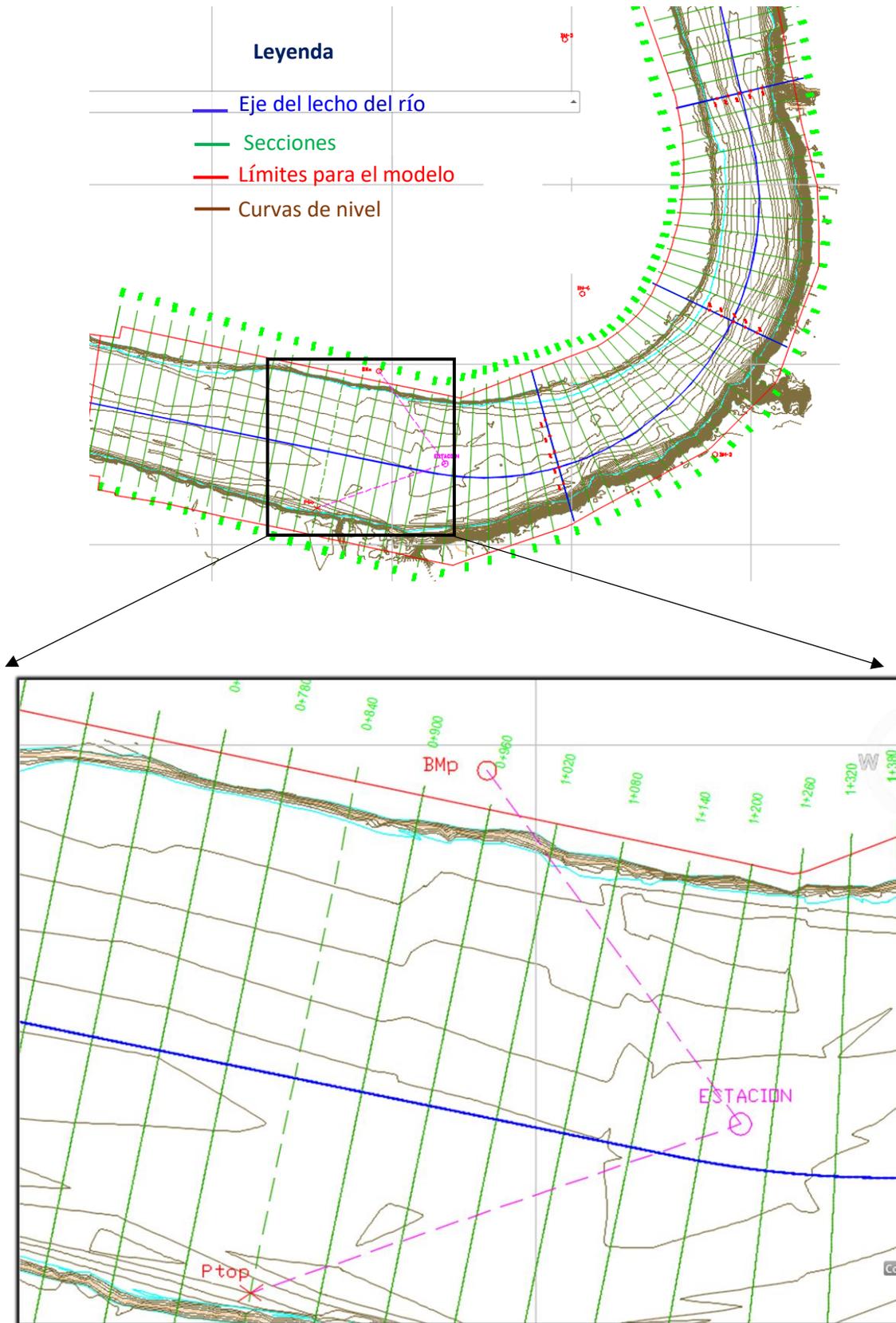


Figura 32 . Vista en planta de las curvas de nivel del plano topográfico.

Cada sección en prototipo se ubica a 60 m siguiendo el eje; siendo en modelo la primera sección obviada porque en tal zona se levantó una base de concreto para la colocación de la faja transportadora de clavijas.

Paso 6. Definido el cálculo de los puntos se procedió a materializar las cotas, del lecho del canal experimental, mediante la colocación de tarugos.

Paso 7. Sobre cada tarugo fijado perpendicularmente en el lecho, de la sección a trabajar, se ubicó la mira y luego se manipuló el tarugo subiendo o bajando hasta que indique la lectura correcta (x) vista desde el nivel de ingeniero.



Imagen 25. Toma de lectura de cada punto de la sección 1+200 para su replanteo.

Nota: Por factores como imprecisión del nivel de ingeniero y cansancio humano frente a la minuciosidad que representa este trabajo, se acepta realizar el replanteo del lecho móvil con un error de lectura de ± 1 mm.

Paso 8. Luego de este procedimiento se inició a dar forma al lecho mediante el uso de planchas, reglas entre otros. El nivel de la superficie de arena debe adecuarse a las partes superiores de los tarugos plantados verticalmente, ya que tales partes indican las cotas.

Se tuvo en cuenta que después de cada ensayo el lecho quedaría totalmente modificado por el paso del flujo, por tal razón toda el área de la estructura principal fue totalmente restringida hasta haberse concluido con los trabajos del escaneo 3D. Además, para iniciar los trabajos de escaneo fue necesario esperar el tiempo suficiente (2 días aproximadamente) hasta que el lecho modificado quede sin remanencias de charcos de agua.

3.12.4. Elaboración y colocación de los ELJs

El diseño necesitó adaptarse en base a la forma y disposición de troncos disponibles en la zona de estudio. Jacay (2019), tesista a cargo del diseño, optó por los siguientes criterios:

La elección del tipo de madera fue de acuerdo al más abundante en las zonas aledañas al punto de estudio por cuestión de costos. También, las propiedades físicas y mecánicas se tuvieron en cuenta. Esto es crítico a la hora de hacer un balance de fuerzas, porque la madera es más resistente a los agentes biológicos y menor flotabilidad. Teniendo en cuenta lo mencionado, para el diseño se optó por escoger la madera de nombre común “Capirona”. Su densidad básica es de 0.76 gr /cm³, lo cual la hace una madera relativamente pesada. La altura de este árbol oscila entre 15 a 35 m y de 0.6 m de diámetro. Es importante mencionar que la madera bajo el nivel de agua en ríos puede durar por mucho tiempo (hasta casi 100 años), dependiendo de las especies de árboles y condiciones de preservación. Sin embargo, la madera situada por encima de la superficie de agua está sujeta a descomposición biológica y ruptura asociada con humectación, secado y abrasión por transporte de sedimentos (Tim Abbe y Andrew Brooks, 2010).

La disposición del entramado fue mediante troncos con fajos de raíces apuntando hacia aguas arriba. El entramado constó de tres tipos de troncos denominados: troncos principales orientados perpendicularmente al flujo (key members en inglés), troncos secundarios orientados en dirección del flujo (racked members en inglés) y pilotes; pero sólo a los árboles que sirven de pilotes se les despojó de sus raíces. Las dimensiones del tipo de árbol seleccionado para el diseño fueron representadas por: diámetro de la troza, diámetro promedio del fajo de raíz, longitud promedio del fajo de raíz y altura de la troza. Con estas dimensiones pudimos generar una disposición del entramado adecuado y así poder calcular la permeabilidad.

La geometría del espigón en este estudio tuvo una forma cúbica para fomentar la estabilidad y así poder evitar su vuelco debido a los momentos que producen la fuerza de arrastre y las presiones hidrostáticas. El espigón contó con una altura H_{sub} (altura de sumergimiento) para un caudal con un periodo de retorno de 100 años, más un borde libre de aproximadamente 2 m. El ancho del espigón tendió a aproximarse a la longitud H_{sub} por efectos de trabajo y estabilidad. La longitud del espigón fue la suma de su longitud de trabajo y la longitud de empotramiento, la primera dependió del alineamiento que se da al trazo en planta del lecho; y la segunda fue un porcentaje de la longitud de trabajo, en este caso es de alrededor del 10-15 % dependiendo del

tipo de material y la inclinación del talud donde se trabajó. La estructura fue de tipo escalonado en el extremo anclado a la orilla, esto se debió a la inclinación del talud. Por último, se sumergió en el lecho una profundidad aproximada de 5 cm para cubrir los efectos de socavación.

La permeabilidad fue considerada como un porcentaje de área libre con respecto al área perpendicular al flujo y fue sujeta a la disposición del entramado. Con el fin de disponer de permeabilidades que disminuyan conforme se acercaran al talud, se dispuso de hasta tres tramos diferentes con distintas permeabilidades en un espigón. Esto fue con el propósito de disminuir la erosión en la punta del espigón y evitar en la zona cercana al anclaje la producción de un flujo acelerado que pudiera erosionarlo de forma lateral. Esto fue tomado como ejemplo de una investigación realizada en China por Yongtao Cao, Peiqing Liu, Enhui Jiang (2013).

El trazo en planta de los espigones, orientación y espaciamiento (ver planos de anexos) fueron a partir de investigaciones desarrolladas. Por ello se tuvo en cuenta que la permeabilidad asignada para los espigones fue de alrededor del 34%; por lo que se asumió un ángulo inicial de desviación de flujo de 17 grados que nos dio de forma conservadora espaciamientos pequeños. Mientras mayor es el ángulo de desviación de flujo, las estructuras tenderán a acercarse mucho más; sin embargo, un ángulo de desviación de flujo mucho menor, espaciaría en una mayor distancia a los espigones. En este último podría introducirse flujo dentro de la zona de campos de espigones que favorece la erosión, haciendo que estos no funcionen adecuadamente. Es así que pudimos disponer y cambiar los ángulos de desviación de flujo para poder espaciar los espigones adecuadamente en la extensión de trabajo. Por eso se consideró los criterios de diferentes investigadores en cuanto a espaciamiento de espigones como respaldo a los espaciamientos asignados (ver detalles en Jacay 2019).



Imagen 26. Colocación de los espigones ELJ en el lado cóncavo del canal.

3.12.5. Incorporación de las clavijas sobre la faja transportadora

La cantidad total de troncos estimados en prototipo no fue posible arrojar al canal, porque de acuerdo a la ecuación 36 tomaría 1.3 días en lanzarlos. Además, las 112290 porciones de clavijas serían complicadas elaborarlas, así como, también de disponer de una faja transportadora tamaño suficiente tamaño. Por tal motivo, al analizar tales inconvenientes se decidió arrojar sólo 64 porciones en cada ensayo.

$$t_m = t_p e_L^{1/2} = 1.3 \text{ días}$$

La distribución de clavijas debe ajustarse al área disponible sobre la faja, de tal manera que se pueda arrojar el caudal de $331 \text{ cm}^3/\text{s}$. Cabe indicar que, este caudal sólido equivale 71.57 m^3 de madera por cada 7.69 segundos en prototipo. Para ello se colocaron 2 bolsas que contienen dos porciones de clavijas con y sin raíces (ver anexos) sobre cada área subdividida de $10 \text{ cm} \times 6 \text{ m}$ en la faja transportadora (imagen 27). Esto significa que hubo 4 porciones de clavijas (804 unidades) sobre cada subárea, el cual se tuvo que arrojar en un tiempo cronometrado de 4 segundos al inicio del canal.

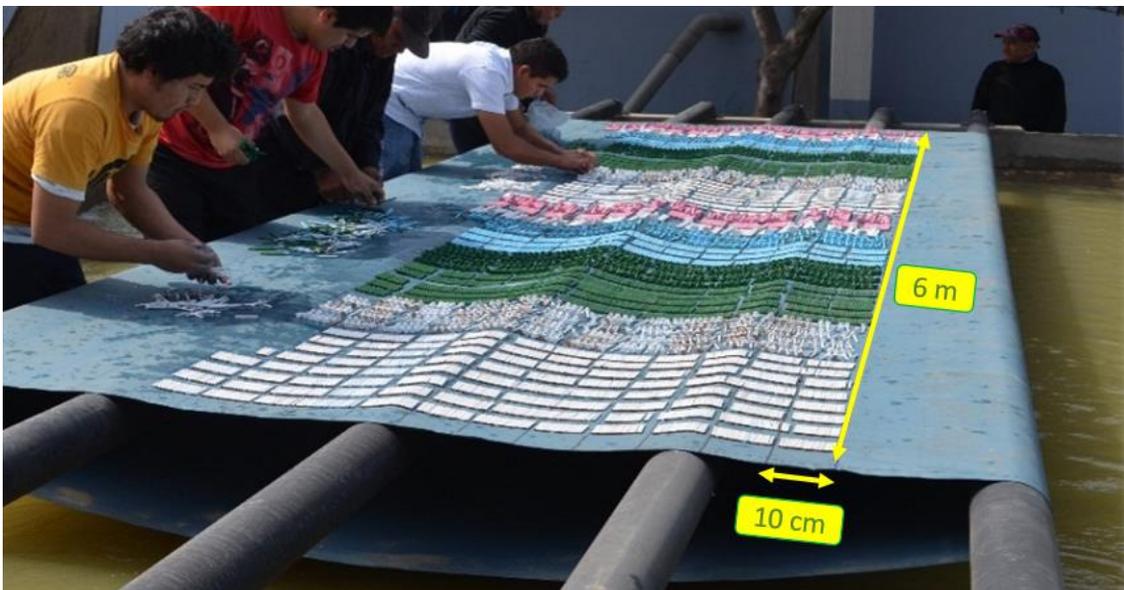


Imagen 27. Clavijas distribuidas sobre subáreas de $10 \text{ cm} \times 6 \text{ m}$ de la faja transportadora, sumando un total de 16 subáreas.

Las clavijas se distribuyeron en 56 columnas separándolos por diferentes colores con el fin de poder diferenciarlos desde una determinada altura. Luego de que las clavijas fueran arrojados al

flujo se procedió a la grabación de videos y toma de fotos aéreas tomadas desde una cámara filmadora Gopro Hero 4 montada en un Dron.

Tabla 20. Orden de las 28 columnas de clavijas colocadas sobre la mitad de la faja.

→	Blancos pequeños		Verdes		Celestes		Blancos grandes	Rosados	
# columnas	8 S/R	4 C/R	5 S/R	3 C/R	3 S/R	2 C/R	1 C/R y S/R (mixto)	1 S/R	1 C/R y S/R (mixto)
# clavijas por columna	6 col de 20 clav 2 col de 19 clav	2 col de 10 clav 2 col de 11 clav	3 col de 18 clav 2 col de 17 clav	2 col de 11 clav 1 col de 10 clav	2 col de 15 clav 1 col de 14 clav	1 col de 8 clav 1 col de 8 clav	1 col de 4 clav S/R y 2 C/R	1 col de 9 clav	1 col de 3 clav S/R y 4 C/R
Subtotal	158	42	88	32	44	16	6	9	7
Total	200		120		60		6	16	

Nota: S/R, sin raíz; C/R, con raíz. El sentido de la flecha indica la posición de las columnas de derecha a izquierda observando hacia aguas abajo del inicio del modelo.

El conteo del número de filas se determinó haciendo el conteo de la cantidad de subáreas, es decir cada 10 cm, siendo un total de 16 filas que ocuparon 1.6 m del ancho de la faja; y el número total de columnas a lo largo de toda la faja fue de 56, tal como se muestra en la siguiente imagen.



Imagen 28. Clavijas distribuidas en 56 columnas sobre la faja.

3.12.6. Puntos estratégicos para la toma de velocidades

A fin de estimar la fuerza centrífuga que ejerce la curvatura del canal y las fuerzas de arrastre de las clavijas se registraron velocidades con el Acoustic Doppler velocimetry (ADV). El ADV fue montado sobre un puente metálico deslizante, colocado sobre los muros laterales del canal. Las velocidades se registraron en puntos distribuidos a lo ancho en cada sección de las progresivas. Para estimar las fuerzas de las clavijas se tomaron las velocidades lo más próximo a la superficie de agua, por ser las que más se relacionan con el movimiento del material flotante. En la figura 33 se muestran los puntos de toma de velocidades, concentrándose mayor número de puntos en la zona de socavación o cóncava del tramo curvo. Pues en la zona cóncava es donde el flujo alcanza una dinámica muy complicada de entender. Las secciones que contienen los puntos fueron perpendiculares al eje del canal y distaron entre sí cada 4 metros en modelo.

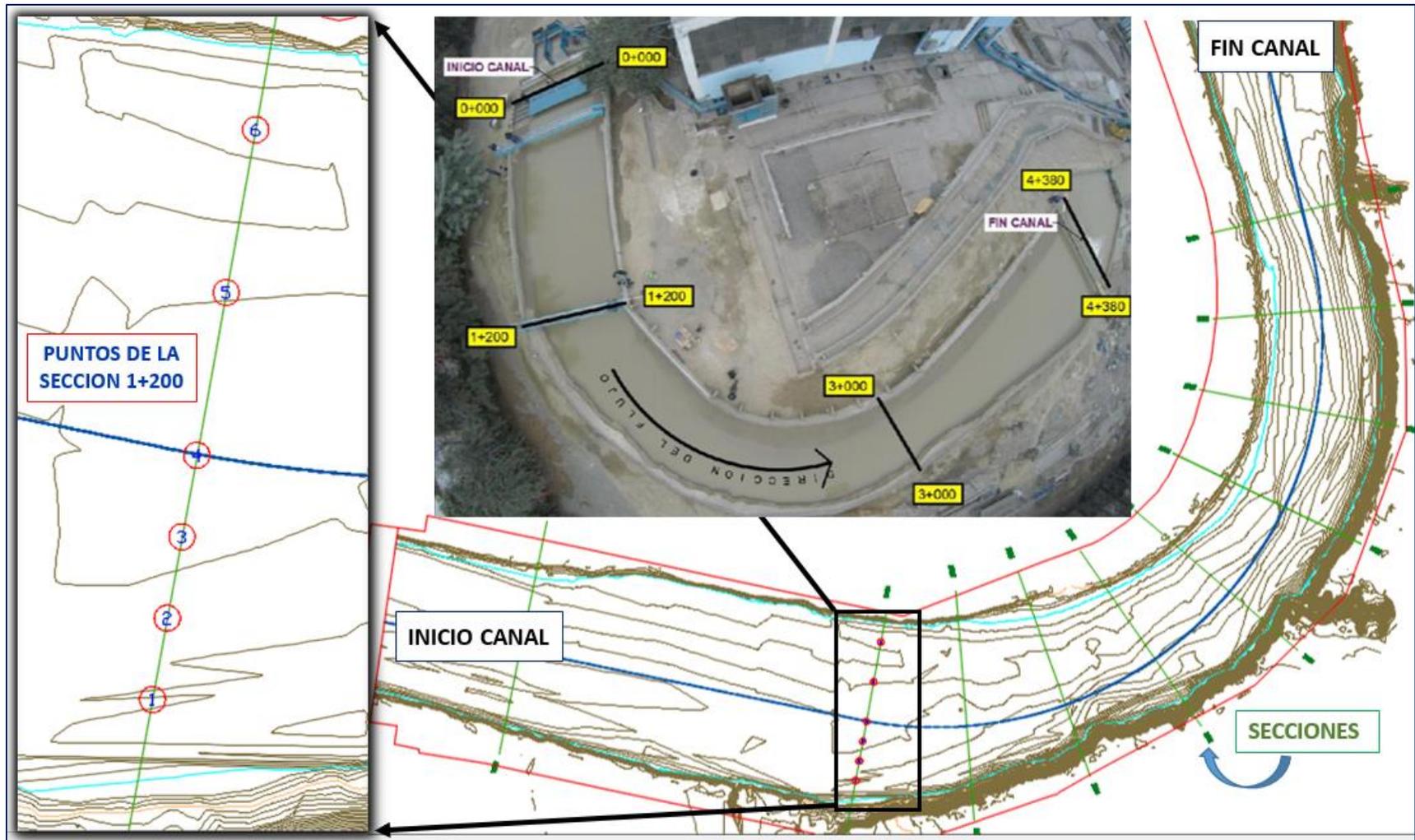


Figura 33. Vista en planta de la distribución de puntos para la medición de velocidades en cada sección transversal.

En el espejo de agua (W) de cada sección se distribuyeron 6 puntos, materializados en el puente metálico, para la medición de velocidades. El mayor número de puntos fue colocado en el lado cóncavo, donde el flujo es presenta mucha variación de velocidades. Razón por la cual, el distanciamiento entre puntos en esta parte del canal fue más corto que en el lado convexo o de llanura (figura 34). El transmisor acústico del ADV se sumergió en cada punto hasta registrar una altura de 7.5 cm por encima del lecho; luego, a partir de esta altura se tomaron velocidades cada 3.5 cm hacia la superficie. La razón de la altura de 7.5 cm es porque el ADV presenta deficiencias al contacto con los sólidos, siendo en este caso los sedimentos en movimiento. Así también, el transmisor acústico no registra datos de velocidades con precisión si se lo aproxima demasiado al contacto con al aire. Por ello se registraron las velocidades lo más cerca posible a la superficie (< 3.5 cm).

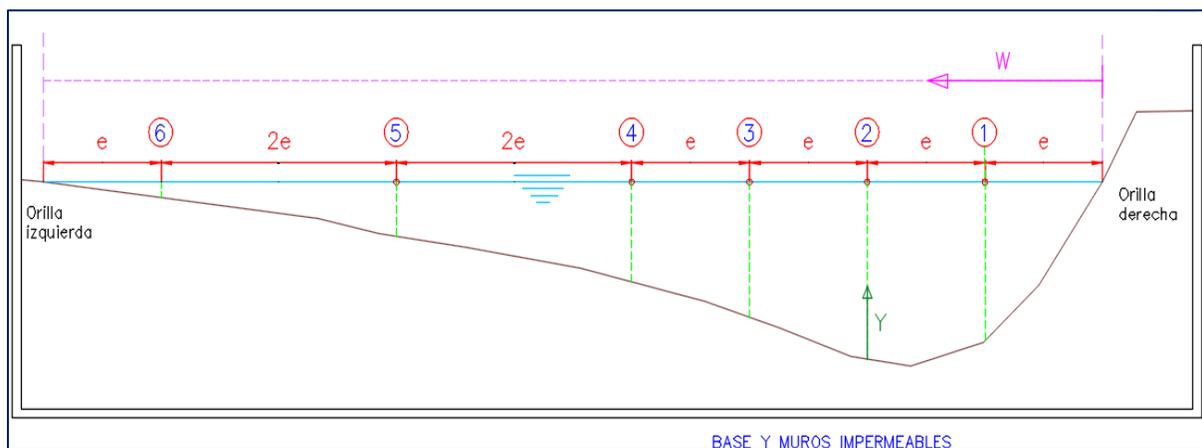


Figura 34. Distribución de seis puntos de la toma de velocidades en cada sección transversal del tramo curvo.

Este gráfico muestra: los seis puntos de derecha a izquierda, el calado en dirección Y para el registro de datos a cada 3.5 cm, el espejo de agua W (igual a 9 veces “ e ”). La sección del gráfico es con vista hacia aguas abajo.

También, con el fin de un mejor entendimiento del impacto de las clavijas flotantes sobre las laterales de los espigones se midieron velocidades distribuidas en 4 puntos, cuyas ubicaciones fueron a una distancia de 10 cm antes del lado aguas arriba de cada espigón (figura 35). Cabe indicar que, el transmisor acústico no puede ubicarse muy cerca al espigón; por cuestiones que a menores distancias los sólidos interrumpen la precisión, lo cual ocasionan menor efectividad en el cálculo de fuerzas. Sobre el puente metálico, también, se materializaron estos cuatro

puntos distribuidos en distancias equidistantes “d”. La distancia “d” se obtuvo sumando la longitud del espigón “n” (Long. E-n) más 0.5 metros y luego se lo dividió entre cuatro. Los puntos se ubicaron sumando cada valor “d” desde la orilla derecha hacia la izquierda. La medición de velocidades en cada punto, también, fue lo más próximo a la superficie de agua.

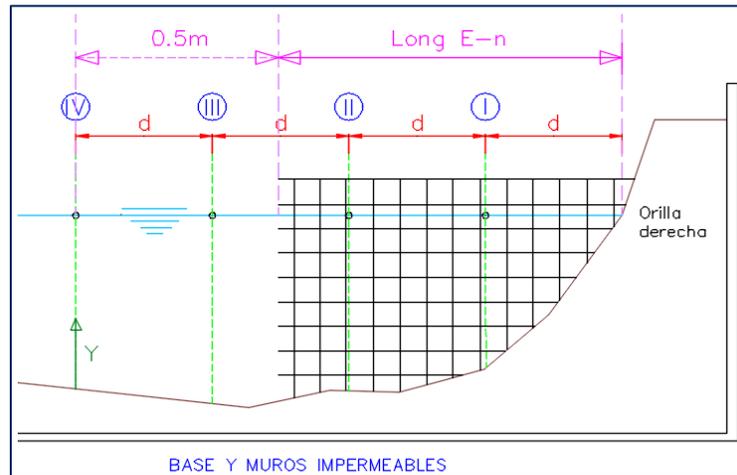


Figura 35. Sección transversal, 10 cm aguas arriba de los espigones, donde se muestra los IV puntos de toma de velocidades.

La mayoría de estudios con respecto al arrastre de leños se han centrado en ríos pequeños donde calados profundos no son muy frecuentes, por lo cual, poco es sabido sobre el transporte de madera en ríos grandes. Las ecuaciones mostradas anteriormente pertenecen a arroyos donde el calado es menor al diámetro del tronco; motivo por el cual, para el cálculo de la fuerza de fricción, arrastre y gravedad se emplea la velocidad media. En contraste, el análisis de la dinámica del material flotante en ríos meándricos del Amazonas es muy diferente, debido a la gran profundidad y variación de velocidades que los flujos desarrollan. Razón por la cual, en este estudio no fue recomendable emplear la velocidad media (V_m), sino una velocidad registrada en la superficie de agua (V_c). Pues, la velocidad en la superficie es la que se relaciona directamente con el movimiento de los troncos en flotación. Sin embargo, por la complejidad que representa medir esta velocidad en la curvatura del modelo físico, se decidió elegir la velocidad en dirección “x” (V_x) registrada por el ADV.

Como se sabe el ADV toma velocidades en tres componentes: V_x , perpendicular a la sección transversal; V_y , perpendicular al eje del canal y paralelo al espejo de agua; y V_z , perpendicular al eje y espejo de agua. Así que, el valor V_x es la componente que más se relacionaría con el

movimiento de las clavijas flotantes para estimar las fuerzas de arrastre. Al valor V_x en este trabajo se lo denomina como velocidad superficial (U). Es importante mencionar que, en la dirección X transita el material flotante en los tramos rectos, pero no sucede lo mismo para el tramo curvo. Puesto que, la madera en tramos curvos sigue una trayectoria correspondiente a un flujo helicoidal. Esto puede apreciarse figura 36, donde V_c es tangente a una línea de corriente de la superficie en un instante dado (ver plano 1/4 y 2/4).

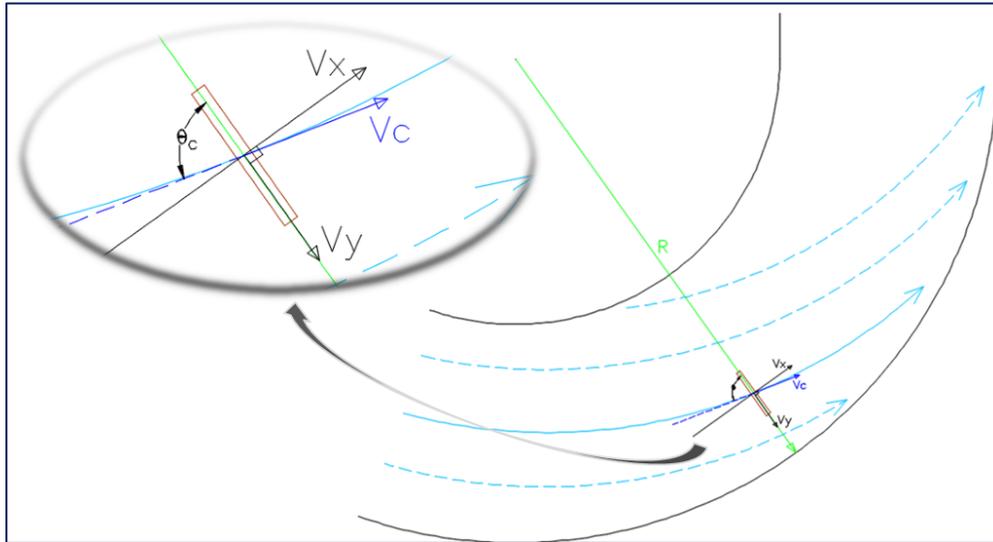


Figura 36. Vista en planta de las líneas de corriente en la superficie del flujo en el tramo curvo.

Tener presente que, los valores V_x tomados en cuenta para el movimiento de las clavijas, exactamente, no perteneces a la superficie sino a menos de 3.5 cm de esta.

IV. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

En este trabajo de investigación se elaboraron 4 ensayos con y sin presencia de espigones ELJ, a fin de observar las trayectorias de las clavijas en flujos tanto libres como expuestas a obstrucciones por parte de los espigones. Los ensayos iniciaron el 30 de agosto del 2016 y finalizaron el 24 de febrero del 2017, es decir, duraron más de medio año. El ensayo 1 y 3 fueron sin espigones y el ensayo 2 y 4 fueron con espigones, hubo ensayos de preparación y calibración del modelo que fueron obviados. En cuanto a, los caudales empleados en los ensayos fueron de 466 y 514 Lt/s que pertenecen a periodos de retorno de 25 y 50 años respectivamente. los caudales fueron controlados en los vertederos metálicos al inicio del modelo físico.

Para el análisis del movimiento del material flotante, solamente, se tomó en cuenta la fuerza de arrastre; ya que, la fuerza gravitatoria y de fricción (rozamiento) con el lecho se obviaron por ser nulas. Es decir, el material leñoso fue transportado solamente por flotación, siendo la velocidad de cada pieza de madera similar a la del agua que genera el arrastre (Ruiz-Villanueva et al., 2013). Cabe indicar que, según Ruiz-Villanueva et al. (2013), p. 441: “el valor del coeficiente de arrastre (C_d) para restos de madera en ríos reales es de 1.2 (Brooks et al., 2006), y el valor de 1.41 para clavijas en canales experimentales (Bocchiola et al., 2006)”. Por consiguiente, por tratarse el estudio en modelo se tomó este último valor para determinar los valores de las fuerzas de arrastre (F_d).

Cabe recalcar que, el caudal de madera arrojado a todos los ensayos es 331 cm³/s. Las características del tramo curvo fueron de: una amplia llanura de inundación en la orilla convexa; un acantilado casi vertical en la orilla cóncava, cuya altura varía entre 25 m a 30 m en prototipo; y un lecho de pendiente promedio aproximadamente de $S = 0.000022$.

4.1. Ensayo N°1 sin espigones ELJ

Este ensayo sin espigones ELJ fue llevado a cabo el 22 de setiembre del 2016, para el cual se empleó un caudal máximo de 466 Lt/s (12997 m³/s en prototipo).

4.1.1. Trayectorias y fuerzas de arrastre de las clavijas

Las clavijas fueron arrojadas sincronizadamente mediante un caudal de madera de 331 cm³/s, un equivalente a 201 clavijas por segundo. Una vez iniciado el movimiento de clavijas se observó que conforme avanzaban van formaron tres líneas de color claro observables y dos de color oscuro difíciles de observar. Por ello se creyó conveniente nombrarlos por líneas, el cual consistieron en tres de color claro y dos de color oscuro. Las líneas claras fueron denominadas como A, B, C y las oscuras como M, N a fin de una adecuada y general descripción (imagen 29). Es importante aclarar que, las trayectorias se dan en función de una fuerza centrífuga del flujo generada por la curvatura del canal.

Tabla 21. Áreas hidráulicas y velocidades medias en el tramo curvo del ensayo 1.

Sección	Áreas (m ²)	Vm (mm/s)
1+200	1.35	302.25
1+440	1.32	313.08
1+680	1.22	358.32
1+920	1.20	374.37
2+160	0.98	360.53
2+400	0.98	353.81
2+640	0.97	327.66
2+880	0.95	301.96
3+120	0.96	334.56
Promedio	1.10	336

Del área de 1.10 m² y la longitud curva aproximada de 32 m se tiene un volumen de 35.26 m³. Este volumen multiplicado por la densidad del agua de 1000 kg/m³ dió una masa (m) de 35262 kg de agua. El radio de curvatura (r) es de 16.21 m y el promedio de las velocidades medias (Vm) en dirección “x” es de $u = 0.336$ m/s; de tales datos se calcula la fuerza centrífuga.

$$F_c = \frac{mu^2}{r} = 0.246 \text{ KN}$$

Además, el número de Froude fue de 0.275, los eventos se muestran en las imágenes siguientes:

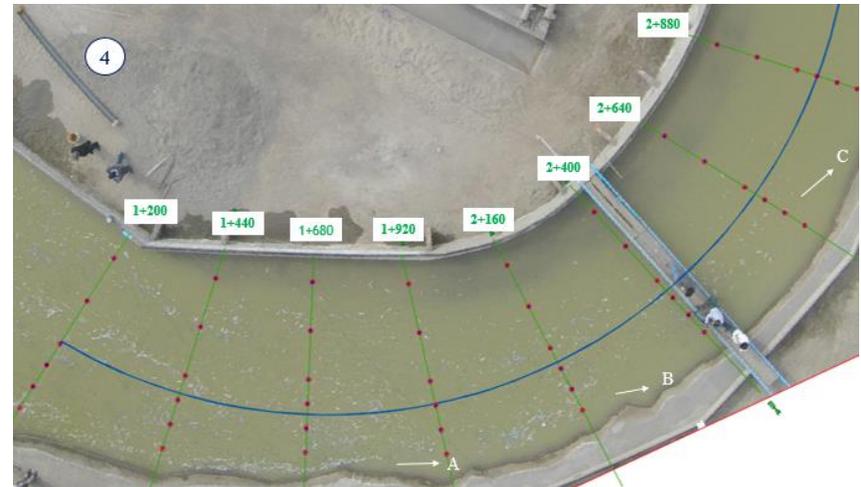
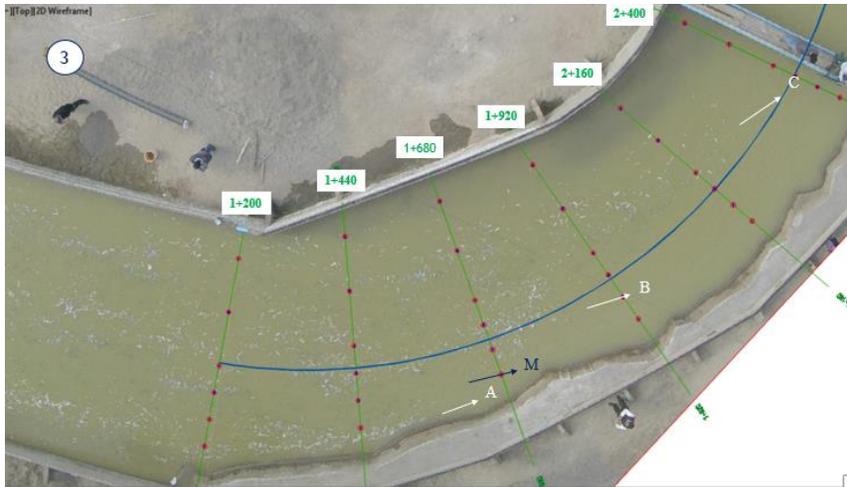
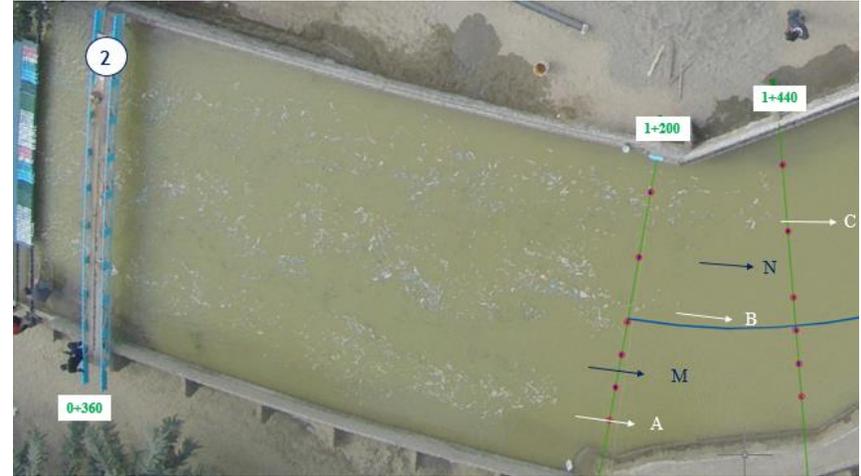




Imagen 29. Vista en planta del proceso de transporte de clavijas durante el ensayo 1 (fotografía 1-7). Vista del ingreso de las clavijas flotantes al tramo curvo (fotografía 8).

De acuerdo a la clasificación de Braudrick et. al. (1997), a simple vista se observa un transporte congestionado de clavijas. Esta masa visible congestionada tardó un aproximado de 4 minutos con 7 segundos en transitar el canal curvo. Aunque, fuera de este tiempo hubo clavijas transitando muy lentamente que quedaron retenidos por un instante en las llanuras de inundación, cárcavas del lado cóncavo y en el punto de quiebre del lado derecho donde inicia la curva. Pues, algunas de estas piezas que ingresaron a estos sectores quedaron transitando a una velocidad casi cero, incluso hasta después de haber culminado con los trabajos del ensayo.

Para describir las trayectorias a lo largo de los tramos se eligieron las primeras clavijas de las líneas claras, por la facilidad de ser observadas. Para ser más específicos, cuando se hace mención a la primera clavija, se refiere a la pieza que llevó la delantera momentáneamente en cada línea blanca. Dado que, la clavija de una línea que tomaba este puesto no era definitiva, sino que era adelantada por otra pieza adyacente a su lado izquierdo, sin importar el tamaño que esta última presentase.

De acuerdo a la literatura, el avance de troncos tramos rectos se relaciona con el centro y/o el thalweg por ser zona de convergencia superficial. De hecho, la mayoría del transporte de leños en la superficie de agua se da en esta zona; pues el flujo generalmente es más profundo y más rápido (NCHRP 2010; citado por Diehl 1997). Sin embargo, La primera clavija de la línea C, a pesar de no estar en el centro del canal, fue la más rápida en recorrer el tramo recto. La línea C tardó 38 segundos en transitar un tramo de 16 metros. El avance de la fila C en el lado izquierdo, donde hubo menor calado, fue mayor al avance de la fila central B y de las demás. Por ejemplo, en la imagen 29-1 se observa que la fila C adelanta a la fila N, N adelanta a B, y así sucesivamente. Al parecer, el efecto de la curvatura del canal influye en la dinámica del flujo en el tramo recto aguas arriba. Las líneas en ese orden continuaron su trayectoria recta hasta alcanzar la sección 1+200, donde se inicia el tramo curvo.

Luego, la línea C tardó 1 minuto en transitar de un lado al otro en el tramo curvo, es decir, desde la margen izquierda de la sección 1+120 (inicio de la curva) hasta la margen derecha de la sección 3+120 (fin de la curva).

Una vez que la línea C alcanzó la sección 1+440 de la curva, simultáneamente la línea B arribó a la sección anterior (1+200), y estando a una distancia aproximadamente equidistante entre estas dos líneas se mantuvo la línea N como lo muestra la imagen 29-2. Además, en esta

imagen se puede observar como la línea C empieza a ser impulsada hacia el lado derecho, dejando notar el inicio de la llanura de inundación del lado convexo. Adicionalmente, con respecto a la línea A y M en este mismo instante aún no logran alcanzar la sección 1+200. Cabe indicar que, la curva presenta una longitud de 32 metros a lo largo del eje; además, las secciones fueron colocadas a una distancia de 4 metros entre sí.

En la imagen 29-3 se observa más notoriamente el impulso de la línea C que incluso ha logrado alcanzar al eje del canal, después de pasar la sección 2+160. En este mismo momento se nota que la línea N empieza a desaparecer, ya que se observa a la línea C y B paralelamente adyacentes. El impulso hizo que las clavijas del lado cóncavo empiecen a entremezclarse con las adyacentes de la izquierda. Además, en esta imagen se aprecia como la línea B se inclina hacia el lado cóncavo, manteniendo hasta el momento la misma trayectoria que el eje del canal. La línea M y A inician a comprimirse hacia el lado derecho, incluso la línea A ha empezado a tomar forma de una línea muy delgada. En adición a esto, la línea A transita con un movimiento lento entre la sección 1+440 y 1+680, cuya ubicación está a una distancia aproximada de 12 metros detrás de la línea C. Las clavijas de la línea A, a pesar de estar desde un inicio apegados a la orilla derecha, no logran en su mayoría chocar con esta; salvo algunas de ellas roza las sobresalientes que representan los acantilados.

En las primeras cinco imágenes se aprecian los seis puntos rojos alineados en cada sección para la medición de velocidades como ya se mencionó anteriormente. De éstos se creyó conveniente tomar solamente los puntos 1 y 2 de cada sección como puntos de control para el estudio de cada ensayo. La razón de la elección es porque: a lo largo de estos puntos ocurre una gran interacción entre la circulación del material flotante y la presencia espigones, además de otras que serán explicados al detalle en el ensayo 4.

No obstante, en este ensayo la mayoría de las clavijas transitaron entre los puntos 1 y la orilla, a excepción del punto 1 de la sección 3+120 (cerca al final de la curva). En esta sección las clavijas circularon por el punto 2, a causa de un pequeño desvío por la presencia de una cárcava sobresaliente. Para profundizarse más en el tema se hizo un breve análisis en la sección 3+120. Para ello se muestra en forma general el gráfico de las velocidades superficiales (U) tomadas en los seis puntos del espejo de agua (W) de esta sección. Luego se muestra, la gráfica de las fuerzas de arrastre de los diferentes tipos de clavijas que pasaron a través del punto 2.

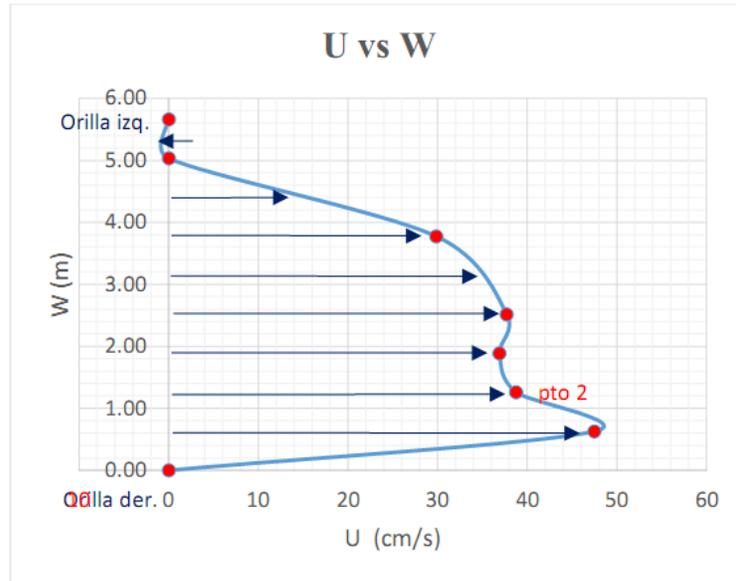


Figura 37. Gráfico velocidad superficial (U) vs espejo de agua (W) de la sección 3+120, ensayo 1

La velocidad superficial (U) de 38.8 cm/s en el punto 2 (figura 37 y 38) se ubica en el espejo de agua a una distancia de 1.26 m del lado cóncavo (orilla derecha).

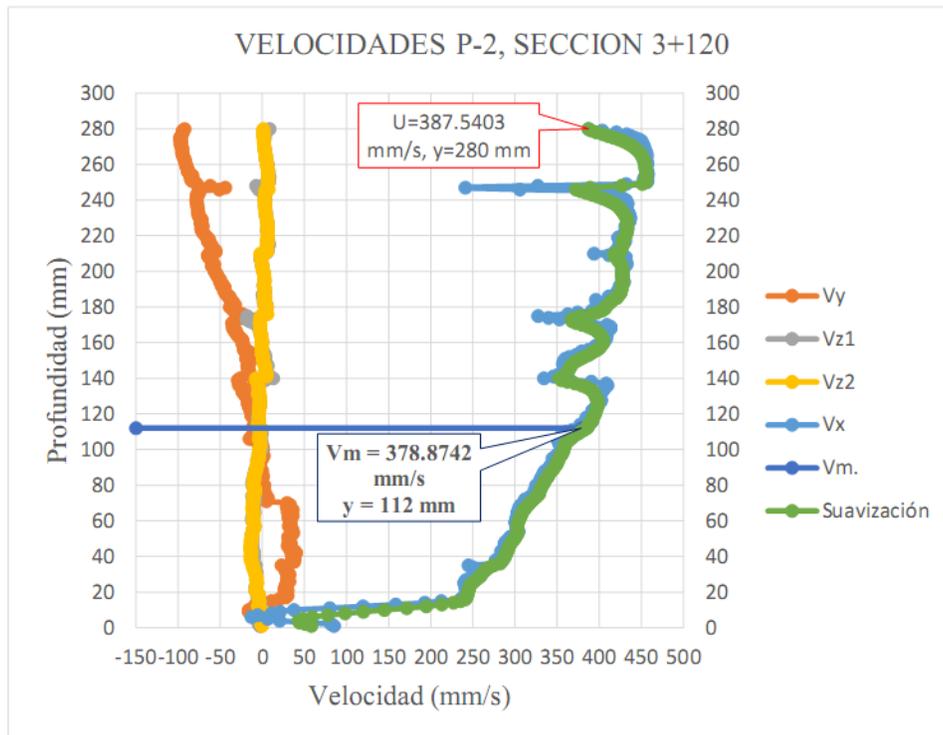


Figura 38. Perfil de velocidades 3D en el punto 2/sección 3+120 - zona de socavación, ensayo 1.

A partir de esta velocidad U de 38.8 cm/s, y teniendo en cuenta las propiedades de la madera y del agua que requieren las ecuaciones 7 y 5, se hallan las fuerzas de arrastre para cada clavija

con y sin disco respectivamente. Es oportuno mencionar lo afirmado por Braudrick y Grant (2001) acerca del ángulo horizontal (Θ) que forma la longitud del tronco y la dirección del flujo: “Una pieza de madera gira hasta obtener una orientación paralela al flujo, debido a que un extremo se mueve más rápido que el otro”. Por consiguiente, se tomaron ángulos conocidos de 0° a 90° tal como lo hicieron estos investigadores, para determinar las fuerzas de arrastre de las piezas de madera (tabla 22 y 23). También, se grafican las fuerzas de arrastre (F_d) de las piezas con y sin discos versus sus correspondientes diámetros (D_t). Cabe recalcar que, los diámetros están en relación a sus respectivas longitudes como 1 es a 13, o sea, la longitud de cada clavija es trece veces su diámetro.

Enfocándose al final de la curva en el punto 2, lugar de tránsito, se cuenta con la siguiente información: el calado es aproximadamente de 29.8 cm, cuyo perfil de velocidades en dirección x (perpendicular a la sección 3+120) presenta una velocidad media (V_m) de 37.9 cm/s.

Tabla 22. Fuerzas de arrastre (F_d) de las clavijas sin discos en el punto 2/sección 3+120, ensayo 1.

"Fd" - Punto 2, sección 3+120, S/R								
Tipo, Color	U (cm/s)	Fd (dinas)						
		$\Theta = 0^\circ$	$\Theta = 15^\circ$	$\Theta = 30^\circ$	$\Theta = 45^\circ$	$\Theta = 60^\circ$	$\Theta = 75^\circ$	$\Theta = 90^\circ$
1, Blanco gran.	38.8	478	2389	4138	5604	6689	7318	7448
2, Rosado	38.8	378	1890	3273	4432	5290	5787	5890
3, Celeste	38.8	213	1063	1841	2493	2976	3256	3313
4, Verde	38.8	147	737	1276	1728	2062	2256	2296
5, Blanco peq.	38.8	95	473	820	1110	1325	1449	1475

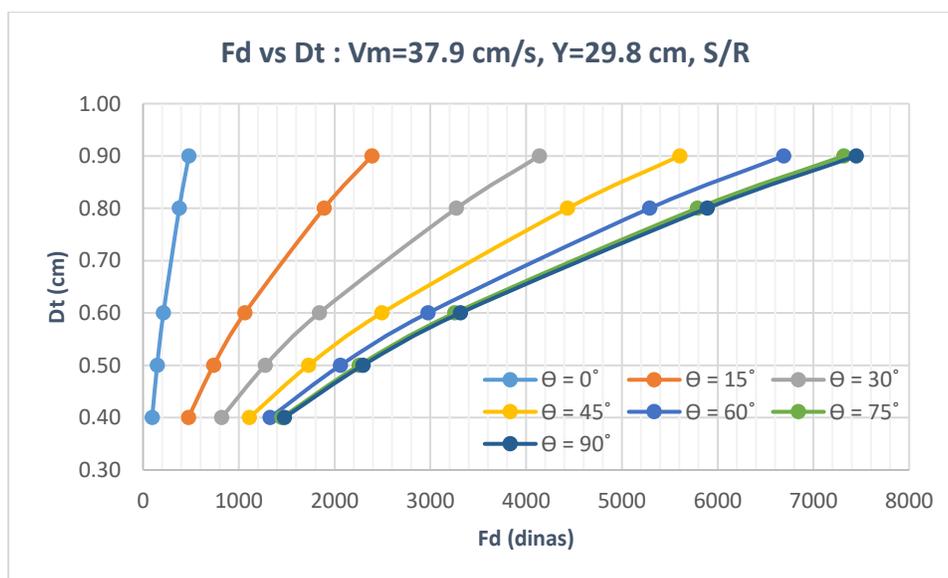


Figura 39. Gráfico F_d vs D_t de clavijas sin discos en el punto 2/sección 3+120, ensayo 1.

Las curvas, todas sin excepción, de la gráfica se ajustan a una polinómica de orden 2. Las piezas de cada tipo de clavija sin disco poseen mayor fuerza cuando son perpendiculares V_x ($\Theta = 90^\circ$); caso contrario sucede cuando, la longitud de la clavija es paralela a la dirección de V_x ($\Theta = 0^\circ$). Pero, como ya se indicó en la figura 36, la longitud de la pieza está a 90° con V_x , mas no con V_c . Por tanto, se puede concluir que la máxima fuerza (F_d) de cada pieza es levemente mayor a las calculadas en las tablas. Por ejemplo, de acuerdo a la tabla 22 la clavija más grande ($D_t = 0.9$ cm) es la que posee una fuerza máxima de 7448 dinas. Pero, si revisamos la figura 9A ó 10A, Θ es quien está 90° mas no Θ_c (figura 36), donde el ángulo es menor a 90° . De hecho, la fuerza de arrastre puede ser un poco más, mientras el ángulo Θ_c tienda a 90° ; ya que Θ_c es el ángulo en sí quien forma la dirección propia de V_c con la longitud de la pieza.

Tabla 23. Fuerzas de arrastre (F_d) de las clavijas con discos en el punto 2/sección 3+120, ensayo 1.

"Fd" - Punto 2, sección 3+120, C/R								
Tipo, Color	U (cm/s)	Fd (dinas)						
		$\Theta = 0^\circ$	$\Theta = 15^\circ$	$\Theta = 30^\circ$	$\Theta = 45^\circ$	$\Theta = 60^\circ$	$\Theta = 75^\circ$	$\Theta = 90^\circ$
1, Blanco gran.	38.8	3136	5968	8394	10248	11403	11781	11357
2, Rosado	38.8	2197	4401	6305	7780	8724	9074	8805
3, Celeste	38.8	1236	2475	3546	4376	4907	5103	4952
4, Verde	38.8	1060	1944	2696	3264	3609	3709	3556
5, Blanco peq.	38.8	774	1352	1839	2199	2410	2457	2337

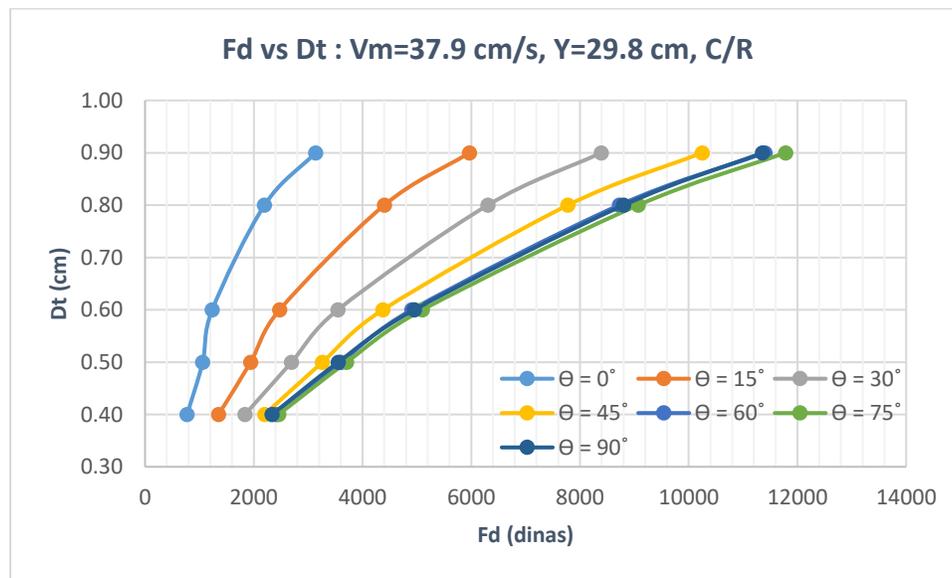


Figura 40. Gráfico F_d vs D_t de las clavijas con discos en el punto 2/sección 3+120, ensayo 1.

Nota: El diámetro (D_t) de 0.9 cm pertenece al color blanco gran., el 0.8 cm al rosado, el 0.6 cm al celeste, el 0.5 cm al verde y el 0.4 cm al blanco peq.

Las curvas de esta gráfica y de todas en general se ajustan, igualmente, a una polinómica de orden 2. En este caso, una clavija con disco posee mayor fuerza cuando su ángulo Θ es igual a 75° . En cambio, una clavija presenta menor fuerza cuando su ángulo Θ es menor a 75° y también cuando Θ es mayor a 75° . Caso opuesto a las clavijas sin discos, ya que la máxima fuerza (F_d) de cada pieza con disco ya no se incrementa cuando Θ tiende a 90° .

De acuerdo a ambas gráficas F_d vs D_t se puede observar que una clavija pequeña puede presentar mayor fuerza de arrastre que otras de mayor tamaño; siempre y cuando, el ángulo Θ de la clavija pequeña sea mayor al ángulo de las clavijas de mayor tamaño.

La línea B en la imagen 29-4 ha logrado alejarse del eje, arribando a la orilla derecha a la altura de la sección 2+160. Además, la línea M se ha entremezclado con sus líneas vecinas A y B, siendo ya no visible. Por último, la línea C lleva gran ventaja de casi 8 metros a la línea B, pero no ha logrado atravesar el ancho del canal; a los que se mantiene recién cruzando el eje del canal en la sección 2+640. Tener en cuenta que, estos hechos ocurrieron en menos de 1 minuto durante el ensayo; tiempo en que, la línea C logra entrar al tramo curvo por la orilla izquierda y luego cruzar hasta llegar a la orilla derecha pasando por el final de la curva.

La línea C en la imagen 29-5 ha logrado cruzar todo el ancho del canal, arribando a la orilla derecha a la altura de la sección 2+880; a 3 metros antes del término del tramo curvo (sección 3+120). Todas las líneas se encuentran ya en la orilla derecha en poco menos de 1 minuto. En este tiempo la línea A ha recorrido sólo 13 metros, siendo la más lenta; la línea B lleva un aproximado de 8 metros de ventaja a la línea A, y 8 metros de desventaja con respecto a la línea C. Además, la línea C a pesar de ser la más veloz fue la que más tardó en llegar al lado derecho; la razón es por ubicarse en la orilla opuesta.

En la imagen 29-6 se aprecia la formación de una línea final mixta (combinación de las líneas A, M, B, N y C) conforme han llegado al lado cóncavo. Después, las clavijas de la línea mixta en su mayoría siguen una trayectoria aproximada entre cada punto 1 las secciones y la orilla. De ahí que, el comportamiento de las fuerzas de arrastre de las clavijas se analiza a lo largo de cada punto 1 en la curva; pues estas serán las que interactúen con los espigones ELJ. Frente a lo mencionado, se creyó conveniente tomar las clavijas con discos, por ser las que mayor fuerza generan, sobre todo cuando poseen un ángulo Θ de 75° . Además, se eligió los puntos 1, porque entre estos quedarán ubicadas entre los espigones. De manera que, este trabajo exploratorio

queda más detallado al notar la diferencia entre el comportamiento de las piezas cuando transitan por la curva de forma libre, y luego en presencia de espigones ELJ.

Tabla 24. Fd máximas de clavijas con disco que transitan a lo largo de los puntos 1 de cada sección, ensayo 1.

Sección Punto 1	U (cm/s)	Long tramo (m)	Long curva (m)	Fd (dinas), $\Theta=75^\circ$, C/R				
				1, Blanc gran.	2, Rosado	3, Celeste	4, Verde	5, Blanc peq.
1+200	25.9	0.00	0.00	5280	4067	2287	1662	1101
1+440	27.6	4.59	4.59	5959	4589	2581	1876	1243
1+680	32.2	4.33	8.91	8120	6254	3517	2556	1693
1+920	35.5	4.26	13.17	9875	7605	4277	3109	2060
2+160	35.1	4.31	17.48	9678	7454	4192	3047	2019
2+400	36.8	4.39	21.87	10603	8166	4593	3338	2211
2+640	40.5	4.43	26.30	12867	9910	5574	4051	2684
2+880	43.9	4.41	30.71	15146	11665	6561	4768	3159
3+120	47.5	4.21	34.92	17677	13614	7657	5565	3687

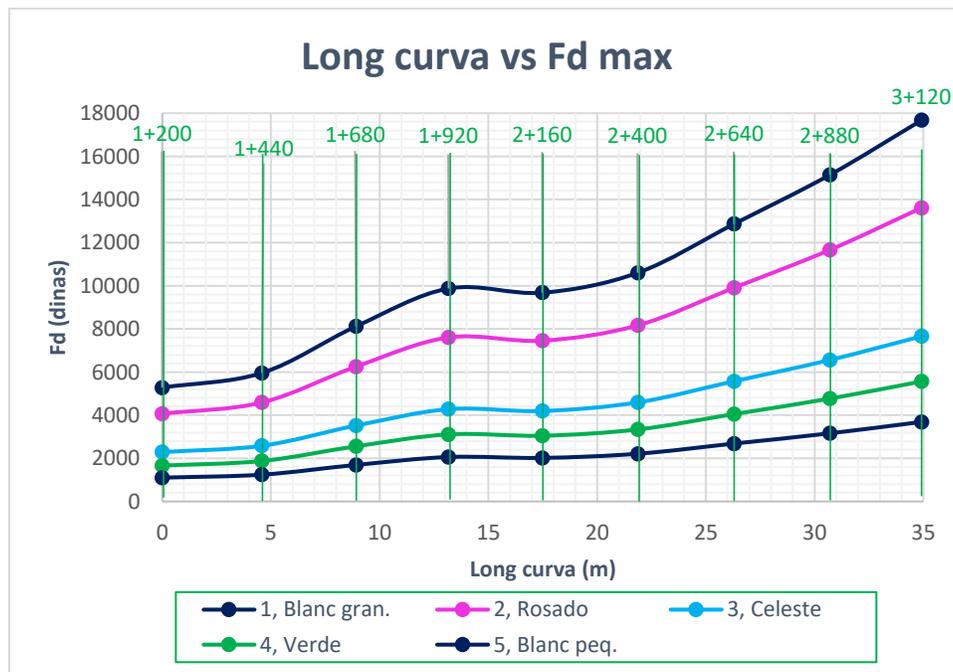


Figura 41. Longitud de la curva en los puntos 1 vs Fd máximas de clavijas con disco, ensayo 1.

4.2. Ensayo N°2 con espigones ELJ

El ensayo se realizó el 20 de diciembre del 2016, para el cual, se emplearon 11 espigones ELJ y un caudal máximo de 466 Lt/s (12997 m³/s en prototipo). En este segundo experimento se colocaron espigones ELJ con un radio de curvatura Rc1 de 25 m y otro Rc2 de 15 m. Los ángulos de orientación del primer y último espigón fueron de 120°, y el resto fue de 90° (ver detalles en el plano 3/4 de anexos). En este ensayo se diseñó a los espigones con un borde libre promedio de 3 cm (2 m en prototipo).

4.2.1. Trayectorias y fuerzas de arrastre de las clavijas

Las trayectorias de las piezas de madera se registraron a partir de los datos tomados en campo, del mismo modo que el ensayo anterior. Además, a las áreas hidráulicas se los asumen como si no fueran afectadas por las áreas laterales de los espigones ELJ, debido a la alta permeabilidad.

Tabla 25. Áreas hidráulicas y velocidades medias en el tramo curvo del ensayo 2.

Sections	Areas (m2)	Vm (mm/s)
1+200	1.40	274.44
1+440	1.30	290.79
1+680	1.13	333.62
1+920	1.08	385.08
2+160	1.03	381.08
2+400	1.06	407.25
2+640	1.08	401.82
2+880	1.06	379.57
3+120	1.05	414.40
Promedio	1.13	363

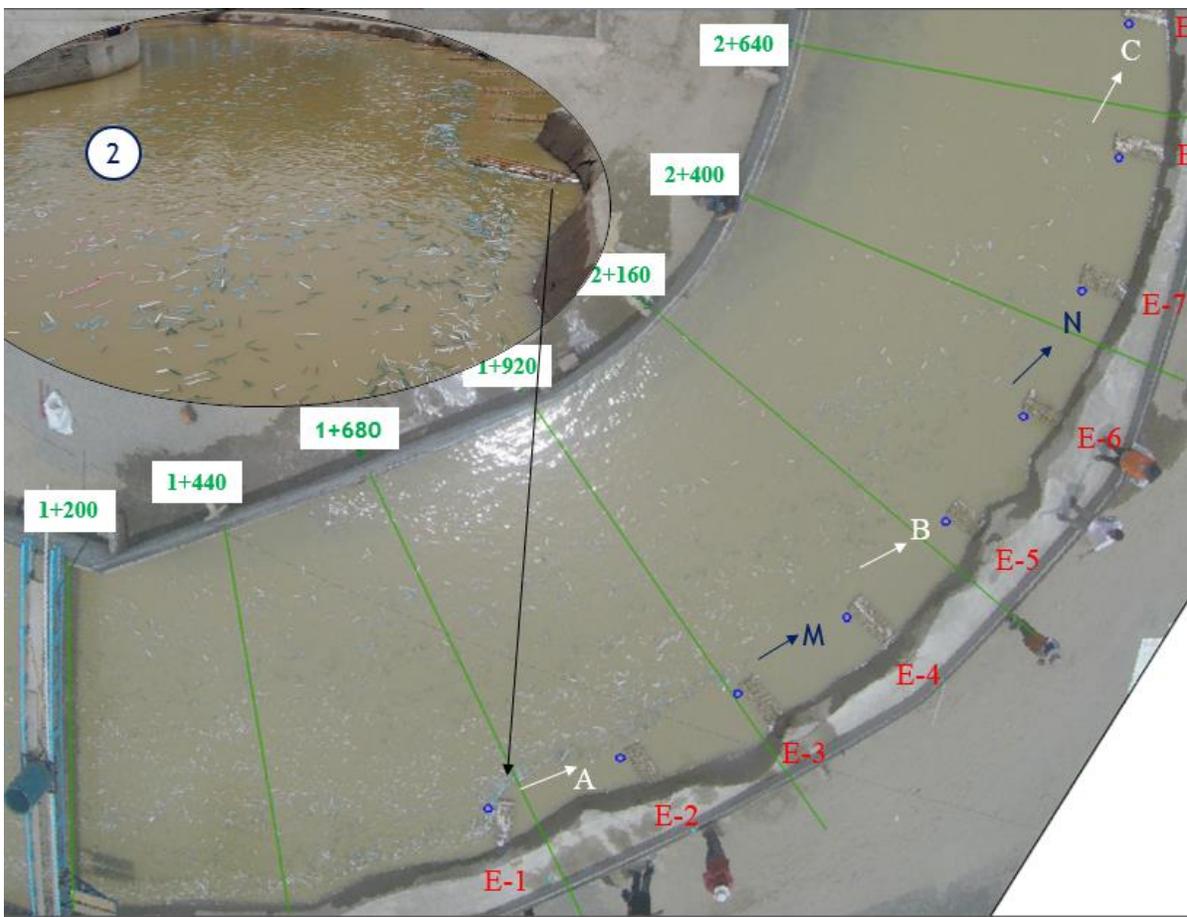
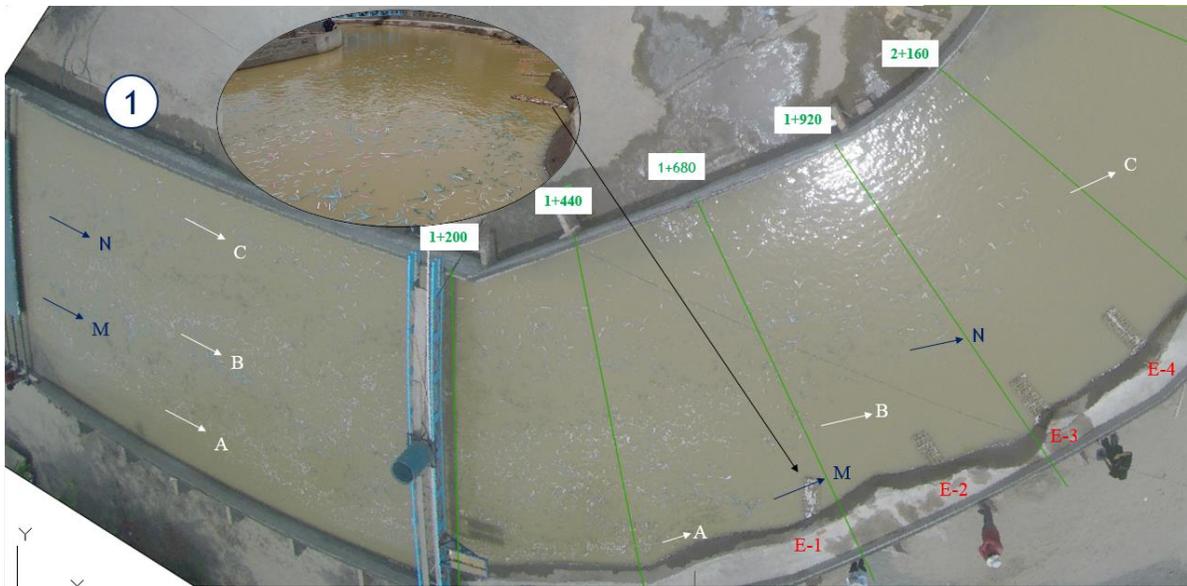
Del área de 1.13 m² y la longitud curva aproximada de 32 m se tiene un volumen de 36.25 m³. Este volumen multiplicado por la densidad del agua de 1000 kg/m³ estima una masa (m) de 36245 kg de agua en la curva. Además, el radio de curvatura (r) es de 16.21 m, y el promedio de las velocidades medias (Vm) de la tabla última es de $u = 0.363$ m/s. Luego la fuerza centrífuga a partir de tales datos es de:

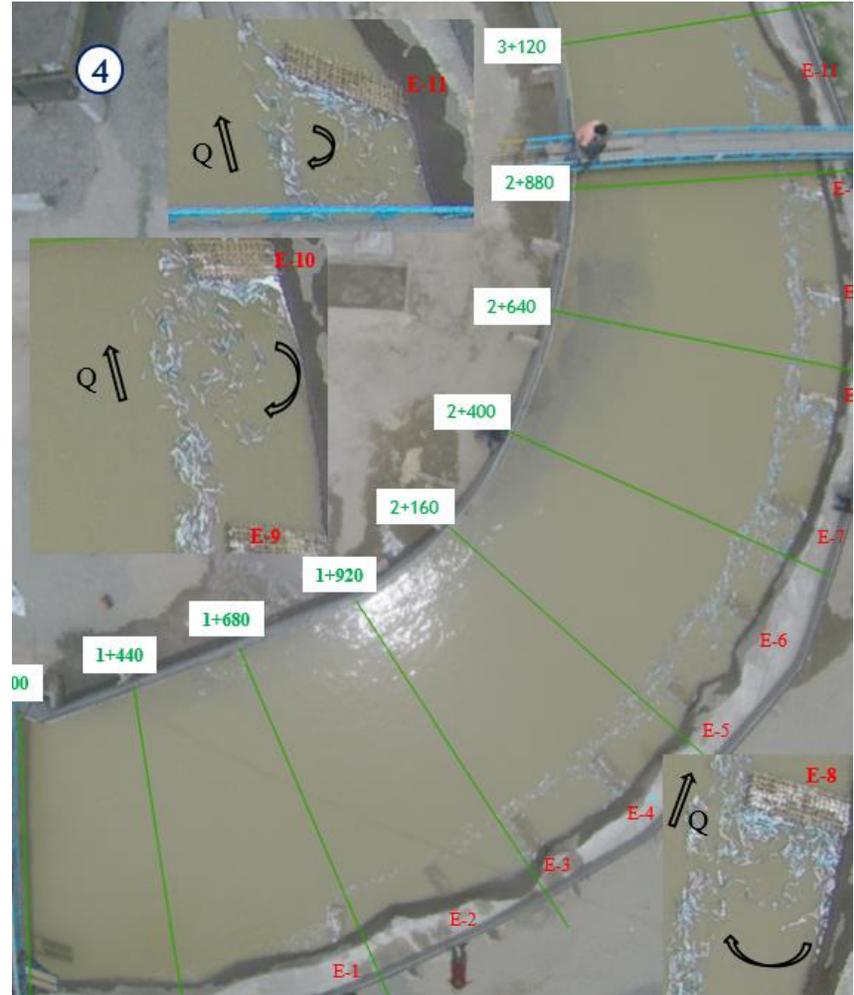
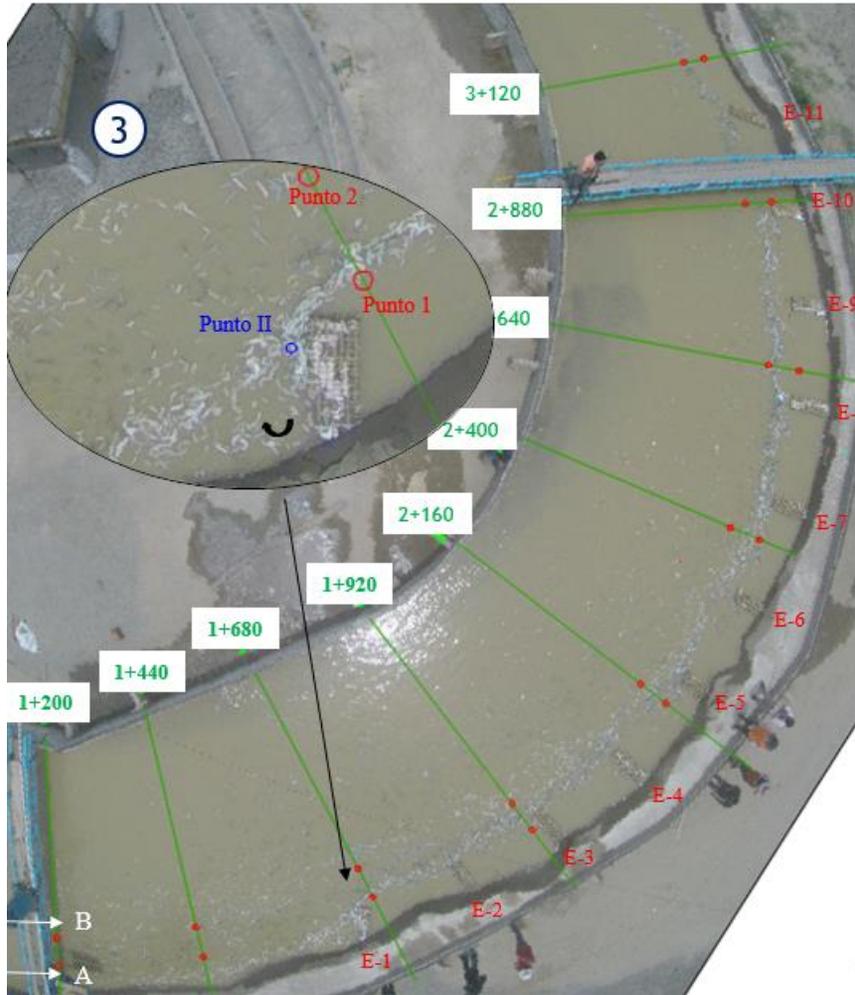
$$F_c = \frac{mu^2}{r} = 0.295 \text{ KN}$$

Los acontecimientos desarrollados bajo esta fuerza centrífuga de 0.295 KN y un número de froude de 0.293 se describen a continuación:

Al igual que el ensayo 1, el avance de las líneas de clavijas arrojadas al canal varió a lo largo del tramo recto. Es decir, las líneas del lado izquierdo, nuevamente, tuvieron un avance gradualmente mayor a las del lado derecho. Más adelante, una vez ingresado las clavijas a la curva, el avance de las líneas a la izquierda fue muy superior a las de la derecha. Por ejemplo, como lo muestra la imagen 30-1, cuando la línea C alcanza la sección 2+160 ya en el centro del canal; recientemente, la línea M se encuentra arribando al espigón 1 (E-1). Cabe indicar que, la línea M es la primera en impactar con un espigón (E-1) en un tiempo de 23 segundos después de haber ingresado a la curva. A la vez, la línea A por detrás de M se encuentran dando inicio a la formación de una línea única o mixta.

En la imagen 30-2 se observa que la línea C se encuentra arribando hacia el lado derecho, incluso pasa muy cerca del espigón 8. También, se nota a la línea N arribando muy cerca al E-6, la línea B al E-4, la línea M al E-3 y la línea A muy retrasada está siendo recientemente desviada por el E-1. Mientras tanto el E-1, cuyo ángulo de orientación es 120° , ocasiona que las líneas A y M sean desviados en dirección hacia el eje o la izquierda del canal, iniciando el entremezclado de las líneas de clavijas en un tiempo más apresurado que sin la presencia de estas estructuras. Por otro lado, los puntos azules que muestran esta imagen están ubicados a una distancia de 10 cm antes de la cara de cada espigón (leer acápite de toma de velocidades); esto con el fin de medir las velocidades para estimar las fuerzas con las que impactarían las clavijas en los espigones. Tener en cuenta que, los puntos azules indican el punto número II de los IV ubicados 10 cm antes de cada espigón. Además, cada punto II se ubica a una distancia 2d de la orilla derecha (ver **figura 35**).





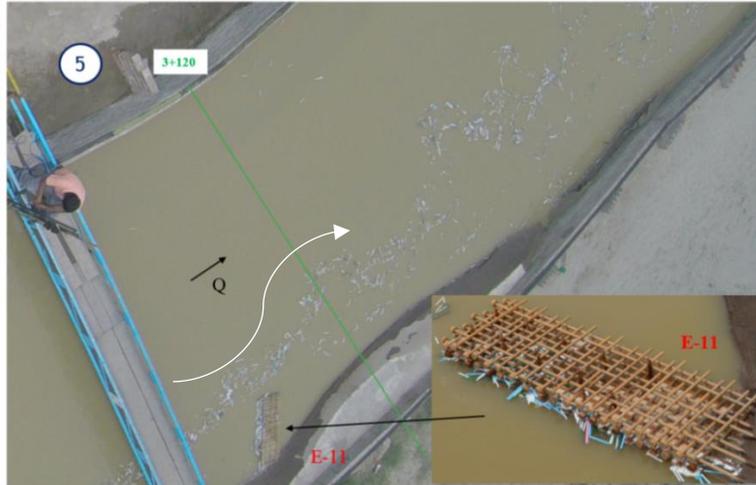


Imagen 30. Vista en planta del proceso de transporte de clavijas en presencia de espigones ELJ en el ensayo2.

En la imagen 30-3 se observa que todas las líneas han formado una sola fila, transitando a través de puntos rojos del lado derecho que pertenecen a cada sección. Los puntos rojos alineados indican los puntos 1 y 2 de los 6, mostrados anteriormente, donde también se midieron las velocidades. Los puntos 1 y 2 de cada sección se eligieron por ser el lugar por donde transitan la mayoría de las clavijas impulsadas por la fuerza centrífuga, además de ser los puntos más próximos al límite y confinamiento entre el flujo principal y flujos rotatorios entre espigones. Podemos decir que, tal límite es la nueva orilla formada por un trazo imaginario a ras de las cabezas de los espigones. Pues, cada punto 1 se colocó a la derecha de este trazo (zona de espigones) y cada punto 2 a la izquierda (zona del flujo principal).

En la imagen 30-3, también, se aprecia que: las clavijas logran impactar directamente en el E-1 de una forma muy desordenada, como se nota en el punto II de color azul. Así que, se estimaron fuerzas de arrastre en función de diferentes ángulos entre la longitud del tronco y dirección del flujo, y las velocidades registradas en este punto. Enseguida, el E-1 desvía hacia la izquierda gran cantidad de estas clavijas, alejándolos del ingreso al espacio entre el E-1 y E-2. Así mismo, algunas piezas que impactan sobre el E-1 logran ser desviadas hacia la orilla derecha, donde forman recirculaciones momentáneas (ver flecha curva de color negro). Cabe precisar que las líneas A y M son las únicas que logran impactar con el E-1.

El análisis se enfocó primordialmente en las máximas fuerzas de arrastre de las clavijas con disco; por poseer mayores fuerzas, a diferencia de las piezas sin disco. Pues, las clavijas con disco representarían en prototipo el caso más riesgoso con respecto al impacto en los espigones.

Es probable que, las cabezas de los espigones no solo estén expuestas al choque del flujo sino, también, al choque por parte del material leñoso flotante. De darse enormes impactos por parte de ambos sobre los lados anteriores de los espigones ELJ, podrían desestabilizar y hacer que colapsen las estructuras sin necesariamente ocurrir atascos y acumulaciones de restos leñosos. Como se sabe, las clavijas con discos contienen sus máximas fuerzas cuando están posicionados a un ángulo Θ de 75° con la dirección del flujo. Por tanto, bajo estas circunstancias se muestran en la tabla 26 y 27 con sus respectivas gráficas, las fuerzas de las clavijas con discos que transitan por los puntos 1 y 2.

Tabla 26. Fd máximas de clavijas con disco que transitan a lo largo de la curva por los puntos 1 de cada sección, ensayo 2.

Sección Punto 1	U (cm/s)	Long tramo (m)	Long curva (m)	Fd (dinas), $\Theta=75^\circ$, C/R				
				1, Blanc gran.	2, Rosado	3, Celeste	4, Verde	5, Blanc peq.
1+200	18.6	0.00	0.00	2718	2093	1177	856	567
1+440	20.3	4.59	4.59	3228	2486	1398	1016	673
1+680	13.6	4.33	8.91	1441	1110	624	454	301
1+920	4.7	4.26	13.17	175	134	76	55	36
2+160	9.7	4.31	17.48	743	572	322	234	155
2+400	10.7	4.39	21.87	906	697	392	285	189
2+640	5.9	4.43	26.30	274	211	119	86	57
2+880	8.8	4.41	30.71	611	471	265	192	127
3+120	18.1	4.21	34.92	2574	1983	1115	810	537

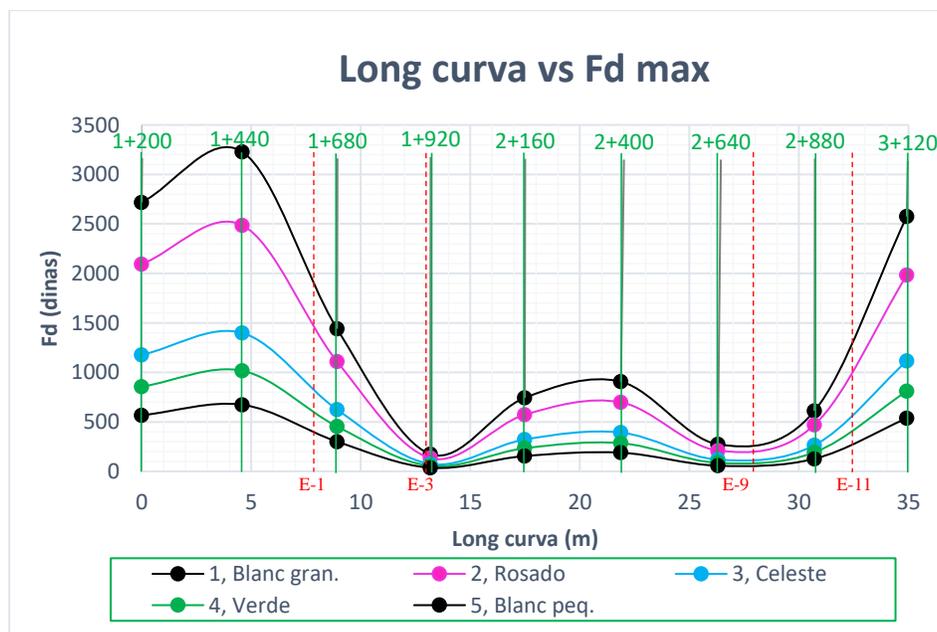


Figura 42. Longitud de la curva por los puntos 1 vs Fd máximas de clavijas con disco, ensayo 2.

Basándose en los resultados de esta gráfica, las menores fuerzas de las clavijas que transitan por los puntos 1 ocurren en los espigones de en medio. Además, las clavijas que logran desviarse hacia la orilla derecha bajan aún mucho más sus velocidades, por ende, también sus fuerzas (Fd). Lo que es lo mismo, las fuerzas con las que chocan las clavijas a los espigones extremos son muy fuertes con respecto al resto. Sobre todo, el E-1 que es la estructura que tuvo que resistir el impacto simultáneo y desordenado de una gran cantidad de clavijas.

Tabla 27. Fd máximas de clavijas con disco que transitan a lo largo de la curva por los puntos 2 de cada sección, ensayo 2.

Sección Punto 2	U (cm/s)	Long tramo (m)	Long curva (m)	Fd (dinas), $\theta=75^\circ$, C/R				
				1, Blanc gran.	2, Rosado	3, Celeste	4, Verde	5, Blanc peq.
1+200	26.6	0.00	0.00	5560	4282	2409	1750	1160
1+440	26.5	4.39	4.39	5527	4257	2394	1740	1153
1+680	29.0	4.11	8.50	6595	5079	2857	2076	1375
1+920	37.2	4.05	12.55	10838	8347	4695	3412	2261
2+160	42.6	4.11	16.66	14207	10942	6154	4473	2963
2+400	44.8	4.18	20.84	15746	12127	6821	4957	3284
2+640	40.6	4.22	25.07	12920	9950	5596	4067	2695
2+880	46.4	4.21	29.28	16884	13003	7314	5315	3521
3+120	44.2	4.10	33.38	15292	11778	6624	4814	3189

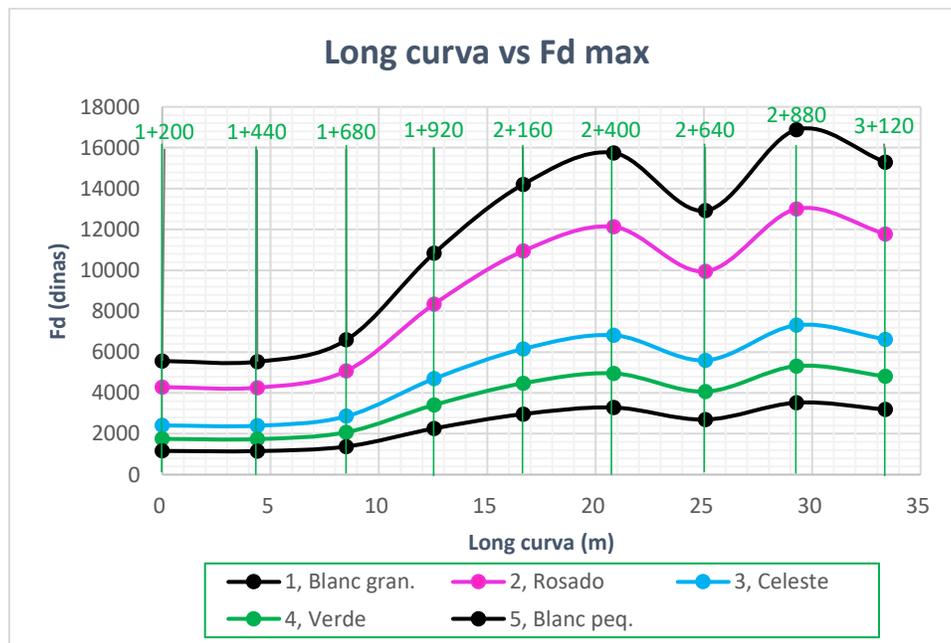


Figura 43. Longitud de la curva por los puntos 2 vs Fd máximas de clavijas con disco, ensayo 2.

De acuerdo con esta gráfica, la fuerza de una pieza se incrementa levemente desde 5560 dinas (0.06 Newton) en la sección donde inicia la curva a una cantidad de 6595 dinas (0.07 N) en la

sección 1+680 (a la altura del E-1). Luego, las piezas que lograron transitar por los puntos 2 incrementaron sustancialmente su fuerza hasta las casi 17000 dinas (0.17 N) en la sección 2+880 (a la altura del E-10). Pero por algún motivo desconocido se tiene antes del 2+880 un receso en la sección 2+640; finalmente, al término de la curva (3+120) esta fuerza disminuye. Por consiguiente, las velocidades, así como las fuerzas aumentan por la disminución del área hidráulica que ocasiona la presencia de los espigones.

De la figura 42 se deduciría que: las mayores fuerzas con las que impactan las clavijas ocurren sobre el primer y último espigón. Además, como se observa en la imagen 30-3, el primer espigón es quien recibe directamente los impactos de este material flotante. Debido a que, el lado aguas arriba del E-1 esta libremente expuesto a cualquier choque, a diferencia del último (E-11) que está protegido por el E-10 y así sucesivamente. Se muestran a continuación, las fuerzas en el punto II con las que impactarían cada tipo de clavija sobre el E-1.

Tabla 28. Fuerzas de arrastre de clavijas sin disco que impactan sobre el E-1, ensayo 2.

"Fd" - Punto II, E-1, S/R								
Tipo, Color	U (cm/s)	Fd (dinas)						
		$\theta = 0^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 75^\circ$	$\theta = 90^\circ$
1, Blanco gran.	20.1	129	643	1113	1507	1799	1968	2003
2, Rosado	20.1	102	508	880	1192	1423	1556	1584
3, Celeste	20.1	57	286	495	671	800	875	891
4, Verde	20.1	40	198	343	465	555	607	617
5, Blanco peq.	20.1	25	127	220	298	356	390	397

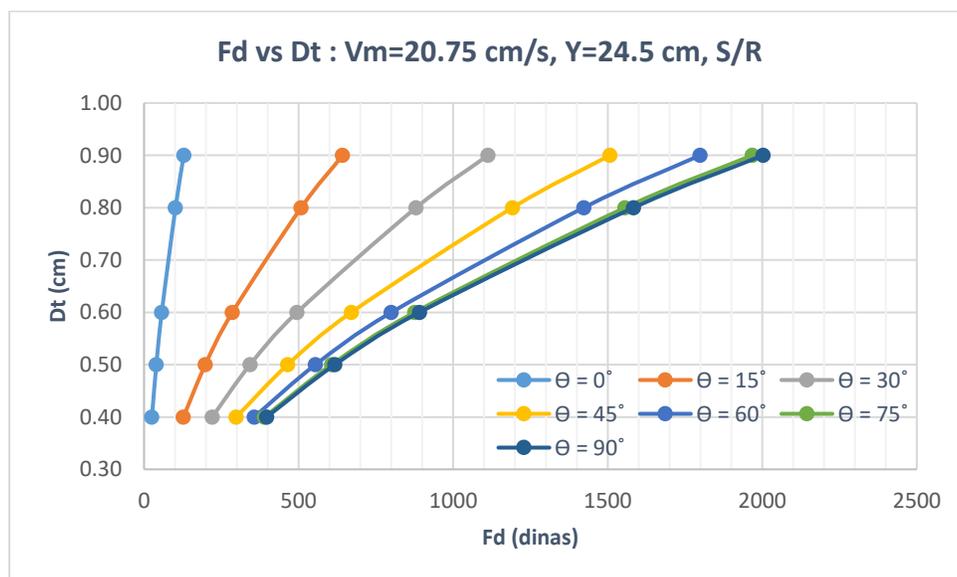


Figura 44. Gráfica Fd vs Dt de clavijas sin discos en E-1, ensayo 2.

Tabla 29. Fuerzas de arrastre de clavijas con disco que impactan sobre el E-1, ensayo 2.

"Fd" - Punto II, E-1, C/R								
Tipo, Color	U (cm/s)	Fd (dinas)						
		$\theta = 0^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 75^\circ$	$\theta = 90^\circ$
1, Blanco gran.	20.1	843	1605	2257	2756	3067	3168	3054
2, Rosado	20.1	591	1184	1696	2092	2346	2440	2368
3, Celeste	20.1	332	666	954	1177	1320	1372	1332
4, Verde	20.1	285	523	725	878	971	997	956
4, Verde	20.1	208	364	494	591	648	661	628

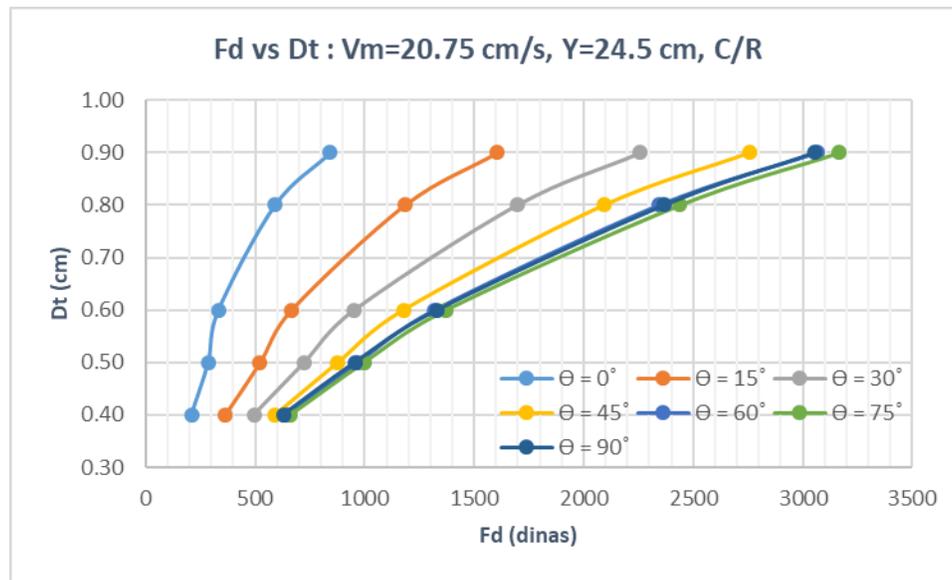


Figura 45. Gráfica Fd vs Dt de clavijas con discos en E-1, ensayo 2.

Las fuerzas que muestran las gráficas 44 y 45 pertenecen a cada tipo de clavija en tránsito por el punto II, cuya ubicación fue a 0.87 m de la orilla, para luego impactar en el extremo libre del espigón E-1 de 0.94 m de longitud. No obstante, se consideró obviar las gráficas de las fuerzas de impacto sobre el resto de los espigones, por ser similares y representar menor riesgo con respecto al primer espigón (E-1). Las dimensiones de todos los espigones se muestran al detalle en los planos de los anexos. Es importante mencionar que, las clavijas que ingresaron a los espacios entre espigones no fueron las primeras de cada línea, sino las posteriores. Pues, las piezas que llevaron la delantera, en su mayoría, pasaron de frente en dirección hacia aguas abajo (imagen 30-3).

El ingreso de las clavijas a los espacios entre espigones se observó cuando: “Por un lado, una cierta cantidad de clavijas después de chocar con el lado anterior del extremo libre de los espigones, fueron desviados hacia la orilla derecha o cóncava. Por otro lado, las clavijas

ingresaron a esta zona al ser arrastradas por pequeños vórtices intermitentes generados en las cabezas de los espigones”. Luego, todas estas clavijas formaron trayectorias circulares o recirculaciones (ver flechas curvas negras en la imagen 30-4), a causa de grandes remolinos originados momentáneamente entre los espacios entre espigones. Tales recirculaciones desaparecieron rápidamente por lo siguiente: “Por un lado, la mayoría de clavijas por efectos del mismo movimiento giratorio fueron devueltas hacia el flujo principal o convencional. Después, algunas clavijas que salieron de un espacio entre espigones, nuevamente, lograron ingresar al siguiente. Pues, estas piezas fueron colisionadas por otras que arribaron por el lado izquierdo impulsadas por la fuerza centrífuga; y/o piezas que fueron arrastrados nuevamente por los pequeños vórtices ya mencionados. Por otro lado, las recirculaciones iban desapareciendo debido a la alta permeabilidad de los espigones, ya que las clavijas fueron presionadas hacia aguas abajo, o sea, hacia el lado anterior de la estructura”.

Finalmente, a partir del último espigón que se aprecia en la imagen 30-5 se tiene: la línea final (combinación de las líneas A, M, B, N y C) empieza a oscilar formando una trayectoria ondulatoria; debido al enorme incremento de la velocidad alrededor de la cabeza del E-11 que genera una macroturbulencia e intensifica el fenómeno de vorticidad en la zona.

4.2.2. Atasco y acumulación de clavijas en el sistema conformado de 11 espigones ELJ

El número de clavijas que se atascaron dentro del entramado de los espigones fueron incrementándose: desde las de mayor longitud a las de menor, desde las que arribaron con un ángulo de $\Theta=0^\circ$ a las de $\Theta=90^\circ$, y desde las que poseyeron discos más pequeños a las más grandes. Esto significa que, mientras más grandes fueron las clavijas hubo mayor dificultad de ingresar al entramado, ya que las longitudes tienden a ser mayores a los espacios libres del entramado. También, mientras el eje de las clavijas, al momento de arribar al espigón, se inclinó a ser paralelo al flujo ($\Theta \rightarrow 0^\circ$) hubo mayor facilidad de ingresar dentro del entramado; siempre y cuando, la clavija no impacte con una de las varillas de madera o grandes discos que conforman al espigón ELJ. También, mientras más grande fue el disco de la clavija hubo mayor posibilidad de engancharse en los troncos (varillas empotradas y pilotes) y raíces (discos grandes) del espigón ELJ.

Una vez que, las clavijas se atascaron y sellaron los vacíos del entramado al nivel del agua; estas piezas fueron al instante presionadas por las otras que arribaron posterior y

consecutivamente. Después, las clavijas fueron desviadas hacia la orilla, formando acumulaciones momentáneas de diferente geometría (imagen 31). Pues, las acumulaciones fueron desapareciendo paulatinamente, ya que las corrientes de los remolinos originados en los espacios entre espigones arrastraron a la mayoría de clavijas, devolviéndolas al flujo principal.

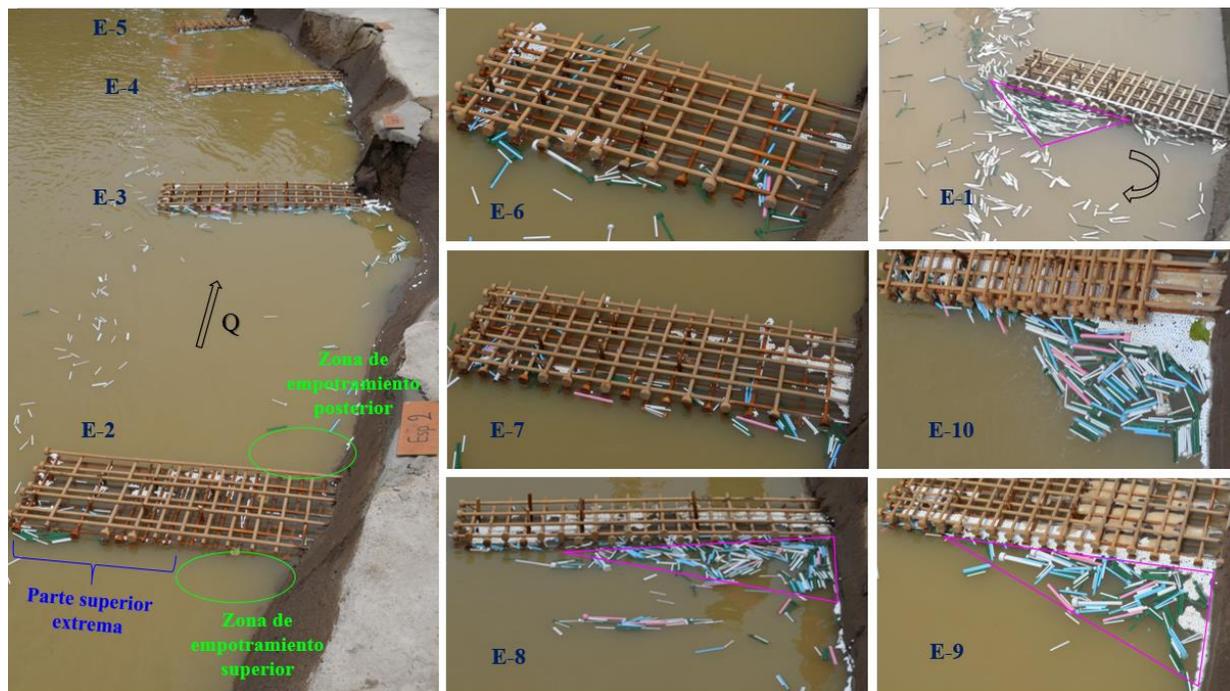


Imagen 31. Atascos y acumulaciones de clavijas en el sistema de espigones ELJ, ensayo 2.

Las formaciones de acumulaciones iniciaron una vez sellados los vacíos del entramado; porque las piezas flotantes posteriores en arribar fueron inmediatamente desviadas hacia las zonas de empotramiento anterior. En algunos espigones ELJ, las clavijas que lograron ingresar a estas zonas formaron acumulaciones geométricas visibles por un tiempo máximo de 30 minutos. Cabe indicar que, el E-2 no formó parte de tal suceso, ya que el primer espigón desvió a la mayoría de las directamente hasta el E-3 en adelante.

Las primeras clavijas en impactar con el E-1 formaron una considerable acumulación fugaz de forma triangular en su lado anterior del extremo libre (imagen 31/E-1). En este espigón no se formó acumulaciones en la zona de empotramiento, porque el gran remolino formado en tal zona arrastró con facilidad a cada pieza que ingresaba devolviéndola al flujo principal. Por otro lado, los vórtices turbulentos originados en la cabeza del E-1 hicieron que las piezas, casi en su totalidad, de las líneas A y M fueran desviadas directamente hacia el E-3. De tal modo que fueron sólo muy pocas piezas que lograron quedarse en el E-2. Las acumulaciones de clavijas

en el E-3, E-4 y E-5, cuya longitud lateral aguas arriba de 1.25, 1.20 y 0.78 m respectivamente, fueron mínimas, sin forma y desaparecieron muy rápido (imagen 31, fotografía izquierda). La cantidad de clavijas que ingresaron en los E-6 y E-7, a pesar de ser mayores, tendieron más a formar recirculaciones en los espacios que acumularse en las laterales. Las clavijas ingresaron fácilmente a los entramados e incluso algunas piezas sin discos lograron atravesar las estructuras de permeabilidad más alta de 35%, tal como se observa en la imagen 31/E-6. En las estructuras E-8, E-9 y E-10 se formaron grandes acumulaciones, siendo dos de forma triangular rectángula y la tercera trapezoidal respectivamente. Esto se puede observar en las líneas de color magenta al costado de las estructuras mencionadas de la imagen 31. Por último, el comportamiento del E-11 fue similar a la primera por ser extremos y tener el mismo ángulo de orientación de 120°. Con la diferencia de que, las clavijas no llegaron directamente en gran cantidad y no se acumularon momentáneamente en el extremo libre.

La cantidad de clavijas que quedaron atrapadas (tanto atascadas en el entramado y asentadas en las zonas de empotramiento) en cada estructura se detalla en el cuadro siguiente:

Tabla 30. Número de clavijas atrapadas en cada espigón ELJ, ensayo 2.

ESPEIGON		E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	E-8	E-9	E-10	E-11
Clavijas con discos (C/R)	Blanco peq.	40	12	19	18	4	11	15	18	11	20	13
	Verde	11		4	14	2	9	7	20	11	17	1
	Celeste	1		2	4	2	1	2	13	8	8	8
	Rosado			1						1		
	Blanco gran.			1	1							
Clavijas sin discos (S/R)	Blanco peq.	71	52	51	60	7	8	20	56	14	55	8
	Verde	24	5	27	38	14	14	17	30	6	29	7
	Celeste	2		5	5	4	3	12	13	8	7	7
	Rosado			2			2	2		1	2	
	Blanco gran.							1	1		1	3
Cantidad parcial		149	69	112	140	33	48	76	151	60	139	47
Porcentaje parcial		1.16%	0.54%	0.87%	1.09%	0.26%	0.37%	0.59%	1.17%	0.47%	1.08%	0.37%

Del total clavijas que fueron arrojadas (12864 unidades) quedaron atrapadas mediante cantidades parciales en cada espigón como lo indica la tabla 30. La suma total de clavijas atrapadas fue de 1024 piezas. El porcentaje total que se atascó y acumuló en el sistema de espigones ELJ fue de un 7.96% del total de clavijas. La estructura E-11 junto al E-6 y el E-5 fueron quienes retuvieron la cantidad mínima de 47, 48 y 33 clavijas respectivamente. El

número de piezas atrapadas en el resto de espigones fue desde 60 hasta 151. El espigón E-8 fue la estructura que más piezas captó, sin embargo, las 151 clavijas retenidas aun representan un porcentaje ínfimo de 1.17% del total.

4.2.3. Efectos de las clavijas atrapadas en el sistema conformado de 11 espigones ELJ

Al descender el nivel del agua, después de terminado el ensayo ocurrió lo siguiente: pocas clavijas quedaron atascadas, **solamente** a la altura donde alcanzó el nivel de agua, dentro del entramado de los espigones. Algunas piezas con disco que no pudieron ingresar al entramado quedaron enganchadas en los troncos principales de los espigones. Es decir, las piezas quedaron colgadas mediante el enganche de sus discos en forma vertical tal como se observa en la línea verde aguas arriba en la imagen 32. Otras cuantas clavijas que quedaron flotando en las zonas de empotramiento al descender el nivel del agua se asentaron y adhirieron fuertemente con el material del lecho.



Imagen 32. Disposición final de las clavijas atascadas dentro del entramado del espigón 7, ensayo 2.

Como las clavijas quedaron atascadas en muy pequeña cantidad al nivel donde alcanzó el agua; entonces, la permeabilidad de los espigones no sufrió alteraciones en gran magnitud. Por hipótesis se supuso que se formarían grandes acumulaciones de clavijas, que cubriesen casi toda las caras laterales de los espigones, ocasionado fuertes cambios en la morfología del cauce, tal como ocurre en los ríos de montaña. Por otra parte, una considerable socavación se observó en las bases de los extremos libres de los espigones; pero en ello poco o casi nada tuvo influencia la baja acumulación de clavijas.

En base a esto y lo analizado por Jacay (2019) se afirma: “La principal fuerza desestabilizadora que afecta a los espigones ELJ es la de arrastre por parte del flujo, que incluso es muy superior

a la de empuje, a las que impacta los troncos leñosos flotantes, entre otros”. En vista que, la permeabilidad lateral de los espigones, el cual son casi perpendicular a la dirección del flujo, no es afectada en gran magnitud por la baja acumulación y atasco de una capa delgada al nivel del agua. Por tanto, la estabilidad de los espigones ELJ no dependió del material leñoso en tránsito, al menos como queda demostrado en modelo físico. Ahora bien, según Jacay (2019): “la estabilidad total no se logrará sino se adiciona miembros (troncos de árboles) secundarios incrustados en el talud, más pilotes y/o algún material de lastre. Desde esta perspectiva, si no se posee los materiales suficientes, se recomienda utilizar los espigones fabricados con troncos en ríos de menor envergadura”.

4.3. Ensayo N°3 sin espigones ELJ

El ensayo sin espigones ELJ se realizó el 26 de enero del 2017, para el cual, se empleó un caudal máximo de 514 Lt/s (14341 m³/s en prototipo) que corresponde a un Tr de 50 años.

4.3.1. Trayectorias y fuerzas de arrastre de las clavijas

Las clavijas en este ensayo fueron arrojadas de manera muy desordenada, o sea ya no se colocaron sobre la faja ordenadamente, así que no hubo la formación de líneas.

Tabla 31. Áreas hidráulicas y velocidades medias en el tramo curvo del ensayo 3.

Sección	Areas (m ²)	Vm (mm/s)
1+200	1.46	280.46
1+440	1.38	286.26
1+680	1.26	331.66
1+920	1.23	351.33
2+160	1.09	362.85
2+400	1.10	365.19
2+640	1.18	331.13
2+880	1.09	360.99
3+120	1.10	414.59
Promedio	1.21	343

Del área de 1.21 m² y la longitud curva de 32 m se tiene un volumen de 38.72 m³; de esto obtiene una masa (m) de 38720 kg de agua. El radio de curvatura (r) es de 16.21 m y el promedio de las velocidades medias en dirección “x” es de u = 0.343 m/s. A partir de tales datos, el flujo presentó una fuerza centrífuga de 0.281 KN y un Froude de 0.268.



Imagen 33. Vista en planta del proceso de transporte de clavijas (fotografía 1-3). Formación del pasillo libre de clavijas a lo largo de la orilla curva (ver flecha roja en la fotografía 4). Ensayo 3.

Nuevamente, En el tramo recto anterior a la curva del canal, las velocidades del avance de clavijas en la superficie del lado izquierdo fueron mayores a las del lado derecho y del centro.

El tiempo que tardó en transitar toda la masa visible congestionada de clavijas fue de un aproximado de 4 minutos. Cabe reafirmar que, fuera del tiempo mencionado hubo clavijas transitando muy lentamente por las llanuras de inundación y cárcavas de los acantilados de la orilla cóncava. Sin embargo, muy pocas piezas que ingresaron a estos sectores quedaron asentadas después de haber retirado el flujo de agua.

El transito del material leñoso fue muy similar a las del ensayo 1, por lo que se abstiene entrar a detallar nuevamente los sucesos. No obstante, en este ensayo en particular se confirma lo que quedó como una interrogación y no se mencionó en el ensayo 1. Resulta que, en la imagen 33-4 se nota como las clavijas en tránsito, a pesar de ser impulsadas por la fuerza centrífuga, no logran alcanzar y rozar la orilla derecha. Este suceso fue pasado por alto en el ensayo 1, porque se necesitó reafirmarlo en un nuevo ensayo. Efectivamente, al seguir la flecha punteada de color rojo de la imagen en mención se observa un pasillo libre de clavijas a lo largo de la ribera derecha. Tal pasillo libre de material flotante es producto de la presencia de un flujo helicoidal secundario de corrientes opuestas a las del flujo principal.

Se muestra a continuación, el gráfico de las velocidades superficiales (U) tomadas en cada punto del espejo de agua (W) en la sección 3+120. También, se muestran las gráficas de las fuerzas de arrastre de cada tipo de clavija que pasan por el punto 2 de esta sección.

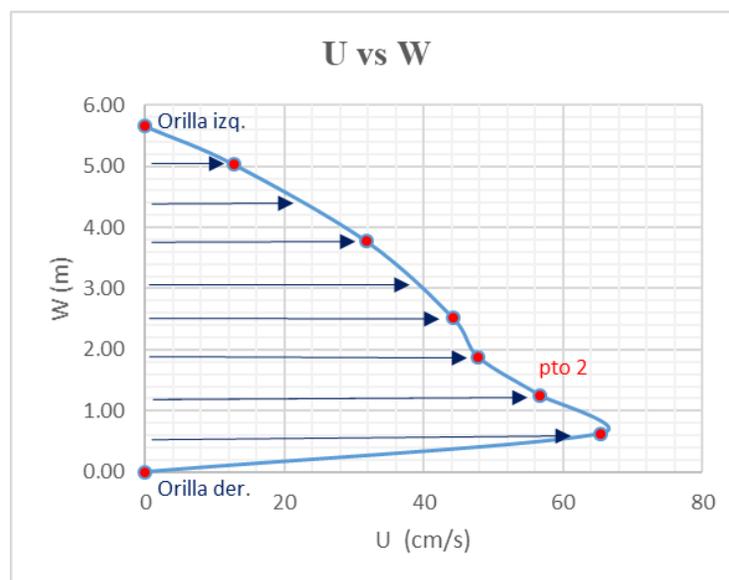


Figura 46. Gráfico U vs W de la sección 3+120, ensayo 3.

La velocidad superficial (U) de 56.6 cm/s en el punto 2 (figura 46 y 47) se ubica en el espejo de agua una distancia de 1.26 m del lado cóncavo (orilla derecha). El perfil de velocidades en el punto 2 se detalla en la figura siguiente:

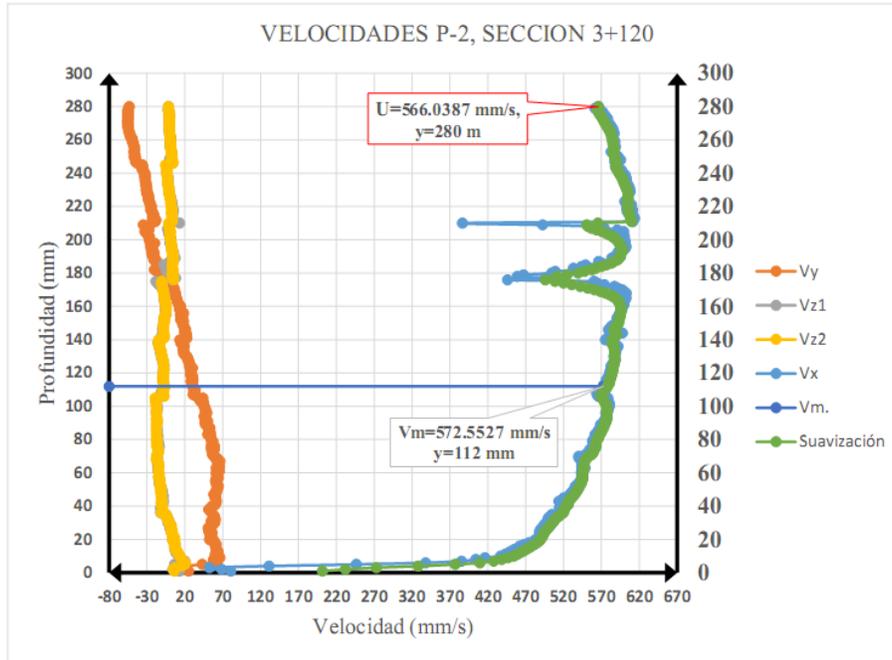


Figura 47. Perfil de velocidades 3D en el punto 2/sección 3+120 - zona de socavación, ensayo 3.

Este punto de la sección 3+120 cuenta con la siguiente información: el calado (h) es aproximadamente de $28+3.5/2$ cm (29.8 cm). Cabe recalcar que, con el ADV se registró datos a menos de 3.5 cm de la superficie de agua. Por lo que, a cada altura máxima en Y (28 cm en este caso), donde se registraron las velocidades U, se lo sumó 3.5/2 cm para aproximarse al calado real. Es decir, por incertidumbre de precisar cuál es la distancia próxima a la superficie se optó por sumar 3.5/2 a todos los Y máximos de cada sección. A continuación, se muestran las fuerzas en este punto.

Tabla 32. Fuerzas de arrastre (Fd) de clavijas sin discos en el punto 2/sección 3+120, ensayo 3.

"Fd" - Punto 2, sección 3+120, S/R								
Tipo, Color	U (cm/s)	Fd (dinas)						
		$\theta = 0^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 75^\circ$	$\theta = 90^\circ$
1, Blanco gran.	56.6	1020	5098	8828	11956	14270	15611	15889
2, Rosado	56.6	807	4032	6982	9456	11286	12346	12566
3, Celeste	56.6	454	2268	3927	5319	6349	6945	7069
4, Verde	56.6	314	1571	2721	3686	4399	4812	4898
5, Blanco peq.	56.6	202	1010	1748	2368	2826	3092	3147

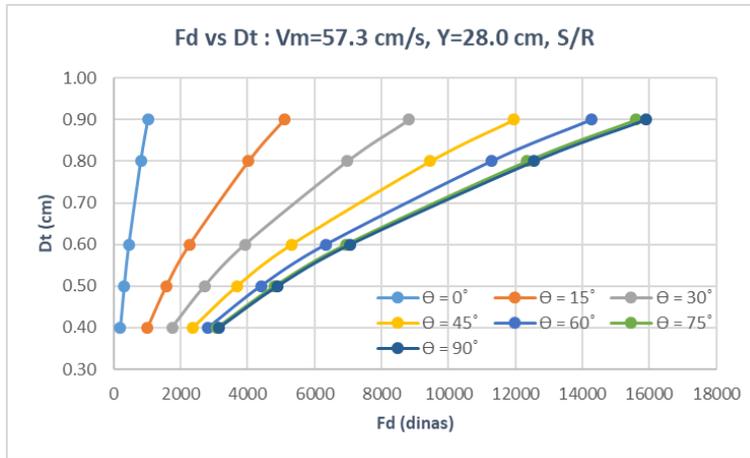


Figura 48. Gráfico Fd vs Dt de las clavijas sin discos en el punto 2/sección 3+120, ensayo 3.

En este caso, las clavijas de 0.9 cm de diámetro es la que posee una fuerza máxima de 15889 dinas; tener en cuenta que Θ es quien está 90° mas no Θ_c , cuyo ángulo es menor a 90° . La fuerza de arrastre puede incrementarse un poco más, mientras el ángulo Θ_c tienda a 90° . En efecto, la descripción es similar a las gráficas de ensayos anteriores.

Tabla 33. Fuerzas de arrastre (F_d) de clavijas con disco en el punto 2/sección 3+120, ensayo 3.

"Fd" - Punto 2, sección 3+120, C/R								
Tipo, Color	U (cm/s)	Fd (dinas)						
		$\theta = 0^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 75^\circ$	$\theta = 90^\circ$
1, Blanco gran.	56.6	6690	12732	17907	21862	24327	25134	24228
2, Rosado	56.6	4687	9389	13451	16597	18611	19357	18784
3, Celeste	56.6	2636	5281	7566	9335	10468	10887	10565
4, Verde	56.6	2261	4147	5751	6963	7700	7912	7586
5, Blanco peq.	56.6	1651	2885	3922	4692	5142	5242	4985

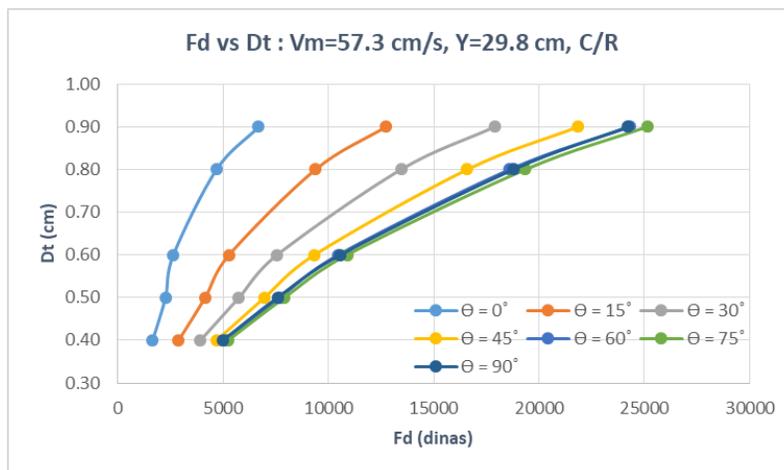


Figura 49. Gráfico Fd vs Dt de las clavijas con discos en el punto 2/sección 3+120, ensayo 3.

La dinámica de las clavijas en el tramo curvo, como ya ha quedado bajo criterio indicado anteriormente, sigue una trayectoria aproximada a los puntos 1, es este caso nos centramos también en los puntos 2. Luego, para las fuerzas de las clavijas con disco y un Θ de 75° se grafican estas fuerzas máximas versus la longitud a lo largo de cada punto 1. Se eligieron las clavijas con discos por ser las que mayor fuerza generan. Las fuerzas de las clavijas con discos para un Θ de 75° a lo largo de estos puntos 1 y 2 se grafican a continuación:

Tabla 34. Fd máximas de clavijas con disco que transitan a lo largo de la curva por los puntos 1 de cada sección, ensayo 3.

Sección Punto 1	U (cm/s)	Long tramo (m)	Long curva (m)	Fd (dinas), $\Theta=75^\circ$, C/R				
				1, Blanc gran.	2, Rosado	3, Celeste	4, Verde	5, Blanc peq.
1+200	28.3	0.00	0.00	6270	4829	2716	1974	1308
1+440	28.7	4.59	4.59	6454	4970	2796	2032	1346
1+680	37.5	4.33	8.91	11021	8488	4774	3470	2299
1+920	37.5	4.26	13.17	11028	8493	4777	3472	2300
2+160	41.2	4.31	17.48	13317	10256	5768	4192	2777
2+400	46.7	4.39	21.87	17089	13162	7403	5380	3564
2+640	46.4	4.43	26.30	16889	13008	7316	5317	3523
2+880	55.5	4.41	30.71	24139	18591	10456	7599	5035
3+120	65.4	4.21	34.92	33552	25840	14534	10562	6998

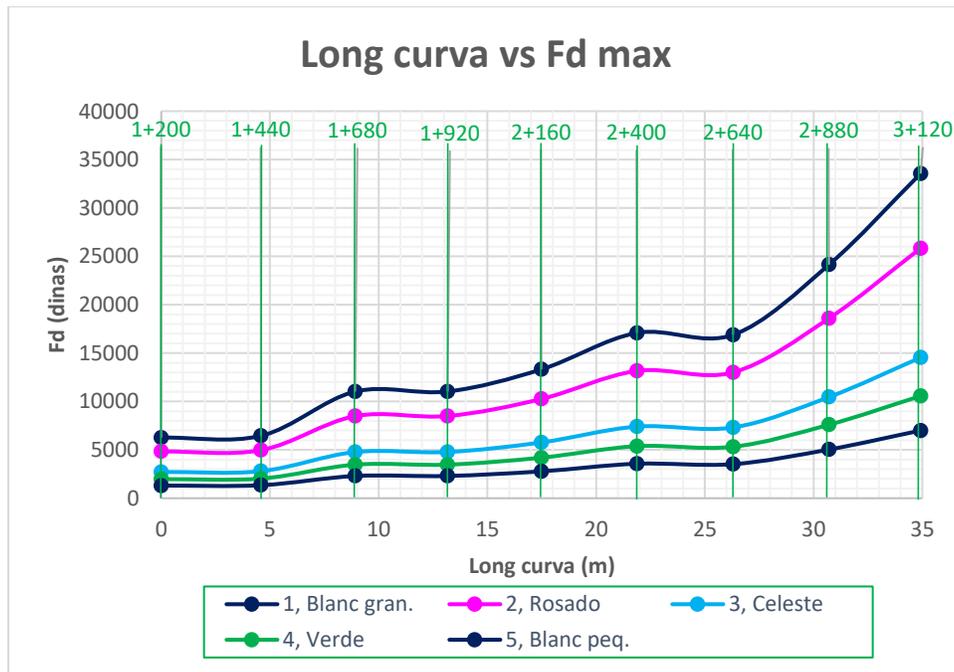


Figura 50. Longitud de la curva por los puntos 1 vs Fd máximas de clavijas con disco, ensayo 3.

Tabla 35. Fd máximas de clavijas con disco que transitan a lo largo de la curva por los puntos 2 de cada sección, ensayo 3.

Sección Punto 2	U (cm/s)	Long tramo (m)	Long curva (m)	Fd (dinas), $\theta=75^\circ$, C/R				
				1, Blanc gran.	2, Rosado	3, Celeste	4, Verde	5, Blanc peq.
1+200	32.0	0.00	0.00	8019	6176	3474	2525	1673
1+440	31.7	4.39	4.39	7863	6056	3406	2475	1640
1+680	39.2	4.11	8.50	12050	9281	5220	3794	2513
1+920	39.6	4.05	12.55	12273	9452	5316	3864	2560
2+160	43.1	4.11	16.66	14570	11221	6311	4587	3039
2+400	45.5	4.18	20.84	16211	12485	7022	5103	3381
2+640	48.2	4.22	25.07	18189	14008	7879	5726	3794
2+880	50.4	4.21	29.28	19929	15349	8633	6274	4157
3+120	56.6	4.10	33.38	25134	19357	10887	7912	5242

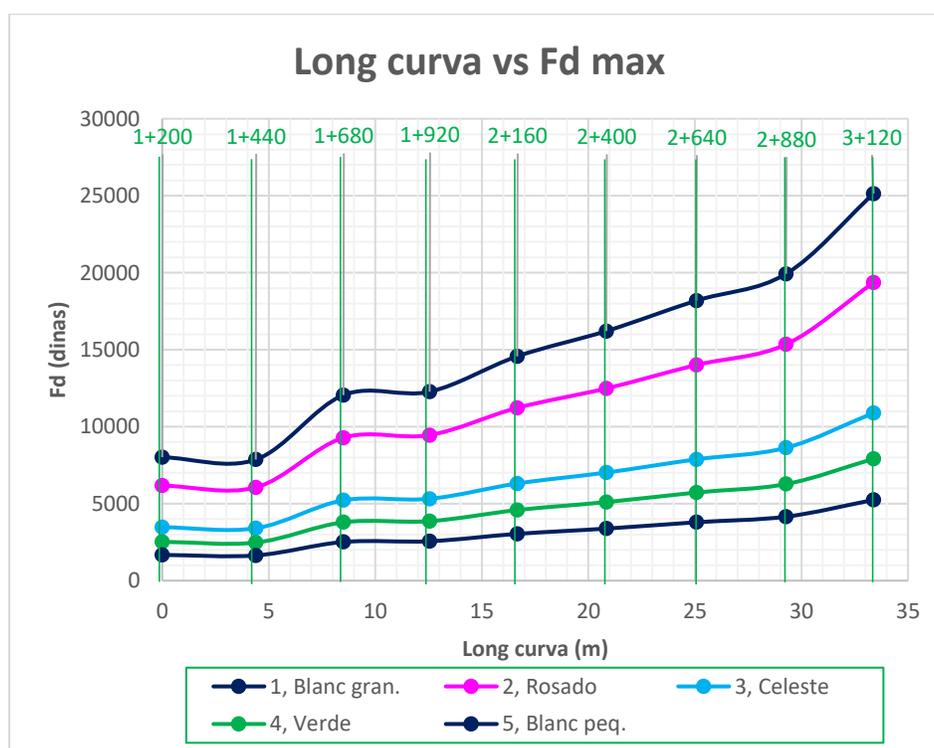


Figura 51. Longitud de la curva por los puntos 2 vs Fd máximas de clavijas con disco, ensayo 3.

4.4. Ensayo N°4 con espigones ELJ

El ensayo se realizó el 24 de febrero del 2017, para el cual, se emplearon 12 espigones ELJ y un caudal máximo de 514 lt/s (14341 m³/s en prototipo). Los ángulos de orientación de todas las estructuras fueron de 90° (ver plano 4/4 de anexos), y el borde libre promedio de 3.3 cm.

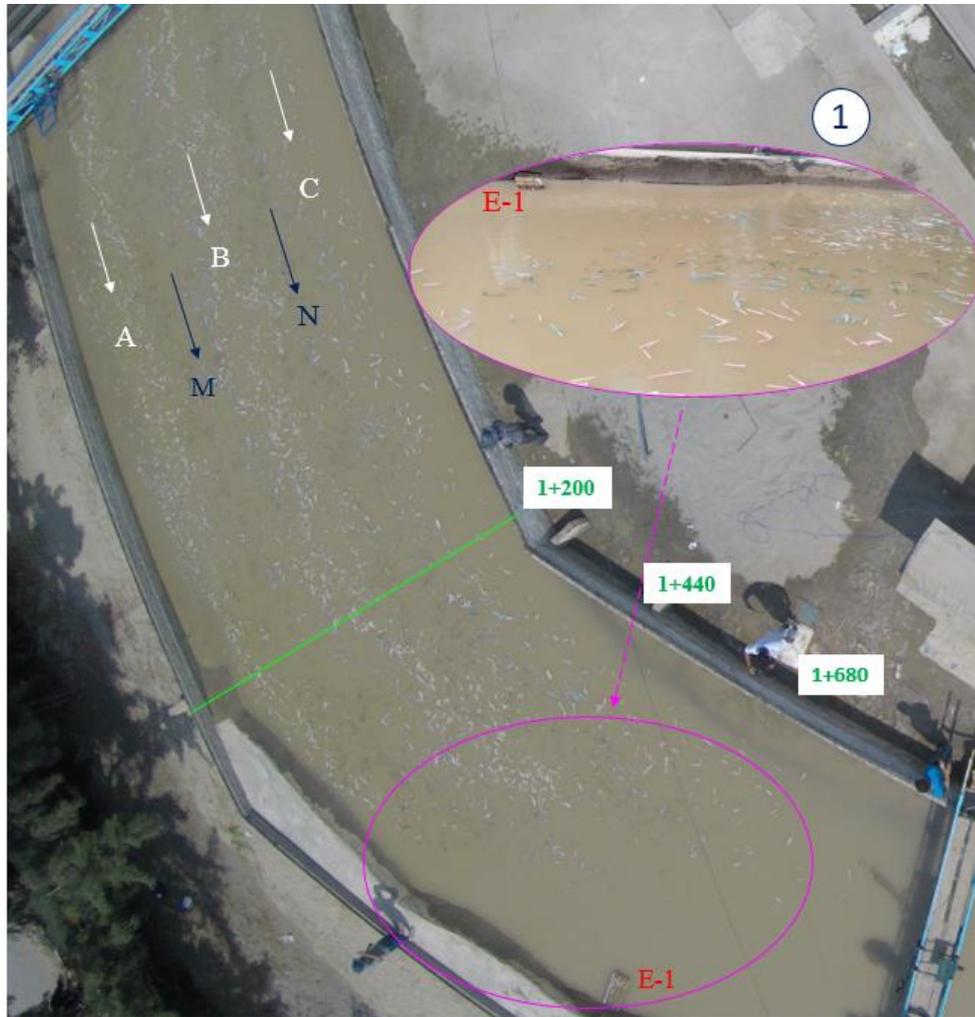
4.4.1. Trayectorias y fuerzas de arrastre de las clavijas

La metodología para el análisis de las trayectorias fue del mismo modo que el ensayo 2. A partir de los datos de tabla 36 se tiene un volumen de 39.96 m³ y masa (m) de 39964 kg de agua, fuerza centrífuga 0.341 KN y un número de froude de 0.286 en la curva.

Tabla 36. Áreas hidráulicas y velocidades medias en el tramo curvo del ensayo 4.

Sections	Areas (m ²)	Vm (mm/s)
1+200	1.56	298.14
1+440	1.38	265.23
1+680	1.28	331.55
1+920	1.26	367.78
2+160	1.13	387.31
2+400	1.14	395.86
2+640	1.18	436.91
2+880	1.16	444.24
3+120	1.15	420.82
Promedio	1.25	372

Las clavijas al ser arrojados uniformemente al flujo de $V_m = u = 0.372$ m/s, nuevamente, llevaron la delantera las líneas del lado izquierdo. En la imagen 34-1 se observa que la línea C se encuentra transitando a la altura del primer espigón (E-1), y la línea A está muy distante de alcanzar a impactar al E-1. Además, se observa como todas las líneas están leve y uniformemente inclinadas hacia el lado derecho sin haber ingresado al tramo curvo.



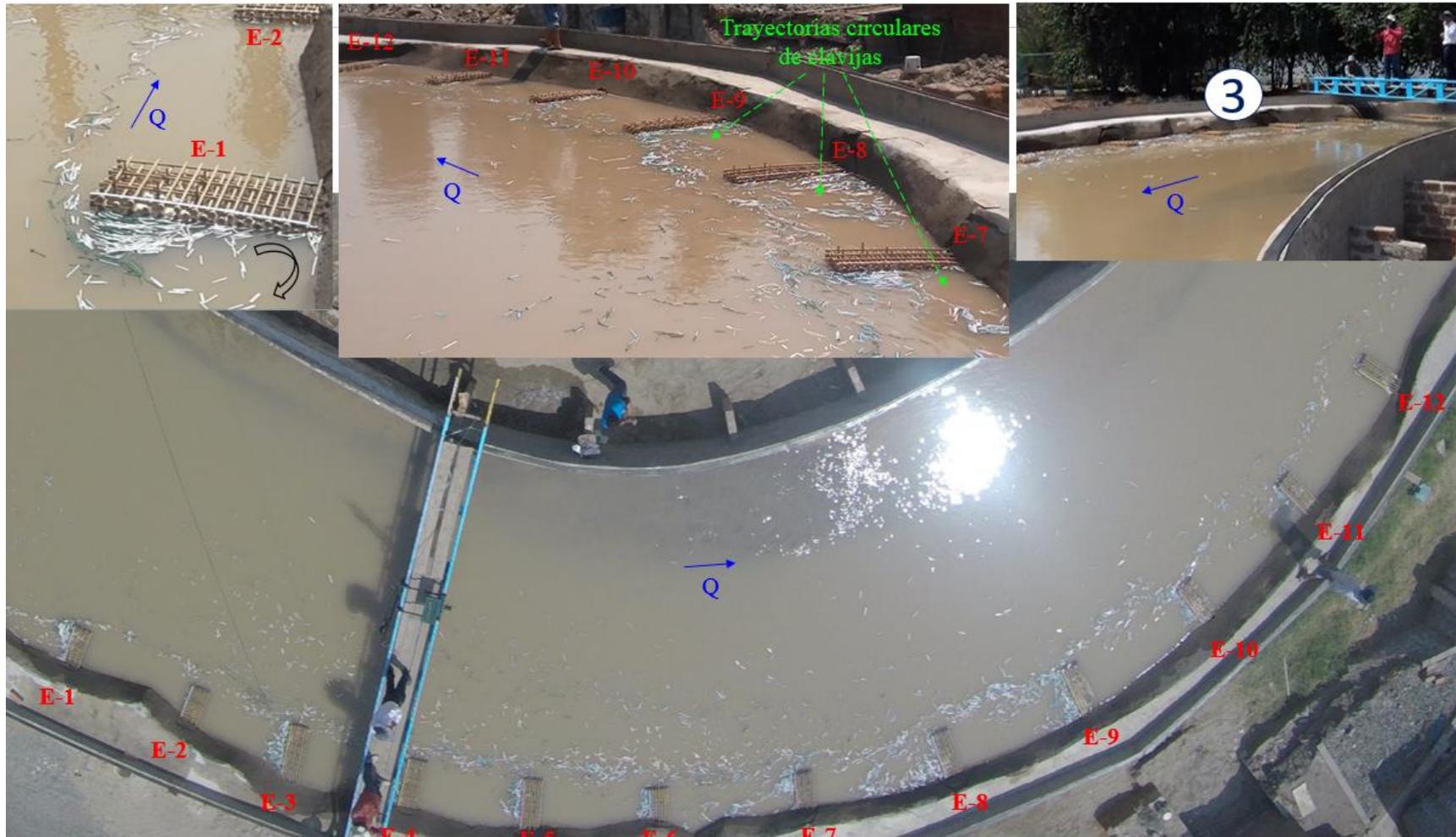


Imagen 34. Vista en planta del proceso de transporte de clavijas a lo largo del canal experimental con presencia de espigones ELJ, ensayo 4.

En la imagen 34-2 se observa que la línea C ha logrado arribar al eje del canal, pasando muy cerca del E-7. En este mismo momento se nota a la línea N ha pasado al E-5, la línea B al E-4, la línea M está arribando al E-3. Se puede decir que, estas líneas mencionadas se encuentran equidistantes entre sí. En cambio, la línea A está más retrasada debido a la inclinación que tuvo sobre la llanura de inundación derecha en el tramo recto. Pues, la línea A está recientemente impactando sobre el E-1 en un tiempo de 31 segundos después de haber ingresado a la curva. Otra vez, la línea M fue la primera en mantener contacto con el espigón E-1. El procedimiento a partir del desvió generado por el E-1 fue similar al ensayo anterior. Es decir, las líneas A y M fueron desviadas por el E-1 hacia la izquierda, tomando ambas una única trayectoria, donde empezaron a entremezclarse con las otras líneas impulsadas por la fuerza centrífuga desde la orilla opuesta. Esta línea mixta, generada a través coaliciones entre clavijas, continua a lo largo del trazo o nueva orilla imaginaria formada por el extremo libre de cada espigón.

Esto se observa en la imagen 34-3 donde todas las líneas han formado una sola línea que transita a lo largo y en frente del extremo libre de los espigones. Luego, parte de las clavijas de la línea mixta ingresaron a los espacios entre espigones, donde formaron trayectorias circulares tal como se observa en los espacios entre los E-6, E-7, E-8 y E-9. Cabe indicar que, los métodos de toma de datos y sucesos ocurridos fueron similares al ensayo 2, siendo no necesario volver a mencionarlos. Como se sabe, las clavijas con discos contienen sus máximas fuerzas cuando poseen un Θ de 75° ; por eso, bajo esta condición se muestran las siguientes tablas con las fuerzas de estas piezas, cuyo tránsito se daría por los puntos 1 y 2 de cada sección.

Tabla 37. Fd máximas de clavijas con disco que transitan a lo largo de la curva por los puntos 1 de cada sección, ensayo 4.

Sección Punto 1	U (cm/s)	Long tramo (m)	Long curva (m)	Fd (dinas), $\Theta=75^\circ$, C/R				
				1, Blanc gran.	2, Rosado	3, Celeste	4, Verde	5, Blanc peq.
1+200	18.6	0.00	0.00	2718	2093	1177	856	567
1+440	20.5	4.59	4.59	3284	2529	1423	1034	685
1+680	15.8	4.33	8.91	1957	1507	848	616	408
1+920	5.4	4.26	13.17	233	179	101	73	48
2+160	7.4	4.31	17.48	427	329	185	134	89
2+400	9.0	4.39	21.87	633	487	274	199	132
2+640	11.7	4.43	26.30	1081	833	468	340	226
2+880	14.3	4.41	30.71	1602	1234	694	504	334
3+120	24.7	4.21	34.92	4794	3692	2077	1509	1000

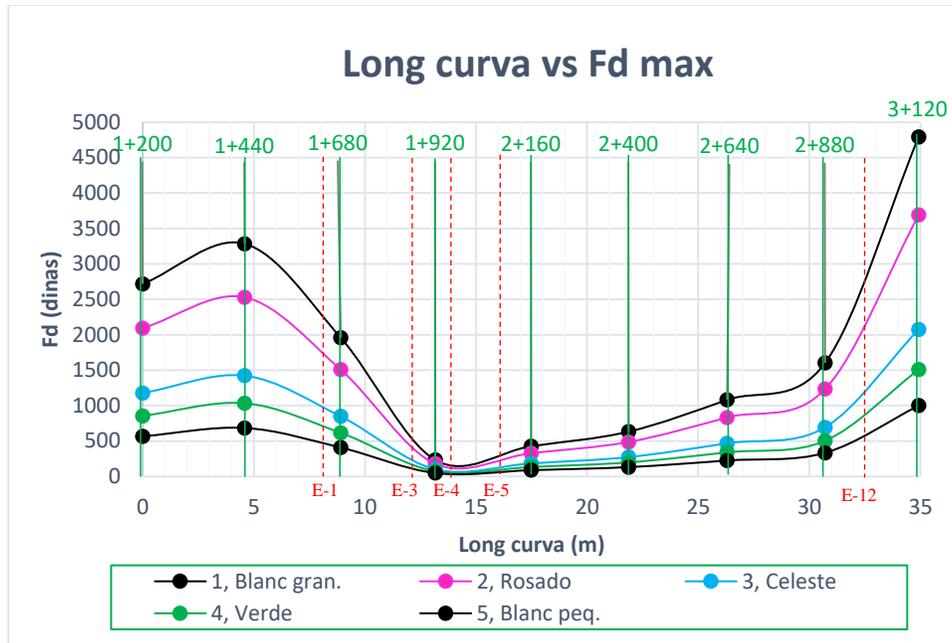


Figura 52. Longitud de la curva por los puntos 1 vs Fd máximas de clavijas con disco, ensayo 4.

De acuerdo con la gráfica 52, los efectos del primer espigón con respecto a las fuerzas de arrastre de clavijas inician a un poco más de 4 metros antes de la ubicación de esta estructura (E-1). Es decir, las velocidades con las que llegan las clavijas a impactar sobre el E-1 son drásticamente reducidos y controlados por la presencia de los espigones. Específicamente, las clavijas alcanzan mínimas fuerzas al ingresar al espacio entre el E-3 y E-4. Luego, las fuerzas se incrementan sutilmente hasta la sección 2+880, donde también se ubica el E-11. Por último las fuerzas inician a incrementarse bruscamente a partir de esta sección 2+880; por ende, lo mismo ocurre con velocidades del flujo. A continuación, se muestra los sucesos en los puntos 2.

Tabla 38. Fd máximas de clavijas con disco que transitan a lo largo de la curva por los puntos 2 de cada sección, ensayo 4.

Sección Punto 2	U (cm/s)	Long tramo (m)	Long curva (m)	Fd (dinas), $\theta=75^\circ$, C/R				
				1, Blanc gran.	2, Rosado	3, Celeste	4, Verde	5, Blanc peq.
1+200	26.6	0.00	0.00	5560	4282	2409	1750	1160
1+440	26.3	4.39	4.39	5413	4169	2345	1704	1129
1+680	34.3	4.11	8.50	9247	7122	4006	2911	1929
1+920	33.7	4.05	12.55	8915	6866	3862	2807	1859
2+160	37.1	4.11	16.66	10775	8299	4667	3392	2247
2+400	32.8	4.18	20.84	8442	6502	3657	2658	1761
2+640	49.3	4.22	25.07	19054	14675	8254	5998	3974
2+880	41.5	4.21	29.28	13485	10386	5841	4245	2813
3+120	38.8	4.10	33.38	11781	9074	5103	3709	2457

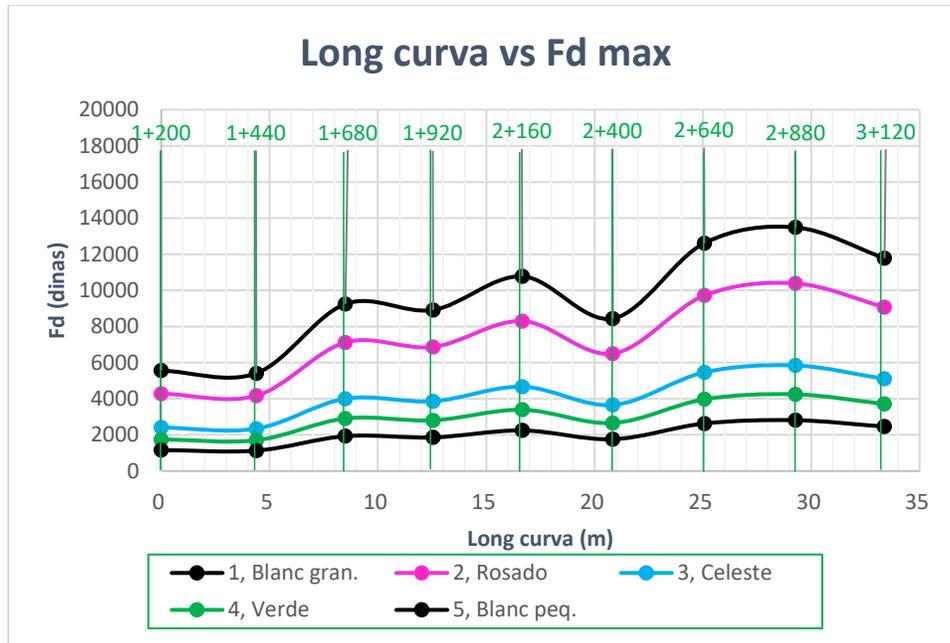


Figura 53. Longitud de la curva por los puntos 2 vs Fd máximas de clavijas con disco, ensayo 4.

De la gráfica 53 otra vez se hace un enfoque sobre las piezas de mayor tamaño de color blanco (1, blanc gran), cuyo diámetro es de 0.9 cm, obviando el resto por ser de semejante comportamiento y menor fuerza. Las Fd máximas de estas piezas que transitan por los puntos 2 se incrementan levemente desde la sección 1+440, lugar donde se registra 5413 dinas (0.05 N), hasta la sección 2+160, donde se registra 10775 dinas (0.11 N). Esto es, a la altura a más de 4 m antes del E-1 hasta pasar el E-5. Luego, las piezas que lograron transitar por estos puntos llegarían a bajar su fuerza hasta las casi 8000 dinas (0.08 N) en la sección 2+400. Posteriormente, las fuerzas se incrementarían sustancialmente hasta un máximo de 13485 dinas (0.13 N) en la sección 2+880. Por último, pasando esta sección las fuerzas disminuyen hasta la sección 3+120. Cabe recalcar que los puntos 2 se ubican fuera de la zona de espigones ELJ, donde las velocidades aumentan debido a la disminución de la sección hidráulica.

Por otro lado, en la parte superior izquierda de imagen 34-3, también, se aprecia como el espigón #1 (E-1) desvía a la mayoría de las clavijas con sentido hacia la izquierda o el eje del canal, alejándolos del alcance del E-2. Además, el inmediato y consecutivo arribo de clavijas hace que estas se aglomeren en el extremo libre del lado aguas arriba del E-1. Nuevamente, algunas de estas piezas que impactaron sobre el E-1 lograron ser desviadas hacia la orilla derecha, siguiendo trayectorias circulares o recirculaciones (ver flecha curva de color negro).

Después, la mayoría de estas piezas desviadas son igualmente devueltas al flujo principal, quedando un pequeño porcentaje atascado en el entramado del E-1.

Según se observa en la imagen 34-3, el E-1 recibió los impactos del material flotante de manera directa en la mitad de su lado anterior extremo, a diferencia del resto que recibió los impactos de manera menos comprometida y en mucho menos cantidad. Según la figura 52 se puede deducir que: el E-1 y E-12 son los que soportan los máximos impactos. De estas dos, el E-12 es quien recibe la mayor fuerza de impacto por clavija, pero la cantidad de piezas en impactar fue muy baja a diferencia del E-1. O sea, la estructura E-1 tuvo que soportar mayores fuerzas de impacto por parte de las clavijas; la razón es porque, estas piezas llegaron a impactar en conjunto o en mucha mayor cantidad que al E-12. Sin embargo, la estructura E-12 se encarga de resistir las velocidades más grandes de socavación. Como el lado aguas arriba del E-1 está libremente expuesto a fuertes incidencias, a diferencia del último del último. Se muestran a continuación, las fuerzas para diferentes ángulos de cada tipo o tamaño de clavijas que transitarían por el punto II, ubicado 10 cm antes del E-1.

Tabla 39. Fuerzas de arrastre (F_d) de clavijas sin disco que impactan sobre el E-1, ensayo 4.

"Fd" - Punto II, E-1, S/R								
Tipo, Color	U (cm/s)	Fd (dinas)						
		$\theta = 0^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 75^\circ$	$\theta = 90^\circ$
1, Blanco gran.	19.3	118	592	1025	1388	1656	1812	1844
2, Rosado	19.3	94	468	810	1097	1310	1433	1458
3, Celeste	19.3	53	263	456	617	737	806	820
4, Verde	19.3	36	182	316	428	511	559	568
5, Blanco peq.	19.3	23	117	203	275	328	359	365

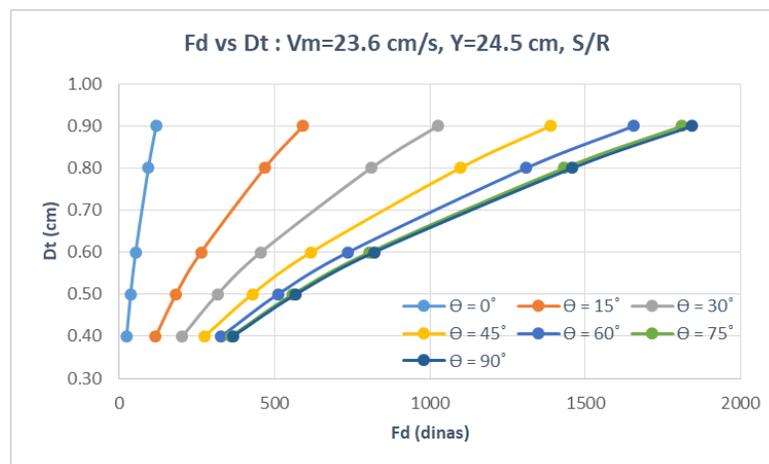


Figura 54. Gráfica F_d vs D_t de clavijas sin discos en E-1, ensayo 4.

Tabla 40. Fuerzas de arrastre (F_d) de clavijas con disco que impactan sobre el E-1, ensayo 4.

"Fd" - Punto II, E-1, C/R								
Tipo, Color	U (cm/s)	Fd (dinas)						
		$\theta = 0^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 75^\circ$	$\theta = 90^\circ$
1, Blanco gran.	19.3	776	1478	2078	2537	2823	2917	2812
2, Rosado	19.3	544	1090	1561	1926	2160	2247	2180
3, Celeste	19.3	306	613	878	1083	1215	1264	1226
4, Verde	19.3	262	481	667	808	894	918	880
4, Verde	19.3	192	335	455	545	597	608	579

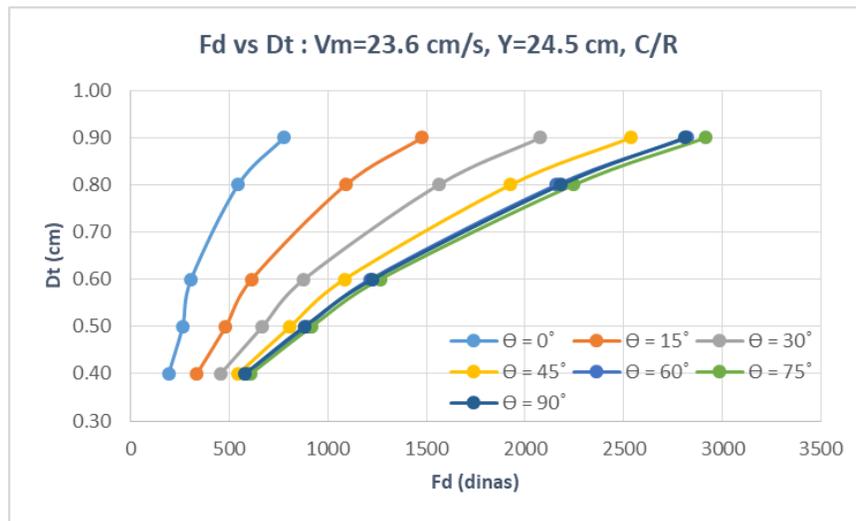


Figura 55. Gráfica F_d vs D_t de clavijas con discos en E-1, ensayo 4.

Las fuerzas que muestran estas últimas gráficas pertenecen a cada tipo de clavijas que pasaron por el punto II, cuya ubicación es a 0.67 m de la orilla, para luego impactar en el extremo libre del espigón E-1 de longitud aguas arriba de 0.76 m (45.5 m en prototipo, ver plano 4/4).

En resumen, la mayoría de primeras clavijas en arribar a los espigones pasaron de frente hacia aguas abajo, siendo otra vez de menor cantidad las clavijas desviadas que ingresaron a los espacios. Luego, las clavijas formaron grandes trayectorias circulares sobre todo en los espacios entre el E-6, E-7, E-8 y E-9. Estas recirculaciones fueron nuevamente momentáneas, ya que el mismo movimiento giratorio devolvió parte de las piezas al flujo principal. Además, los vórtices conforme aparecieron, volvieron a desaparecer conjuntamente con las piezas flotantes en dirección aguas abajo, hacia el entramado de los espigones.

4.4.2. Atasco y acumulación de clavijas en el sistema conformado de 12 espigones ELJ

Los eventos llevados a cabo con respecto a los atascos y acumulaciones fueron similares a las del ensayo 2. Las clavijas atascadas en mayor cantidad en el entramado fueron otra vez las más pequeñas, las que arribaron con un ángulo $\Theta=0^\circ$, y las que no tienen discos y/o poseen discos pequeños. Las piezas grandes con discos que arriban con un $\Theta \rightarrow 90^\circ$ son las que iniciaron el atasco en la lateral aguas arriba del espigón, impidiendo el ingreso al entramado de las demás clavijas. Es decir, las clavijas que llegan posterior y consecutivamente se aglomeran y sellan los vacíos del entramado al nivel del agua, formando grandes acumulaciones momentáneas de diferentes geometrías (imagen 35). Luego, estas acumulaciones fueron desapareciendo al ser casi todas las piezas arrastradas por las corrientes de los remolinos generados entre espigones. Sin embargo, las clavijas que lograron llegar hasta las orillas en las zonas de empotramiento fueron difíciles de arrastrar por los remolinos. Este suceso fue claramente notorio en la zona de empotramiento del E-3, cuyo lugar se ubica en una zona de cárcava.

Según lo visto en la imagen 35 se tiene:

En el primer espigón se atascaron algunas piezas, pero no se formó alguna acumulación geométrica de clavijas, a pesar de tener un ángulo de orientación de 90° . Pues el fuerte remolino formado en esta zona arrastró, nuevamente, a las piezas hacia el flujo principal. Además, la cabeza del E-1 desvió a casi la totalidad de piezas de las líneas A y M hacia la izquierda, dirigiéndolos directamente a partir del E-3 hacia adelante. De tal modo que fueron sólo muy pocas, las piezas que lograron ingresar al entramado del E-2. De otro lado, en la zona de empotramiento del E-3 fue donde se formó una acumulación muy grande de clavijas y de forma muy irregular.

Cabe indicar que, a pesar de que una gran cantidad de clavijas ingresaron y recircularon por los espacios entre el E-6, E-7, E-8 y E-9, estas no llegaron necesariamente a formar grandes acumulaciones.

En las estructuras E-4, E-9 y E-10 se formaron grandes acumulaciones de forma triangular. En el E-5 se formó una pequeña acumulación casi de forma trapezoidal. Por último, en el resto de espigones no se llegaron a observar acumulaciones en sus lados aguas arriba, pero si en caso lo hubo, estas fueron muy efímeras.



Imagen 35. Acumulaciones de clavijas en las zonas de empotramiento y laterales aguas arriba de los espigones ELJ, ensayo 4.

Otra vez, el mayor número de piezas atascadas fueron a partir de las más pequeñas a las más grandes, así como también las clavijas con pequeños o sin discos fueron las que mayor se atascaron en el entramado. A continuación, se detalla lo mencionado.

Tabla 41. Número de clavijas atrapadas en cada espigón ELJ, ensayo 4.

ESPIGON		E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7	E-8	E-9	E-10	E-11	E-12
Clavijas con discos (C/R)	Blanco peq.	46	5	55	22	18	8	23	22	56	23	14	5
	Verde	2	1	18	19	11	17	6	11	30	21	20	6
	Celeste				2	14	4	7	1	12	12	5	12
	Rosado	1			1	2	1		2	1		1	
	Blanco gran.					1			2	1			
Clavijas sin discos (S/R)	Blanco peq.	42	13	76	62	63	34	54	53	131	54	24	17
	Verde	25	9	98	46	35	7	24	23	67	53	25	18
	Celeste	1	3	6	28	22	8	6	11	23	18	19	6
	Rosado				3	3	3	1	4	8	3	6	3
	Blanco gran.			1	3	1	1	1	1	4		1	2
Cantidad parcial		117	31	254	186	170	83	122	130	333	184	115	69
Porcentaje parcial		0.91%	0.24%	1.97%	1.45%	1.32%	0.65%	0.95%	1.01%	2.59%	1.43%	0.89%	0.54%

Del total de clavijas que fueron arrojadas quedaron atascadas mediante cantidades parciales en cada espigón como lo indica la tabla 41, cuya suma da un total de 1794 piezas atascadas. También, en esta tabla se indica que el promedio de captura llegó a 1.16%. En definitiva, al sumar los porcentajes parciales de captura en cada estructura se obtuvo un 13.95% del total de clavijas, o sea, casi el doble de la cantidad atrapada en el ensayo 2. En adición a esto, el E-2 fue la única estructura donde se atraparon la cantidad mínima de 31 clavijas; siendo el número de piezas atrapadas en el resto de los espigones desde 69 hasta 254. Contrariamente, el E-3 fue la estructura que más clavijas captó (254 piezas), no obstante, estas representan un porcentaje ínfimo de 1.97% del total que se arrojaron al canal.

4.4.3. Efectos de las clavijas atrapadas en el sistema conformado de 12 espigones ELJ

Al descender el nivel del agua, después de terminado el ensayo 4 ocurrió lo siguiente: nuevamente, la mayoría de las clavijas quedaron atascadas al nivel de agua en el lado anterior (aguas arriba) del caudal de diseño. Se puede notar claramente en la imagen 36 que, las piezas quedaron en el entramado suspendidas a la altura de la línea discontinua de color azul en el E-9.

Como se observa en las imágenes siguientes, el material leñoso quedó atascado sólo al nivel donde llega el agua y aunque en porcentaje casi se duplicó el material atrapado en el sistema de espigones, igual sigue siendo no perjudicable para la permeabilidad. Por ello, la estabilidad del espigón no se vio afectada a causa de los atascos; el cual, si ocurriría de atascarse y acumularse clavijas hasta el fondo ya que convertirían al espigón ELJ en una estructura impermeable.

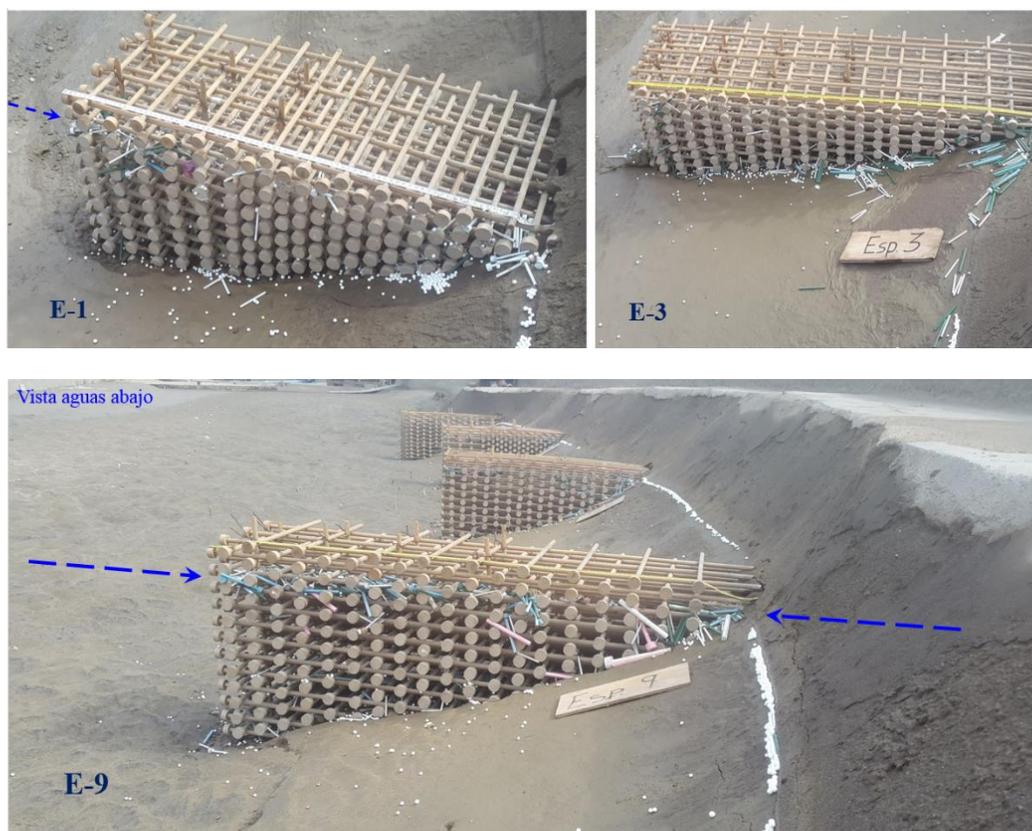


Imagen 36. Disposición final de las clavijas atascadas en el entramado de algunos espigones, ensayo 4.

Las pocas clavijas que quedaron en las zonas de empotramiento descendieron al lecho y llegaron a formar una mezcla dura y compacta con los sedimentos (E-3, imagen 36). Tanto es así que, al volverse a elevar el nivel del agua por otra avenida máxima, estas clavijas fueron difíciles de levantar; es decir, las piezas no volvieron a flotar. Según parece, estas mezclas en prototipo se irían incrementando y formando una fuerte y gran masa conforme lleguen las avenidas máximas junto a material leñoso. Tal masa puede reforzar y estabilizar las estructuras, a partir de los empotramientos en el banco, frente a las fuertes turbulencias de socavación ocurridas en las bases de las puntas. En fin, los efectos de estabilidad más que todo dependen de las turbulencias del flujo y sedimentación en la orilla de protección.

En adición, gracias al tránsito de clavijas se pudo observar que: la mayor turbulencia de vórtices ocurrió en las puntas o cabezas de los espigones ELJ, sobre todo en el primero y último. También, gracias a las pequeñas clavijas que lograron atravesar el entramado de los espigones más permeables, se pudo observar que el flujo reduce su velocidad considerablemente en el siguiente espacio entre espigones. Estas reducciones de velocidad de flujo favorecieron a la colmatación de sedimentos en los espacios entre espigones. Es así que, la sedimentación en estos espacios y la socavación profunda en las puntas de los espigones se produjo debido a la hidrodinámica generada en la curvatura. Por lo que, los atascos y acumulaciones de clavijas no influyen en los cambios hidromorfológicos.

4.5. Semejanzas y divergencias entre ensayos

4.5.1. En todos los ensayos

En el tramo recto anterior a la curva del canal, las velocidades del avance de clavijas en la superficie del lado izquierdo fueron mayores a las del lado derecho y del centro. Según parece, el efecto de la curvatura de un canal influye en la dinámica del flujo en el tramo recto aguas arriba. Por ello se afirma que, las trayectorias que describen el movimiento de troncos en ríos meándricos, dependen principalmente de la fuerza centrífuga del flujo que genera el grado de curvatura.

En los ensayos sin espigones, las clavijas transitaron en su totalidad muy próximos a los puntos 1 de cada sección en la curva; además, las fuerzas fueron mayores a las que transitaron por otros puntos. También, las fuerzas con las que transitaron fueron enormes con respecto a las que se registraron en los mismos puntos cuando hubo presencia de espigones ELJ. En los ensayos con espigones las máximas fuerzas se registraron en los puntos 2 de cada sección.

La fuerza de arrastre está en función de las características del tronco (longitud, densidad, diámetro y orientación) y tres características hidráulicas (pendiente, velocidad y calado) (Braudrick y Grant, 2000). En base a esto se elaboraron gráficas de fuerzas de arrastre versus diámetros de troncos (ver graficas F_d vs D_t) en dirección “x”, cuyo formato es el mismo para todos los ensayos. Luego se tiene:

- En la fuerza de arrastre de una clavija sin disco influye bastante el ángulo de orientación Θ , que forma la longitud de la clavija con la dirección del flujo. Puesto que, la fuerza de

arrastre disminuye considerablemente cuando una clavija tiende a ser paralelo a la línea de corriente ($\Theta \rightarrow 0^\circ$). Incluso, en algunos casos una clavija pequeña puede tener más fuerza que una de mayor tamaño, siempre y cuando, el eje de la pieza pequeña tienda a ser perpendicular a la línea de corriente ($\Theta \rightarrow 90^\circ$) y la otra mantenga un Θ que tienda a cero. Esto se puede apreciar en las gráficas F_d vs D_t de las clavijas sin disco.

- Caso similar ocurre en las gráficas F_d vs D_t para las clavijas con disco, con la única diferencia que las piezas poseen su máxima fuerza cuando forman un ángulo Θ de 75° . Según estas gráficas, cuando una de estas clavijas forma un Θ de 60° y 90° , sus fuerzas de arrastre son en magnitud casi similares. En las gráficas no se los puede distinguir a las curvas correspondientes a estos dos ángulos por estar casi superpuestas.

4.5.2. Ensayo 1 y 3 – sin espigones

En ambos ensayos se nota como las clavijas en tránsito, a pesar de ser impulsadas por la fuerza centrífuga, no lograron alcanzar y rozar la orilla derecha. Efectivamente, en la imagen 29.8 y 33.4 se observa un pasillo libre de clavijas a lo largo de la ribera derecha. Tal pasillo libre de material flotante es producto de la presencia de un flujo helicoidal secundario de corrientes opuestas a las del flujo principal. Según la teoría: un flujo helicoidal secundario localizado en una celda pequeña cerca de la superficie se forma adyacentemente a lo largo del banco externo. El sentido de las líneas de corriente de este pequeño flujo es opuesto a las de la celda principal. Motivo por el cual, las clavijas impulsadas hacia el banco externo, en los ensayos sin espigones, no lograron rozar o arribar a la orilla. Por ello, en las filmaciones fue muy raro observar clavijas que hayan ingresado a este pasillo.

Acerca de los ensayos sin la presencia de espigones, el comportamiento de las fuerzas de arrastre es mediante un incremento paulatino conforme las piezas avanzan hacia aguas abajo. Esto se puede observar en las gráficas Long curva vs F_d de clavijas que transitan a lo largo de los puntos 1 y 2 de cada sección.

4.5.3. Ensayo 2 y 4 – con espigones

La cantidad de leños atrapados por el sistema espigones ELJ en ambos ensayos fue muy baja con respecto a la gran cantidad que puede traer una avenida de este río de llanura. Pues, la

mayoría de clavijas, al menos en modelo físico, son desviadas hacia el eje del canal debido a la redirección del flujo que causa la presencia de espigones. Según se observó, las clavijas quedaron atascadas solo al nivel del agua de los espigones ELJ, afectando en lo más mínimo la permeabilidad de estas estructuras.

En contraste a ríos montañosos de flujo turbulento, el diseño de espigones ELJ no tendría el mismo efecto; porque los atascos y acumulaciones de leños, según estudios hechos en otros tipos de estructuras, ocurren desde la superficie de agua hacia el fondo. En otras palabras, la permeabilidad de un espigón ELJ quedaría considerablemente saturada e impermeabilizada, siendo luego esta estructura desestabilizada al sufrir enormes impactos por parte del agua y demás troncos en arrastre.

Los troncos que se acumularon y formaron diversas capas geométricas en las zonas de empotramiento, en su mayoría, fueron removidos ligeramente y con facilidad por los remolinos. Sin embargo, algunos troncos que lograron asentarse en estas zonas formaron una mezcla dura y compacta con los sedimentos. Según parece, los troncos que irían asentándose con el pasar del tiempo en las zonas de empotramiento, formarían una masa fuerte adherida al espigón, por lo que, podría aportar mayor estabilidad.

El caudal de madera (clavijas) arrojado al canal experimental fue la misma en todos los ensayos. Dado esto, la cantidad de piezas atrapadas en el sistema de espigones ELJ fue de 7.96% en el ensayo 4 y 13.95% en el ensayo 6, el cual representan un porcentaje mínimo con respecto del total. De ahí que, estos bajos porcentajes de atascos poco o casi nada influyen en los cambios hidromorfológicos del río Amazónico simulado. Muy contrariamente, la hidromorfología en ríos estrechos de montaña se altera cuantiosamente debido a la gran acumulación de troncos, cuyo tamaño es el principal factor del origen de los atascos.

En el ensayo N° 4 ejecutado con 12 espigones y 514 Lt/s de caudal, se captó casi el doble de clavijas captadas en el ensayo N°2 ejecutado con 11 espigones y 466 Lt/s de caudal, a pesar de no ser tanta la diferencia de caudales ni del número de espigones entre ambos ensayos. Por consiguiente, en un meandro amazónico protegido se puede afirmar que: “la cantidad atrapada de leños en un sistema de espigones ELJ, depende principalmente del número de estructuras y de la fuerza centrífuga, que ejerce el flujo en la curvatura, sin importar cuan sea la cantidad de

leños en tránsito”. Es decir, la cantidad de leños que quedarían atrapados en los espigones no variaría significativamente en caso presenciarse un tránsito de leños en un largo periodo de tiempo. Pues, los primeros leños en arribar sellarían los vacíos del entramado y coparían las zonas de empotramiento; luego, los leños que arribarían posteriormente serían removidos con facilidad y devueltos al flujo principal por los remolinos, generados entre espigones.

El primer espigón (E-1) es quien recibe directamente los impactos del flujo y del material en arrastre, por lo tanto, está expuesto a mayores riesgos con respecto a los demás. Las clavijas que logran impactar en el E-1 lo hacen en una forma tan desordenada justo al entorno del punto II (punto de color azul cerca al extremo libre del espigón). En tal punto, las mayores fuerzas registradas pertenecen a las clavijas con discos y que transferidas a prototipo son de 7.28 KN en el ensayo 2 y 6.70 KN en el ensayo 4. Razón por la cual, para un diseño de espigones ELJ en prototipo se debe tener en cuenta las fuerzas con las que impactarían los troncos leñosos. Cabe recalcar que, en modelo estas fuerzas no tienen tanta incidencia siendo algo fantasioso, sin embargo, debe tenerse muy en cuenta al referirse a prototipo.

Los espigones extremos, a diferencia del resto, son quienes resisten mayores fuerzas de arrastre con las que impactan las clavijas; sobre todo el primer espigón es quien se encarga de soportar el choque simultáneo de una enorme cantidad de clavijas. Las fuerzas con las que logran impactar las clavijas son inferiores en el resto de los espigones. Esto se puede notar en las gráficas “Long curva vs F_d ” de clavijas que transitan a través de los puntos 1 de cada sección. Cabe recalcar que, cada punto 1 se encuentra dentro de los espacios entre espigones, específicamente, muy cerca de la nueva orilla imaginaria formada por los cabezales de estas estructuras.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- De un estimado total de 22 570 309 de clavijas se arrojaron solo 12 864 unidades en todos los ensayos, mediante un caudal estimado de madera de 331 cm³/s (7.64 m³/seg, en prototipo).
- Las velocidades de los troncos del lado izquierdo en el tramo recto fueron superiores a las del lado derecho y centro; a pesar de que, el lado izquierdo fue de menor profundidad y no fue zona de convergencia superficial. Por lo tanto, el efecto de la curvatura del canal influye en la hidrodinámica desde mucho antes que el flujo ingrese al tramo curvo.
- En los ensayos sin espigones ELJ se notó como los troncos en tránsito, a pesar de ser impulsadas hasta por una fuerza centrífuga de 0.341 KN, no lograron arribar a la orilla derecha. Pues, un pasillo delgado libre de clavijas se formó a lo largo de esta orilla. La aparición de este pasillo fue producto de la presencia del flujo helicoidal secundario, cuyas corrientes son opuestas a las del flujo helicoidal principal.
- En base al estudio elaborado en modelo físico se puede afirmar que: “las trayectorias de los troncos dependen de la fuerza centrífuga que genera el flujo en la curvatura del río. Así mismo, la cantidad de troncos atrapada en el sistema de espigones ELJ depende principalmente de la fuerza centrífuga y del número de espigones, sin embargo, no depende de la cantidad de clavijas en tránsito”.
- La mayor cantidad de troncos fue desviada por los espigones ELJ y de los troncos que lograron ingresar a la zona de estas estructuras: algunos se atascaron en el entramado de los espigones o permanecieron en las zonas de empotramiento, pues la mayoría fueron removidos con facilidad por los remolinos y devueltas al flujo principal.
- En el ensayo N°2 (de 11 ELJs y 466 Lt/s) y ensayo N°4 (de 12 ELJs y 514 Lt/s) quedó atrapado un aproximado del 8 % y 14 % respectivamente del total de troncos arrojados al flujo. Debido a la baja cantidad de troncos que quedó atrapado, el diseño de trabajo de los espigones ELJ no fue afectado.
- Los troncos quedaron atascados, solo al nivel del agua, en la cara anterior donde impacta directamente el flujo con los espigones ELJ. Según se observó, esto afectó mínimamente la permeabilidad de estas estructuras de defensa.

- Dado que la permeabilidad de los espigones ELJ no fue afectada, la estabilidad de estos no depende del material leñoso en tránsito. Por lo que: “la principal fuerza desestabilizadora fue la de arrastre, sobre todo, las producidas en las bases de las puntas de los espigones” (Jacay 2019).
- Los troncos que lograron permanecer en las zonas de empotramiento de los espigones ELJ, se asentaron y formaron una mezcla dura y compacta con los sedimentos.

5.2. RECOMENDACIONES

- Realizar investigaciones en el meandro, enfocándose en el tramo recto, con el objetivo de analizar y explicar por qué las velocidades de las clavijas o de la superficie del flujo en el lado izquierdo son superiores a las del lado derecho y, sobre todo, a las del centro. Pues esto se observó en todos los ensayos.
- Realizar investigaciones en el meandro sin presencia de espigones ELJ, a fin de estudiar detalladamente y explicar por qué los troncos flotantes no logran arribar a la orilla externa a pesar de ser impulsados por la fuerza centrífuga. Pues, en las simulaciones realizadas se formó un pasillo delgado libre de clavijas durante el tránsito a lo largo del lado externo de la curvatura.
- Realizar estudios con presencia de espigones ELJ y enfocarse en lo que sucedería durante nuevas avenidas máximas que arrastrarían más troncos hacia las zonas de empotramiento. Al parecer, los nuevos troncos al arribar a estas zonas se irían apilándose sobre los troncos ya asentados durante avenidas anteriores. Es probable que, con la continua llegada de más troncos y al entremezclarse con el material sedimentológico se iría formando una masa dura y compacta, que aportaría a la estabilidad de los espigones.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abbe, TB; Montgomery, DR. 2002. Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets river basin. Washington (en ingles). *Geomorphology* 51: 81-107.
- Aragão, L. E. O. C; Malhi, Y; Metcalfe, DB; Silva-Espejo, JE; Jiménez, E; Navarrete, D; Almeida, S; Costa, A. C. L; Salinas, N; Phillips, OL; Anderson, LO; Alvarez, E; Baker, TR; Goncalvez, PH; Huamán-Ovalle, J; Mamani-Solórzano, M; Meir, P; Monteagudo, A; Patiño, S; Peñuela, M. C; Prieto, A; Quesada, C. A; Rozas-Dávila, A; Rudas, A; Silva Jr JA; Vásquez, R. 2009. Above- and belowground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils (en ingles). *Biogeosciences* 6: 2759-2778.
- Araujo-Murakami, A; Parada, A; Terán, J; Baker, T; Feldpausch, T; Phillips, O; Brienen, R. 2011. Necromasa de los bosques de Madre de Dios, Perú; una comparación entre bosques de tierra firme y de bajíos. *Peruanos de Biología, Facultad de Ciencias Biológicas UNMSM* 18(1): 113- 118.
- Baird, DC; Fotherby, L; Klumpp, CC; Sculock, SM. 2015. Bank Stabilization Design Guidelines (en ingles). *Reclamation - Managing Water in the West*: 163-172
- Bertoldi, W; Welber, M; Mao, L; Zanella, S; Comiti, F. 2014. A flume experiment on wood storage and remobilisation in braided river systems (en ingles). *Earth Surface Processes and Landforms* 39: 804–813.
- Bladé Castellet, E; Ruiz Villanueva, V; Sánchez-Juny, M; Martí-Cardona, B; Bodoque del Pozo, JM; Díez-Herrero, A. 2012. MODELIZACIÓN BIDIMENSIONAL DEL TRANSPORTE DE MADERA EN RÍOS. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. San José, Costa Rica: IAHR-CIC.
- Blanckaert, K; De Vriend, HJ. 2004. Secondary flow in sharp open-channel bends (en ingles). *Cambridge University Press* 498: 353–380.
- Braudrick, CA; Grant, GE; Ishikawa, Y; Ikeda H. 1997. DYNAMICS OF WOOD TRANSPORT IN STREAMS: A FLUME EXPERIMENT (en ingles). *Earth Surface Processes and Landforms* 22: 669–683.
- Braudrick, CA; Grant, GE. 2000. When do logs move in rivers? (en ingles). *Water Resources Research* 36(2): 571-583.

- Braudrick, CA; Grant, GE. 2001. Transport and deposition of large woody debris in streams: a flume experiment (en ingles). *Geomorphology* 41: 263-283.
- Brooks, AP. 2006. Design guideline for the reintroduction of wood into Australian streams (en ingles). Land & Water Australia, Canberra.
- Bulu, A. s.f. Model Theory (en línea, sitio web). Consultado 15 oct. 2016. Disponible en https://web.itu.edu.tr/~bulu/hydraulics_files/lecture_notes_01.pdf
- Comité Regional de Defensa Civil - Madre de Dios. 2011. Plan Regional de Prevención y Atención de Desastres de Madre de Dios . Lima, Perú.
- Dey, S. 2014. Fluvial Processes: Meandering and Braiding (en ingles). *GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences*: 529-562.
- García Palacios, J. 2013. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Dr. Ing. Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Garcia Soria, D; Honorio Coronado, E; Del castillo, D. 2012. DETERMINACIÓN DEL STOCK DE CARBONO EN AGUAJALES DE LA CUENCA DEL RÍO AGUAYTÍA, UCAYALI – PERÚ. *Folia Amazónica* 21(1): 153-160.
- Gracia-Sánchez, J; Maza-Álvarez, JA. s.f. Morfología de ríos. México: UNAM.
- INDECI (Instituto Nacional de Defensa Civil). 2006. MAPA DE PELIGROS DE LA CIUDAD DE PUERTO MALDONADO. Puerto Maldonado, Madre de Dios, Perú.
- Julien, PY. 2002. *River Mechanics: River equilibrium* (en ingles). New York: Cambridge University Press.
- Kenneth R. Minschwaner, Chair; Gray E. Bebout, Kenneth H. Brink, Jiasong Fang, Ralf R. Haese, Yonggang Liu, W. Berry Lyons, Laurent Montési, Nancy N. Rabalais, Todd C. Rasmussen, A. Surjalal Sharma, David E. Siskind, Rigobert Tibi, and Peter E. van Keken. 2011. Controlling Debris at Bridges (en ingles). American Geophysical Union: 385-397.
- Kometter, R. 2003. MAPIFICACION Y EVALUACION FORESTAL DEL BOSQUE DE PRODUCCION PERMANENTE DEL DEPARTAMENTO DE MADRE DE DIOS . Lima, Perú.
- Martín-Vide, JP. s.f. INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA FLUVIAL. Ediciones UPC. Córdoba-Argentina.

- Mazzorana, B; Hubl, J; Zischg, A; Largiader, A. 2010. Modelling woody material transport and deposition in alpine rivers (en ingles). Nat Hazards: s.p.
- MINAG (Ministerio de Agricultura) –ANA (Autoridad Nacional del Agua)-DCPRH-ASUP-ALA MALDONADO. 2010. ESTUDIO DIAGNÓSTICO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA MADRE DE DIOS: IMPACTO SOBRE LA FLORA Y FAUNA. Lima, Perú.
- Modelación Hidráulica. s.f. (en línea, sitio web). Consultado 10 oct. 2016. Disponible en http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_123_183_81_1150.pdf
- NCHRP (National Cooperative Highway Research Program). 2010. Effects of Debris on Bridge Pier Scour (en ingles). Transportation Research Board, 9-50.
- OBRAS FLUVIALES. s.f. (en línea, sitio web). Consultado 13 oct. 2016. Disponible en <http://www.dep.hidraulica.efn.uncor.edu/wp-content/uploads/2014/05/FLUVIAL.pdf>
- Odebrecht Latinvest Operaciones y Mantenimiento SAC. 2012. DEFENSAS RIBERENAS ZONA LA PASTORA. Lima, Perú.
- Pfister, M; Capobianco, D; Tullis, B; Schleiss, AJ. 2013. Debris-Blocking Sensitivity of Piano Key Weirs under Reservoir-Type Approach Flow (en ingles). American Society of Civil Engineers 139: 1134-1141.
- Richardson, EV; Simons, DS; Lagasse PF. 2001. RIVER ENGINEERING FOR HIGHWAY ENCROACHMENTS (en ingles). National Highway Institute: 644 p.
- Río Madre de Dios. 2016. (en línea, sitio web). Consultado 13 oct. 2016. Disponible en https://es.wikipedia.org/wiki/R%C3%ADo_Madre_de_Dios.
- Rocha Felices, A. 1998. Introduccion a la Hidraulica Fluvial. Universidad Nacional de Ingenieria. Lima, Perú.
- Rozovskii, IL. 1957. FLOW OF WATER IN BENDS OF OPEN CHANNELS (en ingles). Kiev, Ucrania.
- Ruiz-Villanueva, V. 2012. Nuevas Metodologías de Evaluación de la Peligrosidad y el Riesgo por Avenidas en Cuenca de Montaña. Tesis doctoral. España, Universidad Complutense de Madrid.
- Ruiz-Villanueva, V; Castellet, EB; Díez-Herrero, A; Bodoque, JM; Sánchez-Juny, M. 2013. Two-dimensional modelling of large wood transport during flash floods (en ingles). Earth Surface Processes And Landforms 39: 438–449.

- Ruiz-Villanueva, V; Díez-Herrero, A; Bodoque del Pozo, J; Bladé, E. 2014. Large Wood in Rivers and its Influence on Flood Hazard (en ingles). Dendrolab. Institute of Geological Sciences: 229-246.
- Shields, FD; Morin, N; Cooper, CM. 2004. Large Woody Debris Structures for Sand-Bed Channels (en ingles). J. Hydraul. Eng 130(3): 208-217
- Sotelo Avila, G. 1997. HIDRAULICA GENERAL. LIMUSA S.A. Mexico.
- Streeter, V L; Wylie, EB; Bedford, KW. 1999. MECÁNICA DE FLUIDOS. McGraw-Hill Companies. Santafé , Bogotá, Colombia.
- Valdospinos Navas, S. 2011. MODELO HIDRAULICO DE UN CANAL EN CURVA PARA ESTUDIAR LA INCIDENCIA DE LOS ESPIGONES EN EL CONTROL DE LA EROSION. Tesis Ing. Civil. Quito, Pontificia Universidad Católica de Ecuador.
- Vegas Merino, SR. 2002. ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DE LAS OBRAS DE DESVÍO E LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN GABÁN II. Piura, Perú.
- Ven Te Chow; Maidment D; Mays LW. 1994. HIDROLOGIA APLICADA. Nomos S.A. Bogota, Colombia.
- Villón Bejar, M. 2002. Hifrología Estadística segunda edición. Editorial Villón. Lima, Perú.
- Wohl, E. 2013. Floodplains and wood (en ingles). Earth-Science Reviews 123: 194–212.

ANEXOS

Ensayo previo, sin espigones ELJ - 30 de agosto del 2016

Antes del inicio de los ensayos oficiales se realizó un pre-ensayo como preámbulo, con el fin de adelantarse a sucesos fallidos al momento de las grabaciones, filmaciones y toma de datos. En este pre-ensayo se observaron algunas deficiencias, siendo una de ellas la dificultad de observación de las clavijas desde una posición aérea. La razón fue por los colores que se asignaron a las clavijas; es decir, las clavijas fueron de color oscuro, siendo confundidas entre ellas y con el agua turbia del flujo. Luego, para los ensayos oficiales se creyó conveniente cambiar los colores de las clavijas, tal como ya se los observó en los ensayos descritos anteriormente. Para el cambio de colores se tuvo en cuenta el color de la turbiedad del agua y de la tinta (fluroeseina) arrojada al flujo, además de colores para poder diferenciar a las clavijas entre ellas mismas. Las imágenes siguientes perteneces a este ensayo previo o pre-ensayo.



Colocación de las clavijas de madera que representa solo troncos sobre la faja.



Lanzamiento y transporte de las clavijas de madera que representa al material leñoso.

Ensayo N° 1, sin espigones ELJ - 22 de setiembre del 2016

Las imágenes muestran el conteo, la clasificación y colocación de las clavijas, ya con los colores adecuados y definitivos para los ensayos.



Conteo y colocación de las clavijas o material leñoso sobre la faja.

Las imágenes muestran el inicio de las labores para la toma de datos tanto de velocidades, sedimentos, tirantes, etc. En la pizarra se muestra los puntos estratégicos donde se tomaron estos datos y el tiempo de cambio de caudales de acuerdo al hidrograma. Las labores fueron asignadas a los tesistas y personal técnico con un día de anticipación.



Puntos estratégicos en el modelo para la toma de datos y recolección de información mediante el vectrino ADV.

En la sección estrecha de la segunda poza de decantación, se colocó una malla metálica permeable para retener todas las clavijas arrojadas al canal. En esta malla se observó de forma casual y accidental una acumulación de capa gruesa. Esta acumulación de clavijas fue presionada por las fuertes velocidades del flujo, generadas por el estrechamiento del área hidráulica. De modo que, las clavijas fueron sumergidas aproximadamente unos 8 cm hacia el fondo y afectando el libre paso del agua.



Malla metálica colocada al final del modelo para la retención de las clavijas.

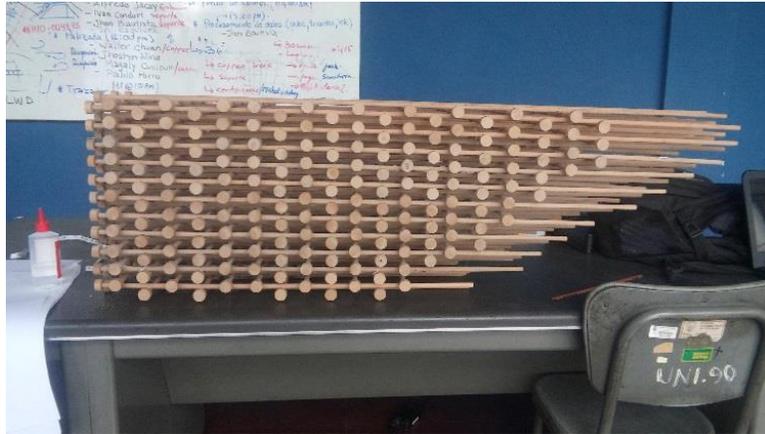
Una tinta de color verde fosforescente fue arrojada al flujo, a fin de contrastar resultados del tránsito de clavijas de los modelos numéricos (OPENFOAM y TELEMAC).



Ingreso a la curva del canal experimental de la fluoresceína arrojada para diferentes propósitos.

Ensayo N° 2, con 11 espigones ELJ - 20 de diciembre del 2016

La configuración final de un espigón del tipo ELJ, elaborado en el área de carpintería del Laboratorio Nacional de Hidráulica, se muestra en la imagen siguiente:



Forma de la geometría y permeabilidad de un espigón ELJ.

Alcance máximo del nivel de agua correspondiente a un caudal de 466 Lt/s, el cual representa en prototipo a un caudal de 12997 m³/s para un periodo de retorno de 25 años.



Nivel máximo del agua en este ensayo con espigones ELJ.

Lanzamiento de las clavijas desde la faja transportadora colocada en el inicio del canal de lecho móvil. Estas piezas de madera fueron arrojadas sincronizadamente al canal, mediante una manivela giratoria conectada en lado derecho del primer tubo metálico.



Lanzamiento de las clavijas al flujo desde la faja transportadora.

Después de terminado el ensayo, aun al día siguiente, quedaron remanencias de charcos de agua en el lecho. Esto sucedió en todos los ensayos por lo que el área de modelamiento físico tuvo que ser restringido hasta esperar el secado del lecho. Pues, para el levantamiento del lecho alterado con el Scanner 3D se necesita de la superficie libre de agua, ya que este equipo registra la superficie de agua como una plataforma sólida.



Morfología del lecho móvil al día siguiente de haber culminado con los ensayos.

Ensayo N°3, sin espigones ELJ - 26 de enero del 2017

La tinta fluoresceína se arrojó uniformemente distribuida a lo ancho del canal, desde el puente metálico móvil colocado sobre los muros laterales. Tal como se lo puede observar en la imagen siguiente:



Apertura de la válvula globo para la inyección de la fluoresceína al canal experimental.

El banco externo al final del tramo curvo, en la sección estrecha 3+120, colapsó por socavación debido a las fuertes velocidades registradas en esta sección (imagen izquierda). De otro lado, la distribución de clavijas en este ensayo fue de forma desordenada



Imagen Izq. Colapso por socavación del banco externo al final de la curva en la sección estrecha. Imagen Der. Distribución de las clavijas de forma desordenada y medición de la temperatura del agua.

Ensayo N°4, con 12 espigones ELJ - 24 de febrero del 2017

Colocación de los 12 espigones ELJ en el lado derecho o cóncavo de la curva del canal de lecho móvil. Las bases de los pilotes de madera fueron anclados a una losa de concreto.



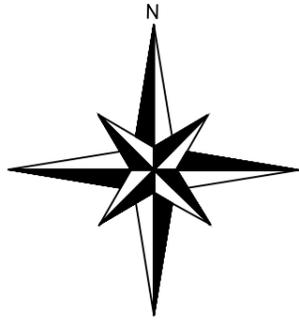
Colocacion de los espigones ELJ en el lado sometido a socavación.

Mediante la manipulación de válvulas y medición de limnímetros colocados en los tanques se logró obtener los caudales de diseño cada tiempo especificado.



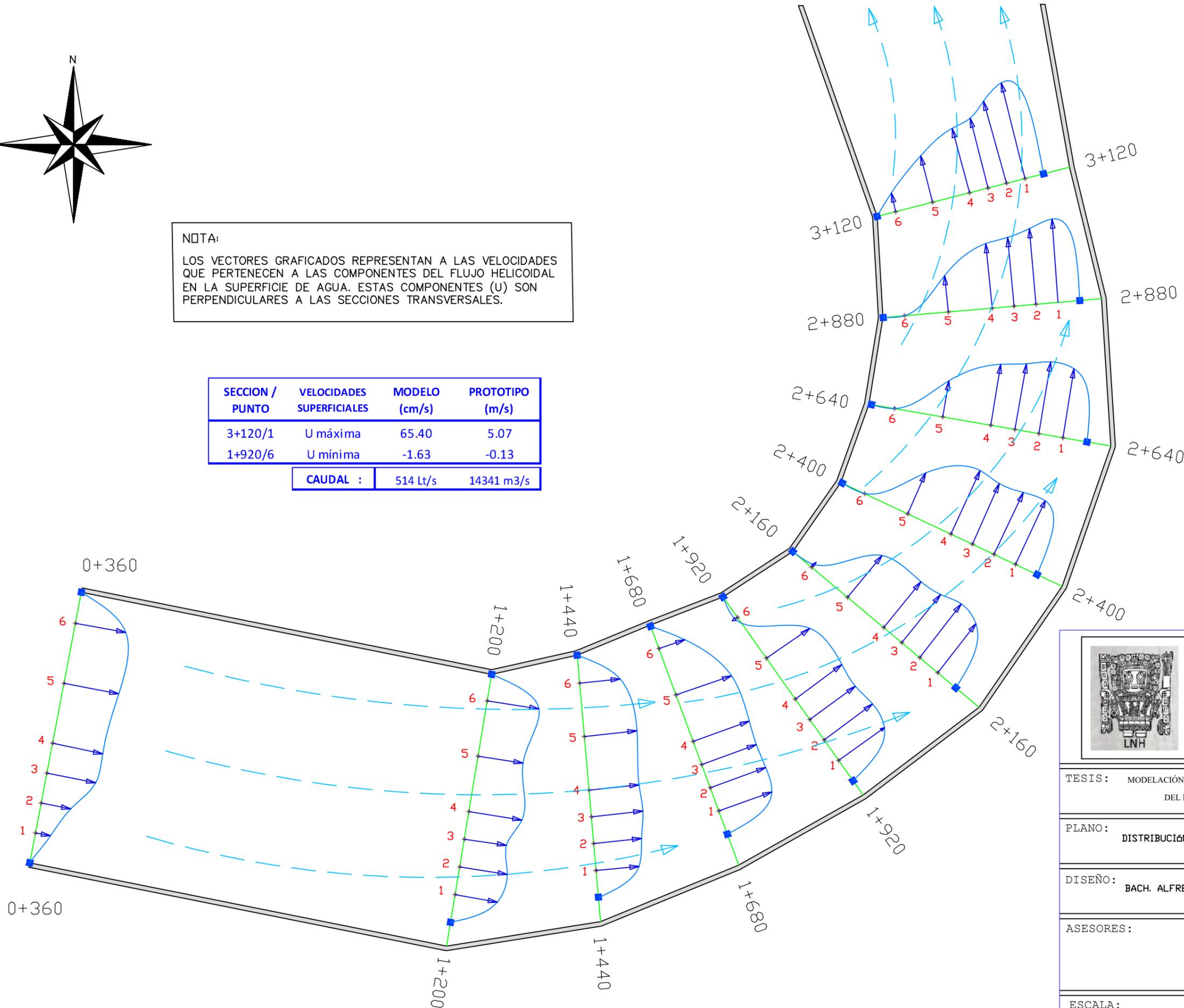
Registro del caudal de diseño en un tiempo dado en este ultimo ensayo.

PLANOS



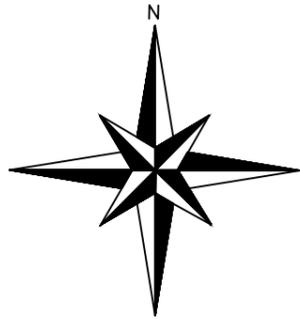
NOTA:
 LOS VECTORES GRAFICADOS REPRESENTAN A LAS VELOCIDADES QUE PERTENECEN A LAS COMPONENTES DEL FLUJO HELICOIDAL EN LA SUPERFICIE DE AGUA. ESTAS COMPONENTES (U) SON PERPENDICULARES A LAS SECCIONES TRANSVERSALES.

SECCION / PUNTO	VELOCIDADES SUPERFICIALES	MODELO (cm/s)	PROTOTIPO (m/s)
3+120/1	U máxima	65.40	5.07
1+920/6	U mínima	-1.63	-0.13
CAUDAL :		514 Lt/s	14341 m3/s



LEYENDA	
	VECTOR VELOCIDAD (Vx)
	PUNTOS A LO LARGO DE LAS ORILLAS DEL CANAL
	SECCIONES TRANSVERSALES
	CORRIENTES DEL FLUJO HELICOIDAL PRINCIPAL

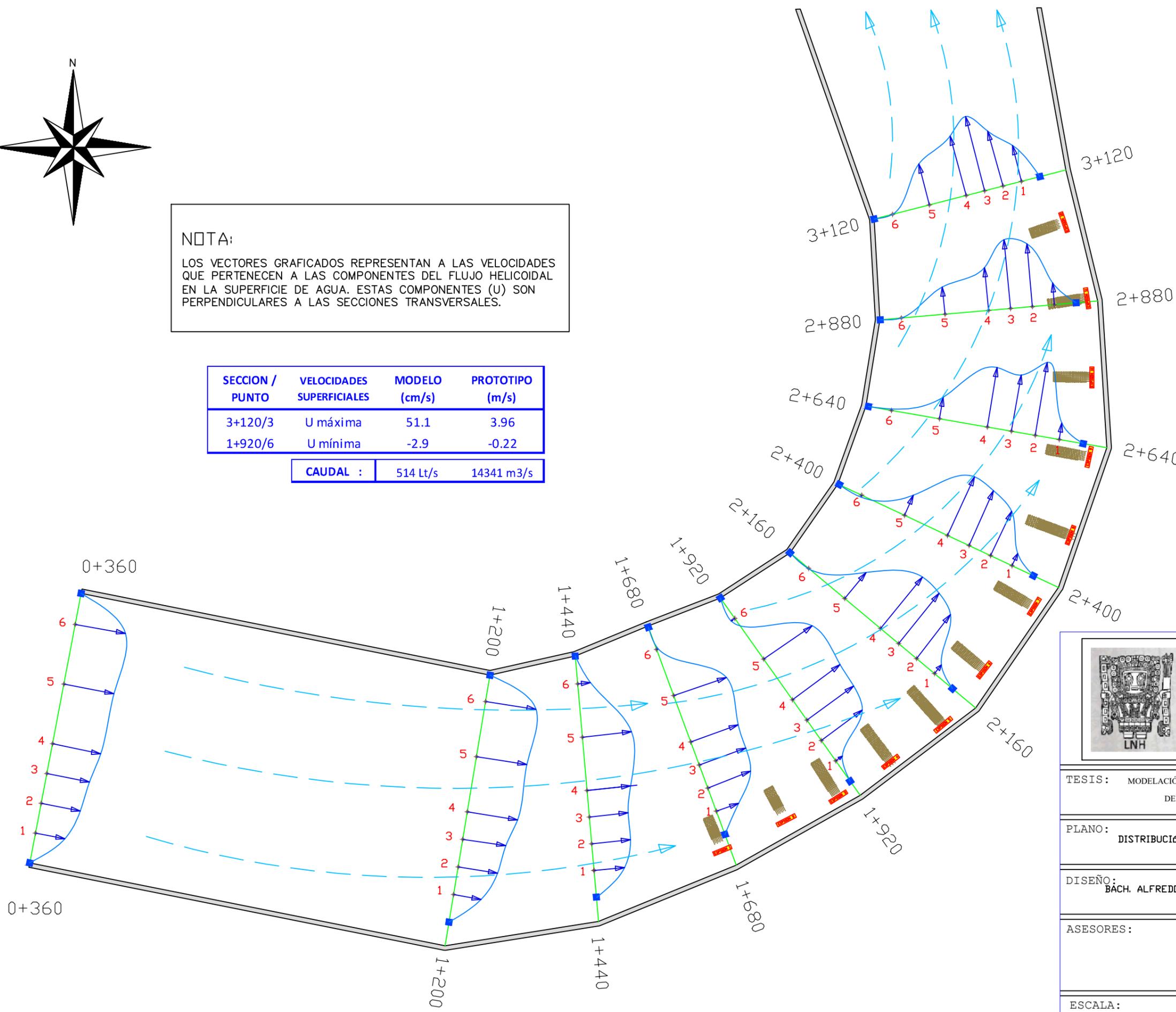
	PROYECTO: ESPIGONES FABRICADOS CON TRONCOS DE ARBOLES: UNA ALTERNATIVA CONTRA LA EROSION EN RIOS MEANDRICOS
	TESIS: MODELACION HIDRAULICA DEL TRANSPORTE DE TRONCOS FLOTANTES EN EL MEANDRO DEL RIO MADRE DE DIOS, SECTOR LA PASTORA - PUERTO MALDONADO
PLANO: DISTRIBUCION DE VELOCIDADES SUPERFICIALES - ENSAYO N°3	DISEÑO: BACH. ALFREDO CÉSAR JACAY MOGOLLÓN - BACH. WALTER CHUAN HUINGO
ASESORES:	ING. LUIS VÁSQUEZ RAMÍREZ ING. JULIO KURDIWA ZEVALLOS ING. LUIS CASTRO INGA
ESCALA: 1:3200	FECHA: Noviembre del 2020
N°: 1/4	



NOTA:

LOS VECTORES GRAFICADOS REPRESENTAN A LAS VELOCIDADES QUE PERTENECEN A LAS COMPONENTES DEL FLUJO HELICOIDAL EN LA SUPERFICIE DE AGUA. ESTAS COMPONENTES (U) SON PERPENDICULARES A LAS SECCIONES TRANSVERSALES.

SECCION / PUNTO	VELOCIDADES SUPERFICIALES	MODELO (cm/s)	PROTOTIPO (m/s)
3+120/3	U máxima	51.1	3.96
1+920/6	U mínima	-2.9	-0.22
CAUDAL :		514 Lt/s	14341 m3/s



LEYENDA

- VECTOR VELOCIDAD (Vx)
- ESPIGON ELJ (ENGINEERING LOG JAM)
- SECCIONES TRANSVERSALES
- PUNTOS A LO LARGO DE LAS ORILLAS DEL CANAL
- CORRIENTES DEL FLUJO HELICOIDAL PRINCIPAL

PROYECTO:

ESPIGONES FABRICADOS CON TRONCOS DE ÁRBOLES: UNA ALTERNATIVA CONTRA LA EROSIÓN EN RÍOS MEÁNDRICOS

TESIS: MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL TRANSPORTE DE TRONCOS FLOTANTES EN EL MEANDRO DEL RÍO MADRE DE DIOS, SECTOR LA PASTORA - PUERTO MALDONADO

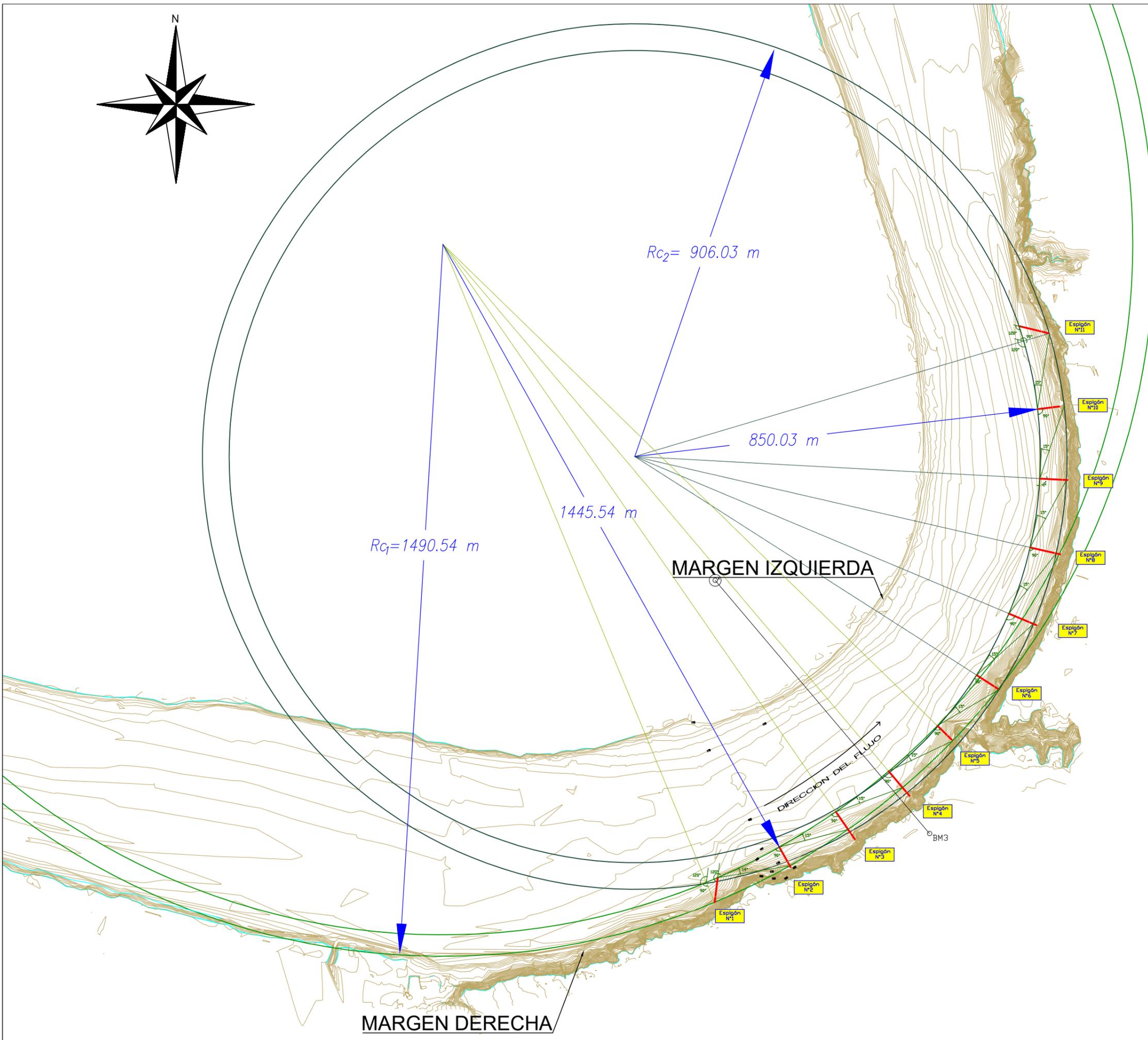
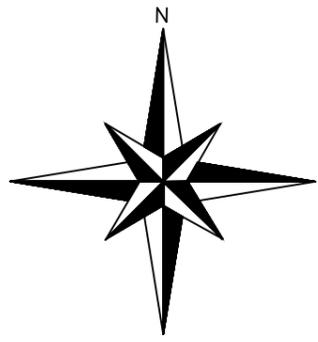
PLANO: DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES SUPERFICIALES - ENSAYO N°4

DISEÑO: BACH. ALFREDO CÉSAR JACAY MOGOLLÓN-BACH. WALTER CHUAN HUINGO

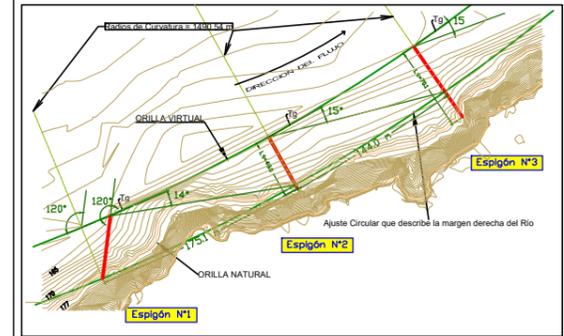
ASESORES:

ING. LUIS VÁSQUEZ RAMÍREZ
ING. JULIO KURDIWA ZEVALLOS
ING. LUIS CASTRO INGA

ESCALA: 1:3200	FECHA: Noviembre del 2020	N°: 2/4
--------------------------	-------------------------------------	-------------------



DETALLE ESPACIAMIENTO

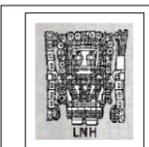


Observación

El espigón N°1 Tiene una orientación de 120° con respecto a la dirección del flujo. El ángulo fue trazado a partir de la intersección entre el radio de curvatura con la tangente al arco del círculo u orilla virtual. Esta orientación es trasladada hasta punto de intersección entre el ajuste circular y el radio de curvatura, para finalmente marcar la ubicación de este espigón.
La elección de los ángulos de desviación de flujo y orientación fueron en base al grado de permeabilidad del espigón (~35%).

CUADRO DE INFORMACIÓN GEOMÉTRICA

ESPIGÓN	Longitud de Trabajo	Ángulo de Orientación	Radio de Curvatura	Tramo entre Espigones	Ángulo de Desviación de Flujo (α)	Espaciamiento entre Espigones
1	56.6 m	120°	1490.5 m	1-2	14°	175.1 m
2	53.0 m	90°	1490.5 m	2-3	15°	144.0 m
3	75.0 m	90°	1490.5 m	3-4	15°	144.0 m
4	72.2 m	90°	1490.5 m	4-5	15°	144.0 m
5	47.0 m	90°	906.0 m	5-6	15°	143.3 m
6	57.8 m	90°	906.0 m	6-7	15°	155.1 m
7	67.6 m	90°	906.0 m	7-8	15°	155.1 m
8	69.5 m	90°	906.0 m	8-9	15°	155.1 m
9	63.2 m	90°	906.0 m	9-10	15°	155.1 m
10	50.6 m	90°	906.0 m	10-11	15°	155.1 m
11	68.6 m	120°	906.0 m			



PROYECTO:
ESPIGONES FABRICADOS CON TRONCOS DE ARBOLES: UNA ALTERNATIVA CONTRA LA EROSIÓN EN RÍOS MEANDRÍCOS

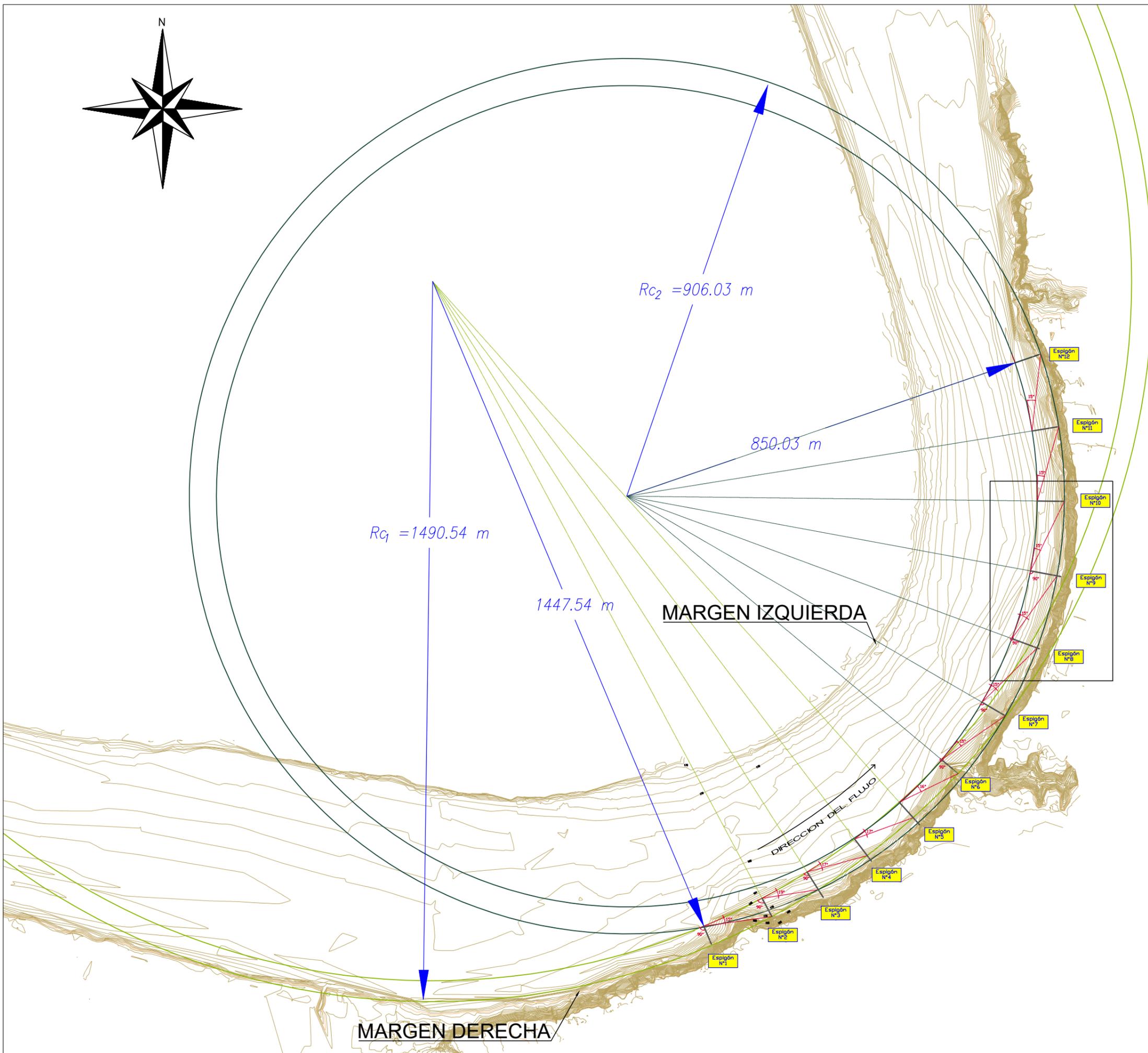
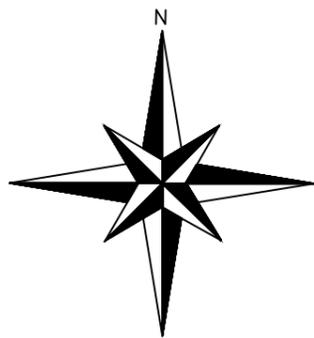
TESIS: MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL TRANSPORTE DE TRONCOS FLOTANTES EN EL MEANDRO DEL RÍO MADRE DE DIOS, SECTOR LA PASTORA - PUERTO MALDONADO

PLANO: DISTRIBUCIÓN EN PLANTA DE ESPIGONES - ENSAYO N°2

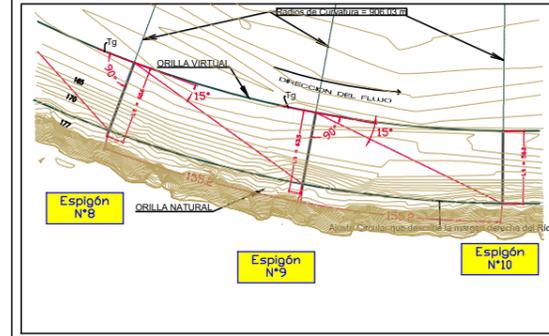
DISEÑO: BACH. ALFREDO CESAR JACAY MDDLLÓN - BACH. WALTER CHUAN HUINGO

ASESORES:
ING. LUIS VASQUEZ RAMIREZ
ING. JULIO KURDIA ZEVALLOS
ING. LUIS CASTRO INGA

ESCALA: 1:4000 **FECHA:** Noviembre del 2020 **N°:** 3/4



DETALLE ESPACIAMIENTO



Observación

El espaciamiento entre espigones esta dado por el Ángulo de desviación de flujo, ángulo de orientación del espigón y la longitud de trabajo del espigón. Los ángulos son trazados a partir de la intersección entre el radio de curvatura con la tangente al arco del círculo u orilla virtual. La elección de los ángulos de orientación y desviación de flujo son elegidos a criterio de acuerdo al grado de permeabilidad del espigón.

CUADRO DE INFORMACIÓN GEOMÉTRICA

ESPIGÓN	Longitud de Trabajo	Ángulo de Orientación	Radio de Curvatura	Tramo entre Espigones	Ángulo de Desviación de Flujo (α)	Espaciamiento entre Espigones
1	45.5 m	90°	1490.5 m	1-2	15°	137.7 m
2	47.6 m	90°	1490.5 m	2-3	19°	111.2 m
3	67.1 m	90°	1490.5 m	3-4	17°	123.4 m
4	62.0 m	90°	1490.5 m	4-5	17°	123.4 m
5	67.5 m	90°	1490.5 m	5-6	16°	130.3 m
6	34.9 m	90°	906.0 m	6-7	15°	155.2 m
7	57.9 m	90°	906.0 m	7-8	15°	155.2 m
8	67.6 m	90°	906.0 m	8-9	15°	155.2 m
9	68.5 m	90°	906.0 m	9-10	15°	155.2 m
10	61.0 m	90°	906.0 m	10-11	15°	155.2 m
11	57.2 m	90°	906.0 m	11-12	15°	155.2 m
12	56.5 m	90°	906.0 m			



PROYECTO:
ESPIGONES FABRICADOS CON TRONCOS DE ARBOLES: UNA ALTERNATIVA CONTRA LA EROSIÓN EN RÍOS MEANDRICOS

TESIS: MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL TRANSPORTE DE TRONCOS FLOTANTES EN EL MEANDRO DEL RÍO MADRE DE DIOS, SECTOR LA PASTORA - PUERTO MALDONADO

PLANO: DISTRIBUCIÓN EN PLANTA DE ESPIGONES - ENSAYO N°4

DISEÑO: BACH. ALFREDO CESAR JACAY MOGOLLÓN - BACH. CHUAN HUINGO, WALTER

ASESORES:
 ING. LUIS VASQUEZ RAMIREZ
 ING. JULIO KURDIWA ZEVALLOS
 ING. LUIS CASTRO INGA

ESCALA: 1:4000 **FECHA:** Noviembre del 2020 **N°:** 4 / 4