

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA
HIDRÁULICA**



**“EFICIENCIA DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS DE UN SISTEMA
DE ESPIGONES PERMEABLES FABRICADOS CON TRONCOS DE
ÁRBOLES EN RÍOS AMAZÓNICOS”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
HIDRÁULICO**

AUTOR:

Bach. JHON ALEX BAUTISTA MEJÍA

ASESOR:

Dr. Ing. JOSÉ FRANCISCO HUAMÁN VIDAURRE

CAJAMARCA – PERÚ

2018

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios por haberme dado la fortaleza para continuar y permitirme llegar a este momento tan importante en mi formación profesional.

De igual forma, dedico esta tesis a mis padres quienes han sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante en los momentos más difíciles.

A mis tres hermanos, quienes estuvieron presentes apoyándome incondicionalmente en todo momento.

A Ruth Fernández, por alegrar mis días.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por protegerme durante todo mi camino y darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de mi vida.

A mis padres, quienes con su demostración de padres ejemplares me han enseñado a no desfallecer ni rendirme ante nada y siempre preservar a través de sus sabios consejos.

A mis hermanos quienes, sin tener conocimientos de hidráulica experimental, siempre me fortalecieron y apoyaron emocional y anímicamente con sus buenos consejos.

Al Dr. Julio Martín Kuroiwa Zevallos e Ing. Luis Fernando Castro Inga, COASESORES de esta tesis, por haberme brindado la oportunidad de formar parte del equipo de investigación del Laboratorio Nacional de Hidráulica, y brindarme las facilidades para desarrollar este trabajo.

A mis compañeros: Alfredo, Walter, Junior, Mishel, Jhostyn y Deivi, quienes me apoyaron incondicionalmente durante la etapa experimental, sin ustedes esto no hubiera sido posible.

Al Dr. Francisco Huamán Vidaurre por el asesoramiento y correcciones realizadas, con la finalidad de que este trabajo se vaya mejorando.

Al MSc. Antonio Zuluaga Ángel, por las constantes revisiones y comentarios constructivos.

A mi Tía María Etelvina, por la hospitalidad brindada durante estos dos últimos años.

CONTENIDO

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PROBLEMA	2
1.2. JUSTIFICACIÓN	2
1.3. ALCANCES	3
1.4. LIMITACION	3
1.5. ANTECEDENTES	3
1.6. OBJETIVOS	8
a) OBJETIVO GENERAL	8
b) OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
II. MARCO TEÓRICO	9
2.1. FUNDAMENTOS DE LA HIDRÁULICA EXPERIMENTAL	9
2.2. HIDRÁULICA FLUVIAL	9
a) ECUACIONES FUNDAMENTALES	9
b) CLASIFICACIÓN DE FLUJOS	12
2.3. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	15
a) PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS	16
b) PROPIEDADES DE LOS SEDIMENTOS COMO UN CONJUNTO	28
c) INICIACIÓN DEL MOVIMIENTO	29
d) GASTO SÓLIDO EN SUSPENSIÓN	39
2.4. ESTRUCTURAS DE CONTROL DEL FLUJO	43
a) ESPIGONES	44
b) ESPIGONES PERMEABLES FABRICADOS CON MADERA (ELJS)	46
2.5. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	55
III. MATERIALES Y MÉTODOS	57
3.1. DISEÑO DE LOS ESPIGONES PERMEABLES DE MADERA	57
a) GEOMETRÍA DEL ESPIGÓN	57
b) DISPOSICIÓN DEL ENTRAMADO	57
c) DIMENSIONAMIENTO DE LOS ESPIGONES	58
d) GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL DE FONDO Y SUSPENSIÓN	61

e)	CONDICIONES HIDRÁULICAS DEL CANAL EXPERIMENTAL	63
f)	MOVILIDAD DE SEDIMENTOS	63
g)	CURVA DE DESCARGA	66
h)	EQUIPAMIENTO EXPERIMENTAL.....	67
i)	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	75
j)	ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS. ..	77
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	78
4.1.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES	78
a)	VELOCIDADES.....	78
b)	CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN	87
c)	CAMBIOS EN LOS NIVELES DEL LECHO	93
d)	ALTURAS SEDIMENTADAS.....	95
e)	FORMAS DE FONDO.....	97
f)	ESTIMACIÓN DEL TRANSPORTE SÓLIDO EN SUSPENSIÓN	97
g)	ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS ..	103
h)	VARIACIÓN EN LOS NIVELES DEL AGUA	104
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
5.1.	CONCLUSIONES	105
5.2.	RECOMENDACIONES	106
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
	ANEXOS.....	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Relación de investigaciones orientadas a examinar el comportamiento del flujo alrededor de los espigones de madera en los ríos.	5
Tabla 2:	Clasificación de flujo unidimensional	13
Tabla 3:	Sub clasificación del flujo variado	14
Tabla 4:	Clasificación de partículas de acuerdo a la American Geophysical Union (A.G.U).....	18
Tabla 5:	Equivalencia de mallas y aberturas	19
Tabla 6:	Velocidad de Sedimentación del material de fondo ($D_{50}=0.204\text{mm}$) y del material en suspensión ($D_{50}=0.175\text{mm}$).....	64
Tabla 7:	Criterios para el inicio de la suspensión	65

Tabla 8: Datos del hidrograma de ensayo	66
Tabla 9: Cantidad de puntos de muestreo de velocidades, por sección transversal obtenidos para cada uno de los ensayos experimentales realizados.....	78
Tabla 10: Cálculo del caudal sólido en suspensión en la sección S-1, para en el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad.	98
Tabla 11: Cálculo del caudal sólido en suspensión en la sección S-15, para en el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad.	100
Tabla 12: Cálculo del caudal sólido en suspensión en la sección S-1, para en el ensayo con estructuras de 46% de permeabilidad.	101
Tabla 13: Cálculo del caudal sólido en suspensión en la sección S-15, para en el ensayo con estructuras de 46% de permeabilidad.	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Descarga a través de un volumen de control elemental	10
Figura 2: Esquema para la deducción de la ecuación de cantidad de movimiento	11
Figura 3: Esquemización del diámetro nominal	17
Figura 4: Esquemización del diámetro de sedimentación	18
Figura 5: Esquemización de las dimensiones triaxiales de una partícula	21
Figura 6: Relación entre el Coeficiente de arrastre C_D y el número de Reynolds-Partícula	27
Figura 7: Gráfico de SCHULZ	27
Figura 8: Ejemplo de una Curva Granulométrica.....	28
Figura 9: Fuerzas actuantes sobre una partícula en el seno de un fluido.....	30
Figura 10: Influencia de las fluctuaciones en la iniciación del movimiento	32
Figura 11: Diagrama de SHIELDS para la iniciación del movimiento	34
Figura 12: Fases del transporte sólido	38
Figura 13: Fases del transporte de sedimentos	38
Figura 14: Distribución vertical de concentraciones	41
Figura 15: Esquema de definición para el cálculo del gasto sólido en suspensión	42
Figura 16: Distribución típica de velocidades, concentraciones de sedimentos y esfuerzos de corte	42
Figura 17: Formación de una orilla virtual en un tramo curvo de un río protegido con un sistema de espigones permeables.	46

Figura 18: ELJ de deflexión de flujo, que muestra la ubicación de los troncos apilados en el extremo aguas arriba de la estructura.....	50
Figura 19: Deflexión del flujo de un ELJ y ejemplo de una estructura tal como está que protege la orilla izquierda (mirando hacia abajo) y creando piscina y cobertura compleja para peces en North Fork Stillaguamish River, Snohomish County, Washington (flujo de izquierda a derecha).....	51
Figura 20: Colocación de estacas de sauce en un sistema de ELJs proyectados en el río Lower Molalla, en Oregón – Washington	51
Figura 21: Detalles de los componentes estructurales de los ELJ	52
Figura 22: Orientación de los Espigones	53
Figura 23: Comportamiento del flujo alrededor de un espigón permeable de madera..	54
Figura 24: Patrones de flujo en un sistema de espigones permeables	55
Figura 25: Geometría y disposición del entramado de los espigones permeables de madera	57
Figura 26: Área de la estructura en contacto con el agua durante la etapa experimental.	59
Figura 27: Nivel máximo de agua durante los ensayos experimentales.....	59
Figura 28: Planta general del canal experimental.....	60
Figura 29: Curva granulométrica del material de fondo del canal experimental.	61
Figura 30: Curva granulométrica del material en suspensión alimentado durante los ensayos experimentales	62
Figura 31: Curva de descarga utilizada durante los ensayos experimentales.....	67
Figura 32: Suministro de sedimentos mediante un sistema de vibración electrónico ...	69
<i>Figura 33: Sonda del Vectrino Profiler</i>	<i>71</i>
Figura 34: Esquemización de la transmisión del pulso desde la sonda central y recepción de los pulsos por las sondas laterales	71
Figura 35: Longitudes de transmisión e intersección desde el transductor central	72
Figura 36: Sistema de coordenadas del Vectrino Profiler	72
Figura 37: Partes principales del soporte del Vectrino Profiler y puente móvil.....	73
Figura 38: Cinta métrica para la regulación del volumen de control	74
Figura 39: Almacenamiento de los datos de velocidades en una laptop para su posterior procesamiento.....	74
Figura 40: Vista en planta de las partículas de baja densidad, para el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad.	79

Figura 41: Vista en planta de las partículas de baja densidad, para el ensayo con estructuras de 46% de permeabilidad	79
Figura 42: Comparación de los vectores de velocidad en la sección S-1.....	80
Figura 43: Comparación de los vectores de velocidad en la sección S-2.....	81
Figura 44: Comparación de los vectores de velocidad en la sección S-5.....	82
Figura 45: Comparación de los vectores de velocidad en la sección S-8.....	83
Figura 46: Comparación de los vectores de velocidad en la sección S-11.....	84
Figura 47: Comparación de los vectores de velocidad en la sección S-15.....	85
<i>Figura 48: Vista general de la erosión en las estructuras de 46% de permeabilidad. .</i>	<i>86</i>
<i>Figura 49: Vista general de la erosión en las estructuras de 26% de permeabilidad. .</i>	<i>86</i>
Figura 50: Ubicación de las secciones y puntos de muestreo de sedimentos en Suspensión en el canal experimental.	87
Figura 51: Ubicación de las muestras (M-1, M-2, M-3 y M-4) en cada punto de las secciones transversales S-1, S-2, S-8, S-14 y S-15.	88
Figura 52: Ubicación de las muestras (M-1, M-2, M-3 y M-4) en cada punto de las secciones transversales S-5 y S-11, ubicadas en el eje de los espigones E-2 y E-3.	88
Figura 53: Concentración de sedimentos en suspensión en las secciones S-1, S-2, S-5 y S-8, para el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad.....	89
Figura 54: Concentración de sedimentos en suspensión en las secciones S-11, S-14 y S-15, para el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad.	90
Figura 55: Concentración de sedimentos en suspensión en las secciones S-1, S-2, S-5 y S-8, para el ensayo con estructuras de 46% de permeabilidad.....	91
Figura 56: Concentración de sedimentos en suspensión en las secciones S-11, S-14 y S-15, para el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad.	92
Figura 57: Cortes transversales en las secciones: S-1, S-2, S-3, S-5, S-7, S-8, S-9, S-11, S-13, S-14 y S-15.....	95
Figura 58: Erosión y deposición en todo el ancho del canal experimental, para cada uno de los ensayos realizados.....	95
Figura 59: Alturas de sedimentación a lo largo del tiempo para cada uno de los ensayos realizados, a 35 cm de la margen derecha, en la sección S-8.	96
Figura 60: Visualización de las dunas en el canal experimental	97
Figura 61: Perfiles de concentración de sedimentos en suspensión en la sección S-1, para el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad.	98

Figura 62: Perfil de velocidades en la sección S-1, para el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad.....	98
Figura 63: Perfiles de concentración de sedimentos en suspensión en la sección S-15, Para el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad	99
Figura 64: Perfil de velocidades en la sección S-15, para el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad	99
Figura 65: Perfiles de concentración de sedimentos en suspensión en la sección S-1, para el ensayo con estructuras de 46% de permeabilidad.	100
Figura 66: Perfil de velocidades en la sección S-1, para el ensayo con estructuras de 46% de permeabilidad.....	101
Figura 67: Perfiles de concentración de sedimentos en suspensión en la sección S-15, para el ensayo con estructuras de 46% de permeabilidad	102
Figura 68: Perfil de velocidades en la sección S-15, para el ensayo con estructuras de 46% de permeabilidad	102
Figura 69: Variación promedio de los tirantes del agua en el canal experimental, para los ensayos con estructuras de 26% y 46%.	104
Figura 70: Vista panorámica de los equipos de la Carpintería del Laboratorio Nacional de Hidráulica “Alfonso Alcedán La Cruz”	111
Figura 71: Vista panorámica del canal experimental utilizado, después de un ensayo típico.....	111
Figura 72: Visualización de la compuerta tipo Clapeta, instalada a la salida del canal experimental para regular los tirantes.....	111
Figura 73: Vista panorámica del tanque elevado, tuberías de alimentación y rebose y válvulas tipo compuerta instaladas en la tubería de alimentación al modelo físico	111
Figura 74: Vista panorámica de la tubería de alimentación de caudal al modelo experimental	111
Figura 75: Vista panorámica del Vertedero rectangular de pared delgada.....	111
Figura 76: Disipadores de energía de malla tipo gallinero	111
Figura 77: Funcionamiento de los disipadores de energía en la entrada del canal, durante los ensayos experimentales.....	111
Figura 78: Bomba hidráulica usada durante los ensayos experimentales, ubicada en la División Didáctica del LNH.....	111
Figura 79: Escaneo del lecho, después de haber realizado los ensayos experimentales	111

Figura 80: Nivelación del lecho de arena, a través de un regleado cada 0.5 m.....	111
Figura 81: Almacenamiento de la muestra de sedimentos en suspensión en una botella debidamente codificada.	111
Figura 82: Mangueras de 3/8” de diámetro ubicadas cada 5 cm verticalmente.	111
Figura 83: Sistema de evacuación de muestra de sedimentos en suspensión.....	111
Figura 84: Muestras de sedimentos en suspensión de diversos puntos y secciones del canal experimental.	111
Figura 85: probeta, vasos de pírax y balanza electrónica de precisión utilizados para obtener la concentración de sedimentos en suspensión.....	111
Figura 86: probeta, vasos de pírax y balanza electrónica de precisión utilizados para obtener la concentración de sedimentos en suspensión.....	111
Figura 87: Medición de un volumen de 100 ml de muestra de sedimentos en suspensión	111
Figura 88: Medición de un volumen de 100 ml de muestra de sedimentos en suspensión	111
Figura 89: Instalación de los espigones en la margen derecha del canal experimental	111
Figura 90: Análisis granulométrico del material de fondo a utilizar durante la etapa experimental	111

RESUMEN

El propósito de este trabajo es evaluar la eficiencia de retención de sedimentos en un sistema de espigones permeables de madera, en función de su permeabilidad, con la finalidad de aportar técnicamente, mediante estudios experimentales, a mejorar los criterios de diseño de estas estructuras y proponer su aplicación en la restauración de las riberas en los ríos de la amazonia peruana. Para tal fin se han realizado dos ensayos experimentales, cada uno de ellos con un conjunto de cuatro espigones de igual permeabilidad. Se utilizó una permeabilidad de 26% en el primer ensayo y 46% en el segundo ensayo, respectivamente. Las estructuras presentaron la forma de un paralelepípedo, para fomentar su estabilidad. La longitud (L) de las estructuras fue de 0.475 m, manteniendo una relación L/B de 0.25, donde B el ancho del canal experimental. El espaciamiento entre espigones (E) fue de 2 metros, manteniendo una relación E/L de 4.21 y un ángulo de orientación de 90° con respecto al flujo. Los ensayos se realizaron bajo las condiciones de flujo subcrítico, manteniendo un $Fr=0.22$. Se empleó un canal de sección rectangular de lecho móvil de 12 m de longitud, 1.9 m de ancho y una pendiente de 0.0008 m/m. Se registraron mediciones de velocidad del flujo usando un Acoustic Doppler Velocímetro (ADV), se recolectaron muestras de sedimentos en suspensión mediante un sistema de succión transversal y los cambios en los niveles del lecho se determinaron usando un escáner láser. Como resultado de la investigación, se determinó que las estructuras que presentan mayor eficiencia de retención de sedimentos son las que presentan una permeabilidad de 46%; a la vez, generan menos alteración en el comportamiento del flujo y por consiguiente no presentaron significativa erosión local en comparación con las estructuras de 26% de permeabilidad.

Palabras Clave: Eficiencia, retención de sedimentos, espigones permeables.

ABSTRACT

The purpose of this work is to evaluate the efficiency of sediment retention in a system of permeable wooden groynes, based on their permeability, with the purpose of providing technically, through experimental studies, to improve the design criteria of these structures and propose its application in the restoration of riverbanks in the rivers of the peruvian amazon. For this purpose, two experimental tests have been carried out, each one with a set of four groynes of equal permeability. A permeability of 26% was used in the first test and 46% in the second test, respectively. The structures presented the form of a parallelepiped, to promote its stability. The length (L) of the structures was 0.475 m, maintaining an L/B ratio of 0.25, where B the width of the experimental channel. The spacing between groynes (E) was 2 meters, maintaining an E/L ratio of 4.21 and an orientation angle of 90° with respect to the flow. The tests were carried out under the conditions of subcritical flow, maintaining a $Fr=0.22$. A channel with a rectangular section of a moving bed 12 m long, 1.9 m wide and a slope of 0.0008 m/m was used. Flow velocity measurements were recorded using an Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), sediment samples were collected in suspension by a transverse suction system and changes in the levels of the bed were determined using a laser scanner. As a result of the investigation, it was determined that the structures with the highest sediment retention efficiency are those with a permeability of 46%; at the same time, they generate less alteration in the behavior of the flow and consequently did not show significant local erosion in comparison with the 26% permeability structures.

Keywords: Efficiency, retention of sediments, permeable groynes.

I. INTRODUCCIÓN

Los ríos de la amazonia peruana se caracterizan por presentar bajas pendientes y transportar elevadas cargas de sedimentos en suspensión. Sus aguas discurren en suelos aluviales y su caudal varía dependiendo la época del año. Su dinamismo e inestabilidad dificulta y encarece el aprovechamiento de sus áreas próximas, así como también pone en riesgo poblaciones y estructuras civiles adyacentes (ROCHA, A. 1998).

Ante esto, surge la necesidad de proteger sus riberas e impedir la erosión lateral, existiendo métodos de estabilización de ríos, los que se clasifican bajo el enfoque de fortalecimiento de la ribera y la reducción de las fuerzas hidrodinámicas de cantidad de movimiento (JULIEN, P. 2002).

Para mitigar los efectos de la erosión lateral, es necesario utilizar ambos enfoques, ya que sus riberas están compuestas de material susceptible a erosionar. En la actualidad, los problemas de restauración y estabilización de riberas necesitan ser abordados desde una perspectiva ambiental, social y económica (SHIELDS, D. 2001).

Motivo por el cual, el Laboratorio Nacional de Hidráulica “Alfonso Alcedán la Cruz”, propone el uso de la madera para la construcción de espigones permeables mediante entramados, basándose en la tecnología de los Engineered Log Jams (ELJs, por sus siglas en inglés), los cuales permitirán proteger y recuperar las riberas de los ríos de nuestra amazonia, siendo la madera un material abundante en esta región. Para esto, es necesario recurrir a estudios experimentales, a fin de entender y explicar los fenómenos hidráulicos asociados y los cambios morfológicos que estas estructuras producen.

El presente estudio, forma parte de los estudios complementarios de un programa de investigación, que busca comprender mejor la respuesta morfodinámica de los ríos amazónicos a la introducción de espigones de madera, mejorar y refinar los criterios de diseño y la resiliencia de estas estructuras para su uso en proyectos de restauración fluvial en esta región, realizados en el Laboratorio Nacional de Hidráulica; el principal objetivo de este trabajo es determinar cualitativamente, mediante ensayos experimentales, la permeabilidad de los espigones de madera que permitan retener mayor cantidad de sedimentos. Con la finalidad de aportar técnicamente a mejorar los criterios de diseño de estas estructuras para proponer su futura aplicación en la recuperación y restauración de las riberas en los ríos de la amazonia peruana.

El trabajo se lo ha dividido de la siguiente manera:

En el capítulo I se presenta el problema, justificación, alcances, limitaciones, antecedentes y objetivos de la investigación. En el capítulo II se presenta el marco teórico, En el capítulo III se presenta los materiales y métodos, donde se muestra el procedimiento seguido en la investigación, y se describe detalladamente los equipos utilizados durante la etapa experimental. En el capítulo IV se presenta el análisis y discusión de resultados donde se analiza los resultados obtenidos y se presentan tablas y gráficos para tales fines; finalmente en el capítulo V se presenta las conclusiones y recomendaciones, y posteriormente las referencias bibliográficas y anexos.

1.1.PROBLEMA

¿Cuál es la permeabilidad de los espigones permeables de madera con mayor eficiencia de retención de sedimentos?

Hasta la actualidad, no se han desarrollado trabajos de investigación orientados a responder esta interrogante, motivo por el cual recurrimos a la hidráulica experimental.

¿Es posible la implementación de los espigones permeables de madera en los ríos de la amazonia peruana?

La respuesta a esta interrogante es afirmativa, siempre y cuando se hayan comprendido los fenómenos hidráulicos asociados, así como también, los cambios morfológicos que la introducción de estas estructuras produce en los lechos fluviales.

1.2.JUSTIFICACIÓN

La madera, es un material que se presenta como una alternativa ambiental y económica para la construcción de espigones permeables en los ríos de la amazonia peruana. Sin embargo, para su adecuada aplicación, es necesario entender tanto los fenómenos hidráulicos como los efectos morfológicos que producen estas estructuras. En este sentido, la principal variable de estudio, es su permeabilidad.

El estudio de la permeabilidad es de suma importancia, ya que está relacionada tanto con la erosión local en la cabeza de la estructura, así como también en el proceso de retención de sedimentos. Estudios experimentales, han demostrado que la erosión local en la punta de los espigones, disminuye a medida que se aumenta el grado de permeabilidad. Sin embargo, aún no existen investigaciones orientadas a estudiar la eficiencia de retención

de sedimentos, en función de la permeabilidad. Motivo por el cual, recurrimos a la hidráulica experimental para llenar este vacío importante en el diseño de estas estructuras, a fin de tener una base científica sólida para su implementación en la protección y recuperación de las riberas en los ríos de la amazonia peruana.

1.3.ALCANCES

El conocimiento de la permeabilidad de los espigones de madera con mayor eficiencia de retención de sedimentos, será necesario para adoptar criterios de diseño de estas estructuras, con la finalidad de proteger y restaurar, en tiempos relativamente cortos, las riberas de los ríos de la amazonia peruana. Lo cual permitirá evitar el colapso de estructuras civiles adyacentes, áreas de cultivo, poblaciones, entre otros.

1.4.LIMITACION

Se realizaron únicamente dos ensayos experimentales, debido a la falta de recursos económicos para el levantamiento topográfico del lecho del canal experimental después de cada ensayo. Cada ensayo experimental se realizó utilizando cuatro espigones de igual permeabilidad, orientados 90° con respecto al flujo.

1.5.ANTECEDENTES

Los espigones permeables de madera o entramados con troncos de árboles (ELJ's, por sus siglas en inglés) han sido ampliamente utilizados en el Nor Este del Pacífico y en el Norte de América durante la última década, como una alternativa de enfoque más sostenible a la gestión de los ríos. Se ha utilizado para la protección de los bancos, riberas y la mejora del hábitat en ríos con alta pendiente. Su éxito se ha desarrollado en el país de Escocia donde se han solucionado muchos problemas en la gestión de los ríos en este país (HERRERA ENVIRONMENTAL CONSULTANTS, 2006).

Los espigones entramados con troncos de árboles (ELJ's) se refiere a cualquier tipo de estructuras de madera dentro de la corriente que realizan un medio eficaz para restaurar el hábitat y los problemas tradicionales de la ingeniería de ríos, tales como la erosión de bancos, las inundaciones, los daños en los puentes, la incisión del canal, entre otros. Esta tecnología se basa en la premisa del manejo de los medios fluviales, ya sea para problemas tradicionales en ingeniería de ríos o para la restauración del hábitat. Durante siglos, la madera se ha utilizado para estructuras en los cauces del río, tales como, diques, espigones, tablestacas, entre otros. Los entramados de madera son estructuras de ingeniería que reproducen la complejidad que se encuentra en los sistemas naturales. Las

primeras estructuras modernas de este tipo se construyeron en el año 1995 por un propietario privado para proteger los bancos del río Cowlitz en el estado de Washington (HERRERA ENVIRONMENTAL CONSULTANTS, 2006).

La tecnología de los ELJ's ha sobresalido por el manejo sostenible del medio ambiente en los lugares donde se ha proyectado, en Estados Unidos de América el American Council of Engineering Companies y la American Society of Civil Engineers (ASCE) han premiado esta tecnología.

A continuación, se presentan algunos de los estudios más recientes que guardan alguna relación con la presente investigación. Además, en la tabla 1 se presenta resumidamente algunos estudios experimentales realizados para evaluar el comportamiento de la madera en los ríos, destacando las instalaciones utilizadas, las condiciones de contorno utilizadas y los fenómenos examinados.

Tabla 1: Relación de investigaciones orientadas a examinar el comportamiento del flujo alrededor de los espigones de madera en los ríos.

Fuente: GALLISDORFER, et al (2014)

Estudio	Uso de prototipo	Escala	Dimensiones del modelo: Ancho, altura, longitud (m)	Tipo de lecho, D ₅₀ (mm)	Caudal (m ³ /s)	Tirante (m)	Dimensiones de la madera: diámetro, longitud (m)	Fenómeno investigado
Beschta, 1983	No	NA	0.132, 0.6, 10	Móvil, 54	0.001-0.027	0.27 - 0.55	0.06 - 0.20, NA	Efecto de los restos de madera en la morfología del lecho
Cherry y Beschta, 1989	No	NA	0.40, NA, 6.1	Móvil, 0.04	0.001-0.003	0.012 - 0.02	0.0127, NA	Efectos de la orientación de la madera en la morfología del lecho
Young, 1991	No	Fr	0.46, 0.27, 8	Fijo	0.0041	0.1	0.013 - 0.025	Efectos de la abundancia de los restos de madera en el nivel de inundación
Gippel, 1992	No	NA	0.6, NA, NA	NA	0.037-0.082	0.1 - 0.25	0.048 - 0.076	Coefficiente de arrastre y efectos del bloqueo al flujo de los restos de madera
Braudrick, 1997	No	NA	1, NA, 15	Móvil, 1	0.0045-0.012	0.015 - 0.027	0.02 - 0.04, 0.2-0.4	Dinámica del transporte de madera
Beebe, 2000	No	NA	0.63, NA, 10	Móvil, 0.04	0.008-0.022	0.065 - 0.126	0.063, 0.582	Efectos de los restos de madera en el flujo
Braudrick y Grant, 2000	No	NA	1.22, NA, 9.14	Fijo, 8	0.008-0.011	0.015 - 0.020	0.025 - 0.038	Arrastre de registros individuales de madera
Wallerstein, 2001	Sí	Fr	0.63, 0.61, 10	Móvil, 8	0.003	0.07	0.019, 0.07 - 0.3	Efectos de los restos de madera en la hidráulica y morfología del canal
Wallerstein, 2002	Sí	Fr	1.2, 0.3, 25	Fijo	0.076	0.03	0.019, 0.07 - 0.3	Fuerzas de arrastre actuantes en los restos de madera
Alonso, 2005; SHIELDS y Alonso, 2012	No	A escala	1.8, 0.8, 137	Grass	2.07-3.43	0.80 - 0.85	0.22 - 1.80	Fuerzas de arrastre y elevación actuantes en los restos de madera
Bocchiola, 2006	No	NA	1, NA, 30	Fijo, 2 y 5	0.0031-0.045	0.015 - 0.068	0.03 - 0.1	Arrastre de los restos de madera
Wilcox, 2006; Wilcox y Wohl, 2006	No	NA	0.6, NA, 10	Fijo, 15	0.004-0.064	0.01-0.14	0.3 - 0.6	Efectos de los restos de madera en la resistencia al flujo
Bocchiola, 2011	No	NA	1, NA, 30	Fijo, 1.8	0.0011-0.0200	0.008 - 0.050	0.006 - 0.026	Efectos de la reintroducción de los restos de madera en los parámetros hidráulicos de un canal
Svoboda y Russel, 2011	No	Fr	2.7, NA, 9	Móvil, 8	0.034-0.24	0.05 - 0.170	0.091 - 0.183; 1.40	Efecto de los restos de madera en la morfología del lecho

En el artículo titulado “Design of Large Woody Debris Structures for Channel Rehabilitation”, desarrollado por SHIELDS, D. y MORIN, N. en el año 2001, se menciona que los ELJ’s poseen un potencial considerable como medidas de bajo costo para rehabilitar pequeñas corrientes de lecho de arena (Área de drenaje <200 km²). Una aplicación exitosa resultará cuando no exista erosión en las estructuras y permita recuperar el ecosistema. Sin embargo, las estructuras son vulnerables después de su instalación, pero antes de que se haya depositado suficiente sedimento dentro de la matriz de desechos madereros para contrarrestar las fuerzas de flotación. Otro periodo peligroso ocurrirá cuando las estructuras se descompongan y se desintegren si la colonización de los depósitos de sedimentos por la vegetación leñosa no es rápida. Por último, las perspectivas a largo plazo dependen de una estrategia a nivel de toda la cuenca para controlar las fuentes de sedimentos aguas arriba de modo que la nueva morfología desarrollada por los ELJ’s se aproximará al equilibrio dinámico con los insumos de agua y sedimentos.

En el artículo titulado “Sediment Exchange Between a River and Its Groyne Fields: Mobile-Bed Experiment”, desarrollado por MOHAMED y otros, en el año 2010, se muestran los resultados de los estudios experimentales realizados en un canal de laboratorio de lecho móvil con la finalidad de estudiar el proceso de intercambio de sedimentos entre el canal principal y el campo de espigones, el experimento fue diseñado para representar la mitad del ancho del Dutch River Waal en Holanda, a una escala geométrica de 1:100; el estudio se realizó usando espigones no permeables con talud en las paredes laterales. Las condiciones fueron ajustadas para garantizar el transporte de carga de fondo, así como también la carga de sedimentos en suspensión. Las pruebas se realizaron con espigones sumergidos y no sumergidos; durante la etapa experimental se realizaron mediciones de los cambios del nivel del lecho, concentración de sedimentos en suspensión y velocidades del flujo. Los resultados que se obtuvieron demostraron que, bajo todas las condiciones de flujo estudiadas, existe una importación neta de sedimentos en los campos de espigones y que la turbulencia formada debido a la invasión de estas estructuras en el lecho altera los parámetros de erosión y sedimentación.

En el artículo titulado “Physical-Scale Model Designs for Engineered Log Jams in Rivers”, desarrollado por GALLISDORFER y otros, en el año 2014, presentan y discuten la base de modelos a escala física de los ríos con ELJ’s. Para ello se estudió en modelo físico de lecho móvil y fijo el río Grande de Sioux en USA, elegido porque aquí se utilizó

ELJ's para mitigar la excesiva erosión lateral. Los estudios se realizaron con la finalidad de evaluar el comportamiento del flujo y sedimentos, llegando a la siguiente conclusión: Los ELJ's desaceleran de manera significativa el flujo cerca de la estructura y permiten que se acelere considerablemente en la parte principal del canal, además, se presentó significativa erosión local y sedimentación, los cuales se extendieron bien aguas abajo.

En el artículo titulado “The Design and Application of Permeable Groynes”, desarrollado por CAO y otros, en el año 2013, se mencionan algunas recomendaciones acerca del diseño de espigones permeables de forma general e indica que la permeabilidad óptima de un espigón depende de varios parámetros límite (Velocidades del flujo, turbulencia local, distribución del tamaño del grano, etc.) y está fuertemente interrelacionada con las condiciones estructurales del campo de espigones (número y longitud de los espigones, espaciamiento en la dirección del flujo). También afirma que el diseño debe permitir una reducción eficiente de las velocidades del flujo a lo largo del eje del espigón, para evitar que la ribera del río socave. Por otro lado, con el aumento de la permeabilidad de un espigón, se reducen considerablemente los efectos relacionados con la separación del flujo y la generación de remolinos grandes (seguidos por las corrientes de retorno) y, por lo tanto, el lavado local en el cabezal del espigón.

En el Perú, el Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH) realizó el trabajo de investigación “Espigones fabricados con troncos de árboles: Una alternativa contra la erosión en ríos meándricos”, proyecto desarrollado mediante convenio N° 358-PNICE-PIAP-2014, entre la UNI e INNOVATE PERÚ. La investigación se realizó en un modelo físico no distorsionado de lecho móvil a escala 1:60, teniendo como prototipo al Río Madre de Dios, Sector La Pastora. Los resultados obtenidos durante la etapa experimental mostraron que estas estructuras presentan un buen comportamiento, logrando reducir la velocidad del flujo cerca del banco externo del meandro. Además, se identificó una considerable cantidad de sedimentos retenidos en el campo de espigones. Por otro lado, en el proyecto de tesis “Estudio experimental de la permeabilidad de los espigones con troncos de árboles”, se identificó mediante ensayos experimentales en un canal de laboratorio de sección rectangular de lecho móvil, las permeabilidades de los espigones entramados con troncos de árboles que generan menor y mayor erosión local; estos ensayos se realizaron utilizando un solo espigón a lo largo del canal. Este estudio es financiado por el Instituto General de Investigación de la Universidad Nacional de

Ingeniería (IGI-UNI) y fue ejecutado en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Hidráulica.

De lo anterior, se concluye que no existen hasta la actualidad estudios orientados a estimar la eficiencia de retención de sedimentos de los espigones permeables de madera, asociados a la permeabilidad. Si bien, en los estudios de permeabilidad desarrollados en el Laboratorio Nacional de Hidráulica se establece una relación entre permeabilidad y erosión local, aún se desconoce cuán eficientes son estas estructuras reteniendo sedimentos cuando se construyen varios espigones consecutivos. Para lograr el fin establecido, es necesario estudiar el comportamiento del flujo cerca de las estructuras, la distribución de sedimentos en suspensión antes y después de cada estructura y los mecanismos que intervienen en el proceso de intercambio de sedimentos entre el canal principal y el espacio comprendido entre los cabezales de dos espigones consecutivos y el talud en el cual se apoyan.

1.6.OBJETIVOS

a) OBJETIVO GENERAL

- Determinar, experimentalmente, la permeabilidad de los espigones de madera con mayor eficiencia de retención de sedimentos; con la finalidad de aportar técnicamente a mejorar los criterios de diseño de estas estructuras en los ríos de la amazonia peruana.

b) OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las condiciones hidráulicas del canal experimental; así como también, las características de los sedimentos, de manera tal que permita garantizar el transporte de sedimentos tanto de fondo como en suspensión.
- Dimensionar, construir e instalar en el canal experimental los espigones permeables de madera.
- Observar el comportamiento del flujo y sedimentos en suspensión en las secciones correspondientes al eje de los espigones, aguas arriba y aguas abajo de los mismos.

II. MARCO TEÓRICO

2.1.FUNDAMENTOS DE LA HIDRÁULICA EXPERIMENTAL

En el diseño de obras hidráulicas, cualquiera que fuera el tipo, el ingeniero hidráulico generalmente tiene que lidiar con el equilibrio dinámico y movimiento del agua y/o combinaciones agua – sedimento. Motivo por el cual, se torna complicado realizar diseños basándose sola y únicamente en expresiones matemáticas existentes, ya que estas pueden o no estar desarrolladas cabalmente o no ser aplicables a una realidad en concreto. Como auxilio a este vacío desde hace algunos años atrás se ha recurrido a la hidráulica experimental, cuyo desarrollo ha sido intenso durante el pasado siglo XX, especialmente en la segunda mitad (ARISTA, R. 2004).

Los estudios experimentales en ingeniería hidráulica generalmente se realizan con las siguientes finalidades (ASCE, 2000):

1. Analizar un fenómeno hidráulico.
2. Verificar las ecuaciones formuladas analíticamente para describir un proceso o fenómeno hidráulico dado, y/o
3. Optimizar el diseño de una obra hidráulica.

Siendo la primera de estas la que nos motiva al desarrollo del presente trabajo de investigación.

2.2.HIDRÁULICA FLUVIAL

a) ECUACIONES FUNDAMENTALES

El flujo de agua en cauces naturales y la escorrentía sobre la cuenca son procesos distribuidos o fenómenos hidráulicos porque el caudal, la velocidad y la profundidad varían en el espacio. Las estimaciones a lo largo de estos cauces pueden obtenerse utilizando las ecuaciones de conservación de masa y ecuación de cantidad de movimiento, que permiten el cálculo del caudal y del nivel del agua como funciones del espacio y tiempo.

El proceso real de flujo en ríos varía en las tres dimensiones espaciales; sin embargo, para muchas aplicaciones prácticas, las variaciones espaciales de la velocidad a lo ancho del canal y con respecto a la profundidad pueden ignorarse, de tal manera que el flujo puede aproximarse como unidimensional a lo largo del canal o en la dirección de flujo.

Las ecuaciones de Saint – Venant, desarrolladas por Barre de Saint Venant en 1871, describen el flujo unidimensional no permanente en un canal abierto, que es aplicable en el presente estudio. Estas ecuaciones son probablemente las más conocidas y empleadas para en análisis del flujo transitorio en canales.

- **ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE MASA**

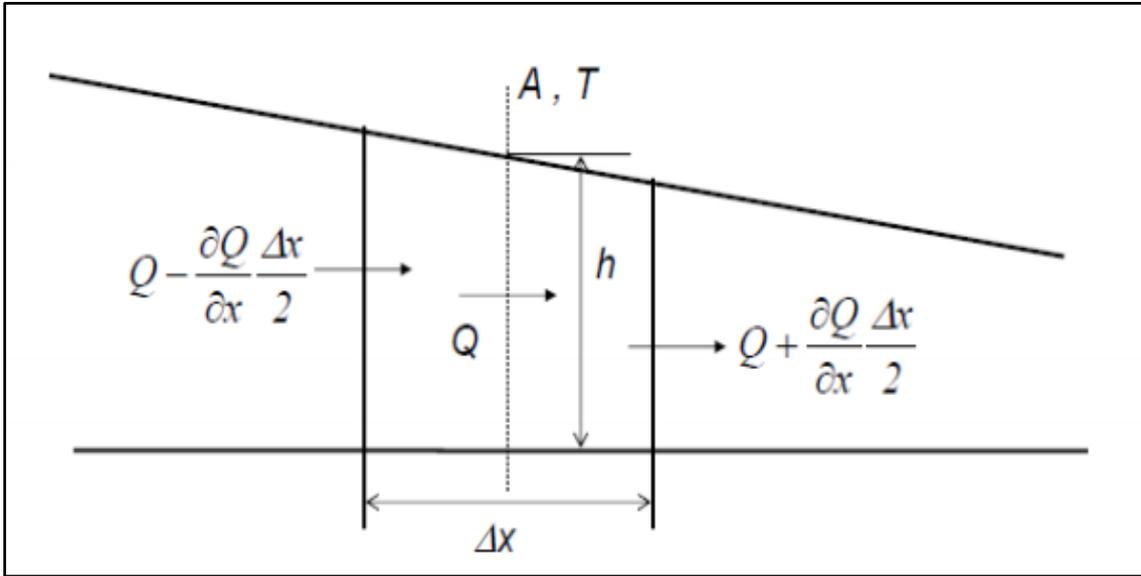


Figura 1: Descarga a través de un volumen de control elemental
Fuente: CABRERA, J. 2016.

Con referencia al volumen de control de la figura 1: Q, h, A y T son la descarga, el tirante, el área hidráulica y es espejo de agua en el centro del volumen de control, respectivamente, en el instante t.

El principio de conservación de masa implica que el flujo neto a través del volumen de control en el intervalo Δt debe ser igual al cambio del volumen de control en el mismo intervalo. Matemáticamente, se expresa de la siguiente manera:

$$\left[\left(Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \right] \Delta t = - \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \Delta t = \frac{\partial (A \Delta x)}{\partial t} \Delta t \quad (1)$$

Por lo tanto, la ecuación de conservación de masa resulta:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

En términos de la velocidad: $Q=VA$, se obtiene:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(AV)}{\partial x} = B \frac{\partial h}{\partial t} + A \frac{\partial V}{\partial x} + BV \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

Dónde:

V: es la velocidad media.

B: es el ancho del canal.

Para un canal rectangular: $A=Bh$, por lo que la ecuación (3) se reduce a:

$$\frac{\partial(Vh)}{\partial x} + \frac{\partial(h)}{\partial t} = V \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial(h)}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

• ECUACIÓN DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO

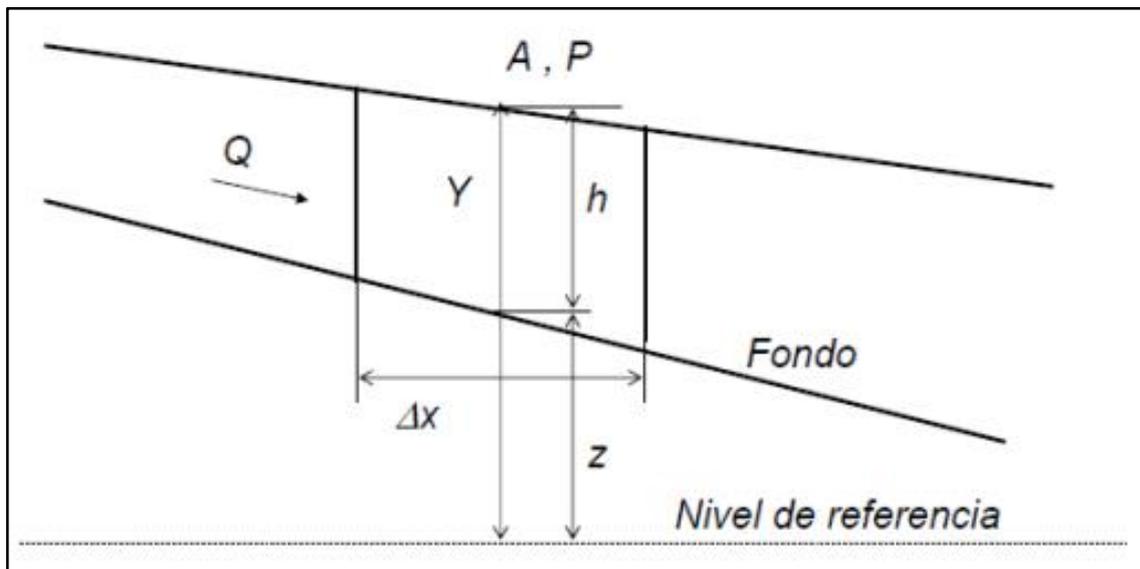


Figura 2: Esquema para la deducción de la ecuación de cantidad de movimiento
Fuente: CABRERA, J. 2016.

Conociendo que la aceleración total en la dirección del flujo es:

$$a = \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \quad (5)$$

La ecuación de cantidad de movimiento para el tramo considerado es:

$$\rho A \Delta x \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \right) = -\rho g A \Delta Y - \tau_0 P \Delta x \quad (6)$$

Teniendo en consideración que:

$$\tau_0 = \rho g R S_f$$

$$P = \frac{A}{R}$$

$$\frac{\Delta Y}{\Delta x} = \frac{\partial Y}{\partial x}$$

$$Y = z + h$$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = -S_0$$

Dónde:

R: Radio hidráulico.

P: Perímetro mojado.

g: Aceleración de la gravedad.

La ecuación (6), se transforma en términos de la velocidad y profundidad en:

$$\underbrace{\frac{\partial V}{\partial t}}_{\text{aceleración local}} + V \underbrace{\frac{\partial V}{\partial x}}_{\text{aceleración convectiva}} + \underbrace{g \frac{\partial h}{\partial x}}_{\text{fuerza de presión}} + \underbrace{g}_{\text{fuerza de gravedad}} \underbrace{(S_f - S_0)}_{\text{fuerza de fricción}} = 0 \quad (7)$$

En términos de la velocidad y área se tiene:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{g}{B} \frac{\partial A}{\partial x} + (S_f - S_0) = 0 \quad (8)$$

En términos del caudal, área y profundidad se tiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0 \quad (9)$$

b) CLASIFICACIÓN DE FLUJOS

Desde el punto de vista práctico, resulta adecuado establecer una clasificación de tipos de flujo (CHOW, V. 1982).

Tal que, con auxilio de una serie de suposiciones simplificatorias, permita hacer una distinción de las diferentes formas o estados en que se presenta el flujo a superficie libre en la realidad.

El flujo unidimensional a superficie libre puede ser clasificado con base en diferentes criterios, la más aceptada y conocida es posiblemente la siguiente (GARCÍA, N. 1989; VILLÓN, M. 2007; RODRÍGUEZ, P. 2008; SOTELO, G. 2009):

Tabla 2: Clasificación de flujo unidimensional

TIPO DE FLUJO	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN
Permanente y no permanente	Tiempo
Uniforme y variado	Espacio
Laminar y turbulento	Fuerzas viscosas
Subcrítico y supercrítico	Fuerza de gravedad

- **FLUJO PERMANENTE**

Las características hidráulicas (velocidad (v), tirante (Y) y caudal (Q)) en cualquier sección transversal del canal permanecen constantes todo el tiempo (t) o durante un lapso específico, matemáticamente se puede representar de la siguiente manera:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 0, \frac{\partial Q}{\partial t} = 0, \frac{\partial Y}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

- **FLUJO NO PERMANENTE**

Las características hidráulicas (velocidad (V), tirante (Y) y caudal (Q)) en una sección transversal varían de un instante a otro, matemáticamente se puede representar de la siguiente manera:

$$\frac{\partial V}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial Y}{\partial t} \neq 0 \quad (11)$$

- **FLUJO UNIFORME**

Las características hidráulicas (velocidad (V), tirante (Y) y caudal (Q)) permanecen constantes a lo largo del canal. Este tipo de flujo se puede presentar en la práctica solamente en estado permanente, matemáticamente se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{\partial V}{\partial s} = 0, \quad \frac{\partial Q}{\partial s} = 0, \quad \frac{\partial Y}{\partial s} = 0 \quad (12)$$

- **FLUJO VARIADO**

La velocidad media (V) y el tirante (Y) cambian a lo largo del canal, matemáticamente se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{\partial V}{\partial s} \neq 0, \quad \frac{\partial Y}{\partial s} \neq 0 \quad (13)$$

En este tipo de flujo existe una subclasificación:

Tabla 3: Sub clasificación del flujo variado

		Permanente	No permanente
Flujo variado	Gradualmente	$\frac{\partial Q}{\partial s} = 0$	$\frac{\partial Q}{\partial s} \neq 0$
	Rápidamente	$\frac{\partial Q}{\partial s} = 0$	$\frac{\partial Q}{\partial s} \neq 0$
	Espacialmente	$\frac{\partial Q}{\partial s} \neq 0$	$\frac{\partial Q}{\partial s} \neq 0$

La principal diferencia entre un flujo gradualmente variado y otro rápidamente variado radica en que para el primer caso se presenta una variación gradual de los tirantes a lo largo del canal y en el segundo caso dicha variación se presenta bruscamente entre dos secciones consecutivas o en un tramo muy corto (caso típico de un salto hidráulico).

- **FLUJO TURBULENTO**

En relación con el efecto de la viscosidad, el flujo puede ser laminar, de transición o turbulento. La influencia de la viscosidad (ν) se mide a través del número de Reynolds (R_e), que relaciona fuerzas de inercia con fuerzas viscosas, como se muestra a continuación:

$$R_e = \frac{VR_h}{\nu} \quad (14)$$

En la práctica se aceptan los siguientes rangos de clasificación:

Flujo laminar: Si $R_e < 500 - 600$, en este estado, las fuerzas viscosas son relativamente más grandes que las fuerzas de inercia.

Flujo de transición: Si $500 < R_e < 2000$, estado mixto entre laminar y turbulento.

Flujo turbulento: Si $R_e > 2000$, en este estado, las fuerzas viscosas son más débiles comparadas con las fuerzas de inercia.

- **FLUJO SUBCRÍTICO Y SUPERCRÍTICO**

Por lo que se refiere a la preponderancia de las fuerzas gravitatorias, existe también una clasificación, la cual queda definida por el número de Froude.

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g \frac{A}{T}}} \quad (15)$$

Entonces, por el número de Froude, el flujo puede ser:

Subcrítico: Si $F_r < 1$, en este estado, las fuerzas de gravedad se hacen dominantes, por lo que el flujo tiene baja velocidad, siendo tranquilo y lento. En este tipo de flujo, toda singularidad tiene influencia hacia aguas arriba.

Crítico: Si $F_r = 1$, en este estado, las fuerzas de inercia y gravedad están en equilibrio.

Supercrítico: Si $F_r > 1$, en este estado, las fuerzas de inercia son más profundas, por lo que el flujo tiene una gran velocidad, siendo rápido o torrentoso. En este tipo de flujo, toda singularidad tiene influencia hacia aguas abajo.

2.3. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Sedimento es una palabra que tiene diferentes significados en diferentes ciencias. En Hidráulica Fluvial se entiende por sedimento (sólido) cualquier material granular más pesado que el agua que es transportado en algún momento por la corriente y luego depositado (ROCHA, A. 1998).

La Real Academia Española define sedimento como: material que, habiendo estado suspendido en un líquido, se posa en el fondo por su mayor gravedad.

El proceso de “transporte de sedimentos” involucra las etapas de: erosión, iniciación del movimiento, transporte, depósito y compactación de las partículas sólidas (ROCHA, A. 2013).

a) PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SEDIMENTOS

Las partículas sólidas pueden clasificarse en cohesivas y no cohesivas. Las primeras son las que están adheridas unas a otras, lo cual representa para el transporte una fuerza adicional que se conoce como fuerza de cohesión. Los materiales cohesivos pueden encontrarse entre arcillas y limos. En cambio, los materiales no cohesivos (granulares) carecen de esta fuerza adicional, y para no ser arrastrados solo ofrecen la resistencia proveniente de su propio peso y forma.

El presente trabajo se realizó usando partículas no cohesivas, motivo por el cual nos centraremos en las propiedades y el comportamiento de estas solamente. Las propiedades físicas de los sedimentos de interés son: tamaño, forma, peso específico y velocidad de caída. Estas propiedades se refieren a las partículas individuales y no al conjunto de ellas, como sería el caso de la porosidad o el peso específico aparente y distribución granulométrica.

• TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS:

Una de las propiedades más importante del sedimento es su tamaño, debido a que influye directamente en la velocidad de sedimentación asociada al transporte sólido y, por otra parte, influye en la rugosidad del cauce y, como consecuencia en el régimen de velocidades.

El tamaño de la partícula queda definido por los siguientes conceptos (MARTÍNEZ, E. 2001):

Diámetro nominal (d_n):

Diámetro de una esfera cuyo volumen sea igual al de la partícula. Matemáticamente se la puede calcular haciendo uso de la siguiente expresión:

$$d_n = \left[\frac{6}{\pi} V \right]^{1/3} \quad (16)$$

Dónde:

V: Volumen de la partícula.

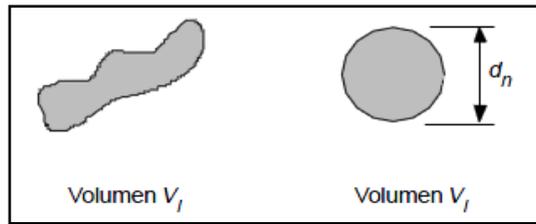


Figura 3: Esquemización del diámetro nominal

Fuente: ROCHA, A. 1998

“Ni la forma, ni la densidad de la partícula influyen en la determinación del diámetro nominal, porque partículas de muy diferente forma y densidad pueden tener el mismo volumen y, por consiguiente, el mismo diámetro nominal. Por ello, este diámetro casi no se emplea en estudios sobre transporte de sedimentos. Se utiliza preferentemente para definir el tamaño de las partículas gruesas, ya que la medición del volumen de una partícula se hace tanto más difícil y poco práctica, cuánto más pequeña es la partícula de que se trata”. (MAZA, J. y GARCÍA, M. 2015)

Diámetro de cribado

Se define como la abertura de la malla mínima para que pase la partícula. Este indicador es el más usado por la facilidad para determinarlo (ROCHA, A. 2013).

Se utiliza generalmente para definir el tamaño de las partículas mayores a 0.062 mm (MAZA, J. y GARCÍA, M. 2015), como las arenas y gravas.

Partículas largas de sección transversal angosta pueden pasar o no a través de una malla de abertura pequeña; si logran pasar, significa que el diámetro de cribado clasifica las partículas de acuerdo con su menor área transversal; pero si ello no ocurre, la clasificación es según la mayor dimensión triaxial de la partícula por lo que el diámetro de cribado no tiene en cuenta la forma real de los granos ni su densidad. En el caso de una esfera, los diámetros nominales y de cribado siempre son iguales (MAZA, J. y GARCÍA, M. 2015).

Diámetro de sedimentación

Diámetro de una esfera del mismo material (igual peso específico) cuya velocidad de sedimentación sea idéntica al de la partícula (MARTÍNEZ, E. 2001).

En el diámetro de sedimentación se incluyen las propiedades del fluido en el que se mueve la partícula (a través de la velocidad de sedimentación).

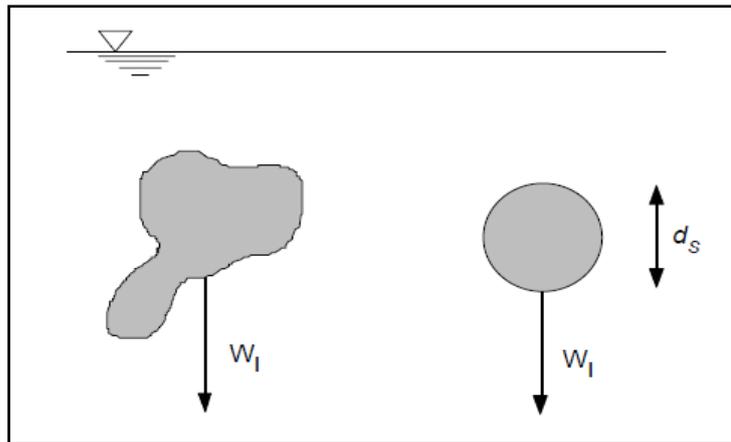


Figura 4: Esquematización del diámetro de sedimentación

Fuente: ROCHA, A. 1998

En la práctica, las partículas naturales de sedimento no son esféricas, sino que exhiben formas irregulares. Existen diferentes clasificaciones para identificar a una partícula de tamaño determinado. En la Tabla 4, se presenta una clasificación perteneciente a la American Geophysical Union (A.G.U), confeccionada en base al diámetro de las partículas.

Tabla 4: Clasificación de partículas de acuerdo a la American Geophysical Union (A.G.U)

Fuente: ROCHA, A. 1998

Grupo	Clase	Tamaño (mm)
1. Cantos rodados: (250 – 4000 mm).	Muy grandes	4000 – 2000 mm
	Grandes	2000 – 1000 mm
	Medianos	1000 – 500 mm
	Pequeños	500 – 250 mm
2. Gujarros: (64 – 250 mm).	Grandes	250 – 125 mm
	Pequeños	125 – 64 mm
3. Gravas: (2-64 mm)	Muy gruesa	64 – 32 mm
	Gruesa	32 – 16 mm
	Media	16 – 8 mm

	Fina	8 – 4 mm
	Muy fina	4 – 2 mm
4. Arenas: (0.062 – 2 mm).	Muy gruesa	2 – 1 mm
	Gruesa	1 – 0.5 mm
	Media	0.5 – 0.25 mm
	Fina	0.25 – 0.125 mm
	Muy fina	0.125 – 0.062 mm
5. Limos: (4 a 62 μ) = (0.004 a 0.062 mm).		
6. Arcillas: (0.24 a 4 μ) = (0.00024 a 0.004 mm)		

$$1 \mu = 10^{-3} \text{ mm}$$

El tamaño de los cantos rodados y los guijarros se pueden medir directamente. El de las gravas y arenas se mide mediante mallas, y el de limos y arcillas se determina por medio de sedimentación o con microscopio. A continuación, se muestra la equivalencia de mallas y aberturas.

Tabla 5: Equivalencia de mallas y aberturas

Fuente: ROCHA, A. 1998

Malla	Abertura (mm)
0.742"	18.850
0.525"	13.330
0.371"	9.423
# 4	4.760

# 5	4.000
# 8	2.380
# 10	2.000
# 18	1.000
# 20	0.840
# 30	0.590
# 35	0.500
# 40	0.420
# 50	0.297
# 60	0.250
# 100	0.149
# 200	0.074

- **FORMA DE LA PARTÍCULA**

La forma de la partícula es de suma importancia, ya que condiciona su velocidad de sedimentación. Esta característica describe el aspecto o apariencia de la partícula, independientemente de su tamaño, densidad o composición mineralógica (MAZA, J. y GARCÍA, M. 2015).

Tradicionalmente la forma de una partícula se podría definir por la esfericidad y por la redondez; ambos son magnitudes distintas (MARTÍNEZ, E. 2001), tal como se muestra a continuación:

La esfericidad

Es la relación entre la superficie de una esfera de la misma densidad y volumen que el de la partícula y la superficie de la propia partícula. Dado que la esfera presenta la superficie mínima para un determinado volumen, la esfericidad tiene como límite superior el valor unidad.

La redondez

Es la relación entre el valor medio de irregularidad de la superficie de la partícula y el radio máximo de la esfera que puede escribirse en ella.

Las dos magnitudes definidas anteriormente, son independientes entre sí; por ejemplo, una partícula en forma de cubo tendría baja redondez frente a una esfericidad bastante alta, mientras que una partícula en forma de disco tendría poca esfericidad y alta redondez (MARTÍNEZ, E. 2001).

El factor de Cores (S_p) es el más usado para medir la forma de las partículas, se define con la siguiente relación:

$$S_p = \frac{c}{\sqrt{a \cdot b}} \leq 1$$
$$a \geq b \geq c$$
(17)

Dónde “a” es el eje mayor que pase por el centro de gravedad de la partícula. Si calculando el eje “a” definimos un plano ortogonal a este eje y que contenga el centro de gravedad, la intersección de este plano con la partícula define un contorno cerrado cuyo eje mayor definiremos como “b” (ortogonal al eje “a”), y definimos como eje “c” el que forme triedro ortogonal al eje “a” y “b”.

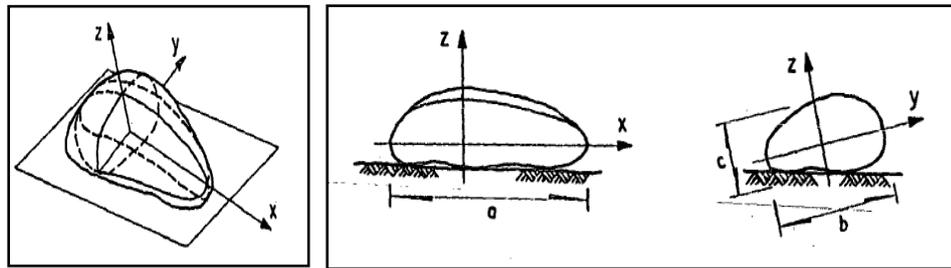


Figura 5: Esquematización de las dimensiones triaxiales de una partícula

Fuente: MAZA, J. y GARCÍA, M. 2015

Cuando se cumple la siguiente relación: $a = b = c$, se dice que la partícula es una esfera (Imposible de encontrar en lechos fluviales), y por consiguiente el factor de forma $S_p=1$.

Los valores límites reales de S_p están en entre 0.4 y 0.9 (MARTÍNEZ, E. 2001). Por otro lado, (JANSEN, P. 1979); (RIJN, V. 1993); (ROCHA, A. 1998); (MARTÍNEZ, E. 2001), y otros, consideran un valor habitual de aproximadamente 0.7 para la arena natural.

- **PESO ESPECÍFICO**

La densidad de los sedimentos es función de su composición, generalmente estos están formados por cuarzos y feldespatos, por lo que tienen habitualmente una densidad del orden de 2,65.

Cuando un río tiene partículas en suspensión, su peso específico varía. (MARTÍNEZ, E. 2001), establece que se puede calcular el peso específico de la mezcla del agua y los sedimentos según:

V_m : Volumen de la mezcla.

V_a : Volumen del agua.

V_s : Volumen del sólido.

P_m : Peso de la mezcla.

P_a : Peso del agua.

P_s : Peso del sólido.

γ_m : Peso específico de la mezcla.

γ_s : Peso específico de sólidos.

γ_a : Peso específico de agua.

Igualando los pesos y considerando que: $\gamma_m = \frac{P_m}{V_m}$; $\gamma_a = \frac{P_a}{V_a}$; $\gamma_s = \frac{P_s}{V_s}$, se tiene:

$$P_m = P_a + P_s \Rightarrow V_m \cdot \gamma_m = V_a \cdot \gamma_a + V_s \cdot \gamma_s \quad (18)$$

El balance de volumen:

$$V_m = V_a + V_s \quad (19)$$

Definiendo la concentración en peso (C_s) como:

$$C_s = \frac{P_s}{P_m} = \frac{V_s \cdot \gamma_s}{V_m \cdot \gamma_m} \quad (20)$$

Reemplazando las ecuaciones (19) y (20) en la ecuación (18), se tiene:

$$V_m \cdot \gamma_m = (V_m - V_s) \gamma_a + C_s \cdot V_m \cdot \gamma_m \quad (21)$$

Y sustituyendo: $V_s = C_s \cdot V_m \cdot \gamma_m / \gamma_s$ en la ecuación (21) y agrupando términos, se tiene:

$$\gamma_m = \frac{\gamma_a}{1 - C_s \left(1 - \frac{\gamma_a}{\gamma_s}\right)} \quad (22)$$

• VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

La velocidad de sedimentación es el parámetro más importante de los sedimentos ya que afecta a la capacidad de arrastre del río e indirectamente condiciona la forma del lecho (MARTÍNEZ, E. 2001).

Se denomina velocidad de sedimentación a la velocidad con la que cae una partícula sólida (sedimento) en una masa fluida ilimitada y en reposo. La velocidad de caída es un parámetro descriptivo de principal importancia en el estudio de la interacción flujo-sedimento. (ROCHA, A. 1998).

“Al caer una partícula dentro de un líquido en reposo, su peso sumergido tiende a equilibrarse con la fuerza que se opone a su caída, o sea con la fuerza de empuje que el agua ejerce contra ella, en el instante en que ambas fuerzas se equilibran, la partícula alcanza su velocidad de caída terminal o final, ya que a partir de ese instante comienza a caer con velocidad uniforme” (MAZA, J. y GARCÍA, M. 2015).

En principio, la velocidad de caída (W_s) varía con el tiempo (t). Al iniciarse la caída de una partícula su movimiento es acelerado. Si se tiene una partícula de una determinada forma cayendo en un fluido, su velocidad dependerá tanto de propiedades del fluido como de propiedades de la partícula, así como de la aceleración de la gravedad (g). Las propiedades determinantes son: Viscosidad (μ) y densidad (ρ) del fluido, tamaño (d) y densidad de la partícula (ρ_s) (ROCHA, A. 1998).

Lo cual podemos expresar de la siguiente manera:

$$w_s = f(\rho, \mu, \rho_s, d, \gamma_s, t) \quad (23)$$

Cuando una partícula alcanza su velocidad terminal (es decir, cuando termina el movimiento acelerado), la velocidad terminal W_s es también independiente de la densidad de la partícula (ρ_s), pues se desprecia la aceleración. Entonces se tiene:

$$W_s = f(\rho, \mu, d, \gamma_s) \quad (24)$$

Una partícula de volumen (V) que cae en una masa fluida está sujeta, cualquiera que sea su forma, a dos fuerzas: a) La que ejerce el fluido sobre la partícula, que en inglés se conoce con el nombre de “drag”, y que usualmente se expresa en castellano como fuerza de arrastre, y b) La resultante de la fuerza de gravedad menos la fuerza de sustentación (principio de ARQUÍMIDES). En consecuencia, como ambas fuerzas deben ser iguales, se obtiene la siguiente expresión (ROCHA, A. 1998):

$$C_D \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{W_s^2}{2} = (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot V \quad (25)$$

Dónde:

C_D : Coeficiente de arrastre

A: Área de la partícula proyectada en la dirección del flujo.

V: Volumen de la partícula.

Nota: El coeficiente adimensional de arrastre (C_D), depende de la forma y orientación de la partícula, así como también del número de Reynolds (Reynolds-Partícula) conformado por la velocidad de caída y el diámetro de la partícula.

El número de Reynolds-Partícula tiene la siguiente expresión:

$$Re = \frac{W_s \cdot d}{\nu} \quad (26)$$

En todos los casos puede establecerse que el área y el volumen de la partícula son proporcionales, respectivamente, al cuadrado y al cubo del diámetro. Como la partícula no es necesariamente esférica, el diámetro no es el esférico (puede ser nominal). Por lo tanto:

$$A = K_1 d^2 \quad ; \quad V = K_2 d^3 \quad (27)$$

Reemplazando la ecuación (34) en la ecuación (32), se tiene la siguiente ecuación:

$$W_s^2 = \frac{2gd(\gamma_s - \gamma)K_2}{C_D \gamma K_1} \quad (28)$$

Si la partícula fuera esférica, entonces se tendría:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad ; \quad V = \frac{\pi d^3}{6} \quad ; \quad \frac{K_1}{K_2} = \frac{2}{3}$$

Obteniéndose finalmente la siguiente ecuación:

$$W_s^2 = \frac{4}{3} \frac{1}{C_D} g d \frac{(\gamma_s - \gamma)}{\gamma} \quad (29)$$

O bien,

$$W_s = \sqrt{\frac{4gd(\gamma_s - \gamma)}{3\gamma C_D}} \quad (30)$$

A la cual podemos llamar Ecuación General de Velocidad de caída de una partícula esférica.

El coeficiente C_D , al cual llamamos coeficiente de arrastre (drag), se determina, en general, experimentalmente. C_D depende tanto del Número de Reynolds-Partícula, como de la forma de la partícula:

$$C_D = f(Re, \text{forma}) \quad (31)$$

Para una partícula de una forma determinada, se tiene que:

$$C_D = f(Re) \quad (32)$$

STOKES fue el primero en determinar analíticamente, en 1861, el coeficiente de arrastre de una esfera. Ha habido numerosas determinaciones del coeficiente C_D . Puede mencionarse los estudios experimentales de Schiller-Schmiedel, Liebster, Allen, Wiselsberger, Arnold y otros. Ellos trabajaron con diferentes materiales (parafina, ámbar, acero, bronce, plomo, oro, plata, etc.) y varios fluidos (agua, aceite, aire, etc.) (ROCHA, A. 1998).

En la figura 6 se muestra una curva que vincula, como resultado de las mediciones antes señaladas, el valor del coeficiente de arrastre C_D con el número de Reynolds, para partículas esféricas aisladas cayendo en un fluido infinito.

Se observa que hay una parte de la curva (que es una recta en el dibujo logarítmico) para la cual puede establecerse que:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (33)$$

Ecuación válida únicamente para $Re < 0.2$. Aunque en la práctica se lleva su validez hasta $Re = 1$. Se observa que a partir de $Re = 1000$, el coeficiente C_D se hace prácticamente

constante e igual a 0.4 (hasta $Re=2.5 \cdot 10^5$). Para valores del número de Reynolds mayores, el coeficiente C_D disminuye (ROCHA, A. 1998).

La variación de C_D con Re , tiene que interpretarse en función del sistema de líneas de corriente alrededor del objeto en estudio (una partícula esférica, por ejemplo).

Para $Re < 1$ hay un patrón de flujo bien definido (laminar). No hay separación. Es importante la fricción del contorno. Para $Re > 1$ aparecen vórtices de *KARMAN*. Para valores de $Re > 10^3$, pero menores que $2.5 \cdot 10^5$, C_D es independiente del Número de Reynolds (turbulencia plenamente desarrollada).

Si reemplazamos la ecuación (33) en la ecuación (29), se obtiene:

$$W_s^2 = \frac{1}{18} g d \frac{(\gamma_s - \gamma)}{\gamma} Re \quad (34)$$

Sustituyendo la ecuación (26) en la ecuación (34), se tiene:

$$W_s = \frac{1}{18} g \frac{d^2 (\gamma_s - \gamma)}{v \gamma} \quad (35)$$

O su expresión equivalente:

$$W_s = \frac{1}{18} \frac{(\gamma_s - \gamma)}{\mu} d^2 \quad (36)$$

La misma que se conoce como la ley de STOKES. Esta ley solo es aplicable para el cálculo de la velocidad de caída de partículas esféricas, cuyo número de Reynolds-Partícula sea menor o igual a 1.

Para el cálculo de la velocidad de caída de partículas esféricas de un diámetro dado, se procede del modo siguiente:

1. Suponer un valor para la velocidad de caída.
2. Calcular el número de Reynolds-Partícula.
3. Obtener del gráfico correspondiente el valor de C_D .
4. Calcular la velocidad de caída.

5. Comparar este último valor con el inicial, y proseguir hasta que los valores dados sean iguales.

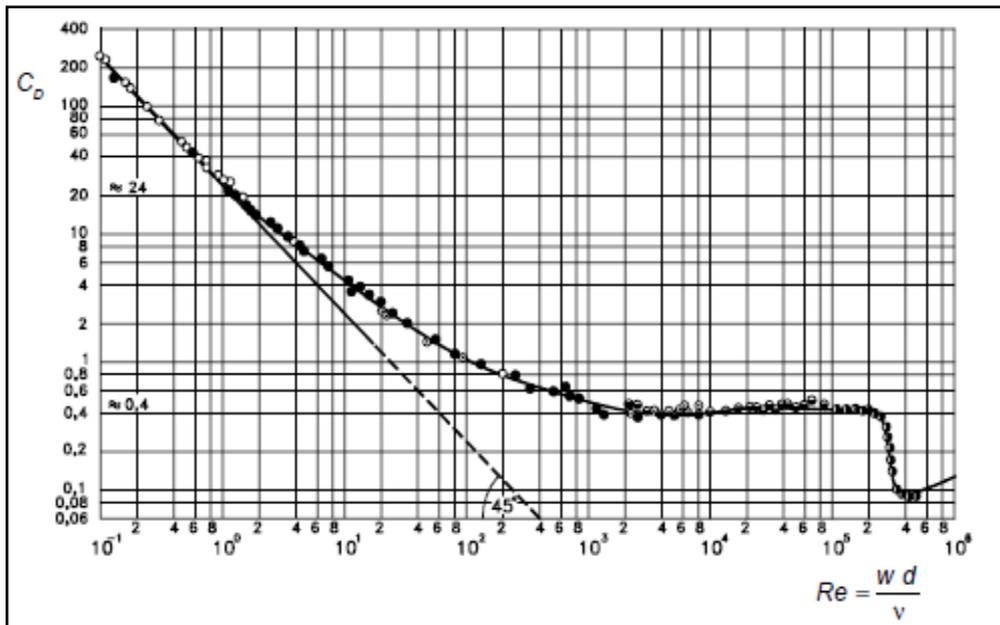


Figura 6: Relación entre el Coeficiente de arrastre C_D y el número de Reynolds-Partícula

Fuente: ROCHA, A. 1998

Para el cálculo de la velocidad de caída de partículas naturales (No esféricas) se puede usar el gráfico de SCHULZ, que da el coeficiente drag en función del factor de forma (shape factor), como se muestra a continuación:

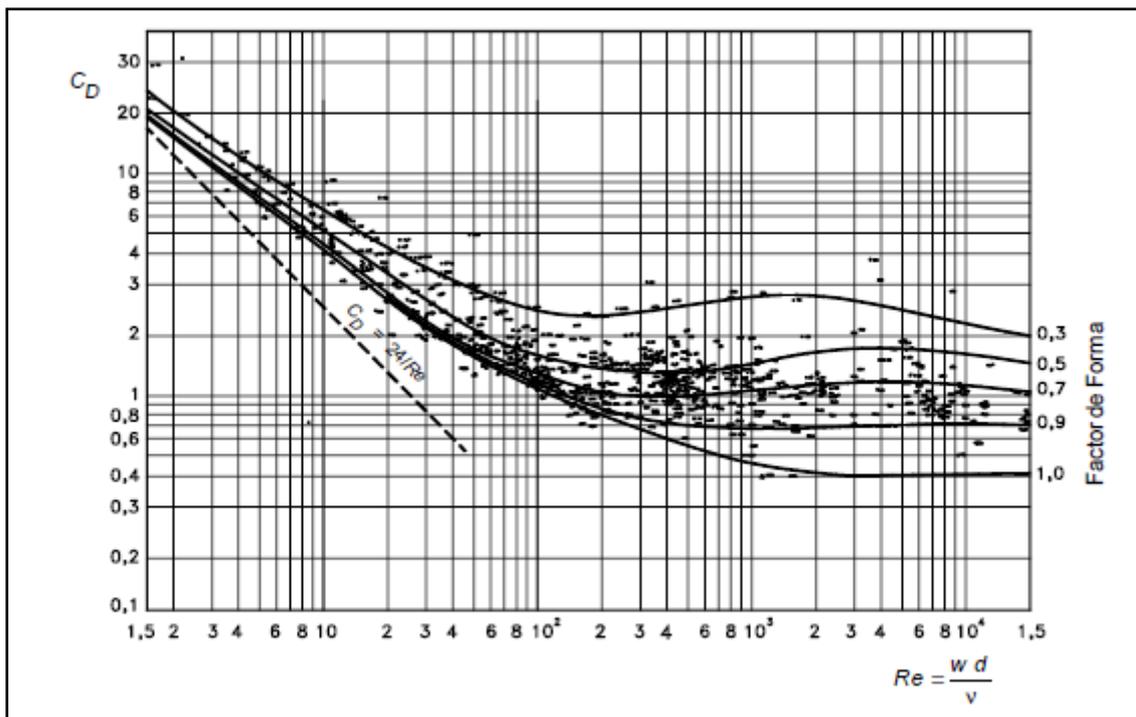


Figura 7: Gráfico de SCHULZ

Fuente: ROCHA, A. 1998

b) PROPIEDADES DE LOS SEDIMENTOS COMO UN CONJUNTO

Como se indicó anteriormente, las partículas que forman el sedimento se pueden estudiar tanto de forma individual como un conjunto. Siendo la granulometría la más importante para efectos del presente estudio.

Se define la granulometría de una mezcla de partículas como la clasificación de las partículas que la forman por tamaños. La medida y separación de las partículas por tamaños se realizan por distintos métodos, siendo el más usado el método del tamizado.

Este método consiste en hacer pasar una mezcla de partículas por una serie de tamices o mallas de diversas aberturas, Las partículas de menor tamaño pasan por los poros del tamiz atravesándolo y las de mayor tamaño quedan retenidas por el mismo. En la tabla 02 se indica las aberturas de los tamices estándar para estudios granulométricos.

Partiendo de una muestra de sedimento, se separa en fracciones por tamaños, obteniendo para cada tamaño un porcentaje en peso del total de la muestra. Estos datos se presentan en un gráfico semi - logarítmico, situando en el eje de las abscisas tamaños y en el eje de las ordenadas porcentajes acumulados

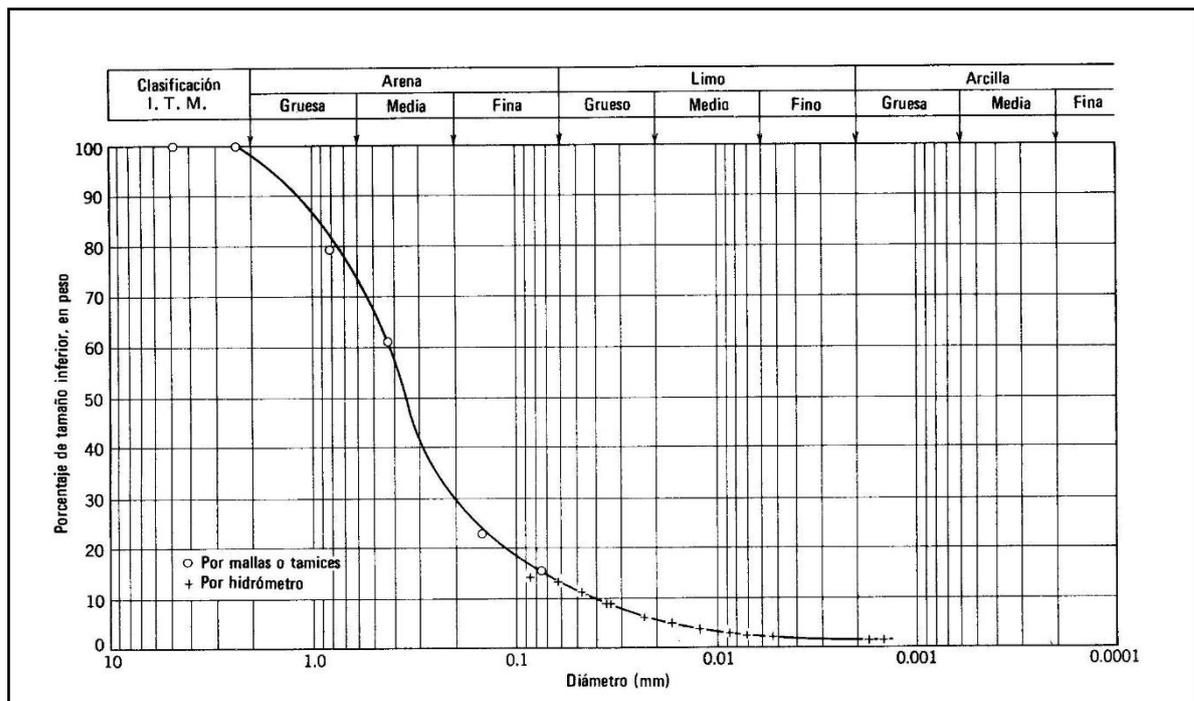


Figura 8: Ejemplo de una Curva Granulométrica

Fuente: ROCHA, A. 1998

• PROPIEDADES DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA

Las curvas granulométricas cumplen las propiedades de la distribución logarítmico-normal, motivo por el cual diversos autores recomiendan aplicar las propiedades de esta distribución para el estudio de las propiedades (D_G : media geométrica de tamaños y σ_G : desviación estándar) de la curva granulométrica (MARTÍNEZ, E. 2001). Como se muestra a continuación:

$$D_G = \sqrt{(D_{84}) \cdot (D_{16})} \quad (37)$$

$$\sigma_G = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}} \quad (38)$$

$$\sigma_G = \frac{D_{84}}{D_G} = \frac{D_G}{D_{16}} \quad (39)$$

Lo ideal sería que D_G y D_{50} coincidieran; sin embargo, en una distribución real puede que estos valores difieran. En este caso se puede definir un coeficiente que mida la irregularidad de la distribución real frente a la teórica, siendo habitual considerar el parámetro G (coeficiente de graduación), el que se define como:

$$G = \frac{1}{2} \left(\frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{16}} \right) \quad (40)$$

Siendo D_{16} ; D_{50} ; D_{84} , valores determinados directamente de la curva granulométrica; los mismos que corresponden a la abertura del tamiz dónde el 16%, 50% y 84% del total de la muestra que pasa a través de los tamices.

c) INICIACIÓN DEL MOVIMIENTO

El estudio de la iniciación del movimiento es de suma importancia para el estudio del transporte de sedimentos y para la solución de variados problemas de ingeniería fluvial. Entender este fenómeno nos permite calcular el gasto sólido de fondo, así como también diseñar sistemas de protección contra la erosión, entre otros (ROCHA, A. 1998).

El fenómeno de la iniciación del movimiento presenta un elevado grado de complejidad en su entendimiento debido a la variabilidad del tamaño de las partículas que constituyen el lecho de un río, la variabilidad del comportamiento del flujo en el espacio y tiempo.

Motivo por el cual deja de ser un fenómeno determinístico, permitiendo a diversos autores considerarlo como un fenómeno estocástico.

Existen dos formas de aproximarse al estudio de la iniciación del movimiento. Una de ellas es la acción del esfuerzo cortante, o fuerza tractiva. Es decir, el movimiento de las partículas del fondo empieza cuando la fuerza actuante τ_0 (fuerza tractiva) es igual a la fuerza tractiva crítica τ_c . La otra forma es la determinación de la velocidad crítica V_c . Definiéndose como velocidad crítica de arrastre a la velocidad medida de la corriente a la cual empieza el movimiento (arrastre) de las partículas constituyentes del lecho. El caudal correspondiente a la iniciación del movimiento se denomina gasto crítico de iniciación del movimiento, o gasto crítico de arrastre, y se designa usualmente como Q_0 . El mismo que es igual al producto del área de la sección transversal por la velocidad crítica (ROCHA, A. 1998).

Se ha podido distinguir las fuerzas que actúan en cada uno de los granos que constituyen el lecho, las cuales lo detallamos a continuación:

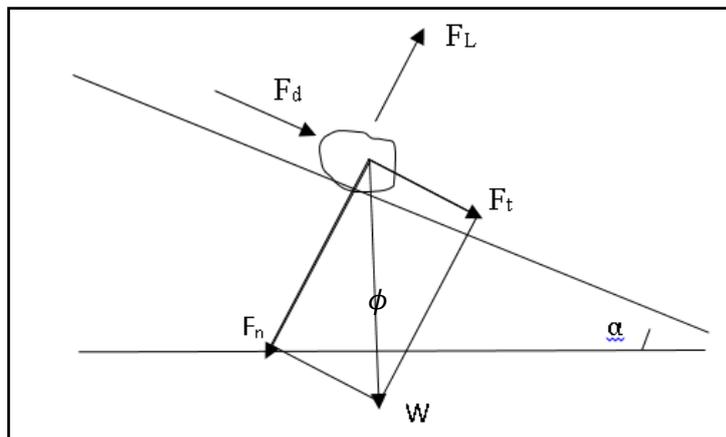


Figura 9: Fuerzas actuantes sobre una partícula en el seno de un fluido

Fuente: MARTÍNEZ, E. 2001

Dónde:

W : Peso sumergido de la partícula.

F_d : Fuerza de la corriente sobre la partícula.

F_L : Fuerza debido a la fluctuación turbulenta que produce una sustentación.

De la figura 9, podemos establecer las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
F_t &= F_d + W \cdot \sin \alpha \\
F_n &= W \cdot \cos \alpha - F_L
\end{aligned}
\tag{41}$$

De esta expresión concluimos que si $F_L > W \cdot \cos \alpha$, existirá despegue de fondo.

Por el contrario, no existirá movimiento a lo largo del plano inclinado si:

$$\frac{F_t}{F_n} = \frac{F_d + W \cdot \sin \alpha}{W \cdot \cos \alpha - F_L} \leq \tan \phi
\tag{42}$$

Siendo ϕ =ángulo de rozamiento.

Cuando la iniciación del movimiento se define en términos de la fuerza tractiva hay que tener presente que debido a la turbulencia se presentan fluctuaciones de la velocidad, como consecuencia de las cuales la fuerza tractiva está sujeta a fluctuaciones instantáneas en el tiempo. Al respecto, tal como se aprecia en la figura 10, Gunter ha señalado los tres casos siguientes (ROCHA, A. 1998).

Caso A: $\bar{\tau}_0 - \Delta\tau_{max} > \tau_c$. Expresión en la que $\Delta\tau_{max}$ es la máxima fluctuación de la fuerza tractiva sobre el fondo $\bar{\tau}_0$. En consecuencia, el estado crítico es excedido el 100% del tiempo y todos los granos están en movimiento.

Caso B: $\bar{\tau}_0 = \tau_c$. Los granos están expuestos al estado crítico el 50% del tiempo, lo que equivale a decir que en cada instante las condiciones críticas son excedidas por el 50% de los granos.

Caso C: $\bar{\tau}_0 + \Delta\tau_{max} = \tau_c$. El estado crítico de iniciación del movimiento solo se alcanza en algunos momentos (instantes), pero nunca excedido. Corresponde a la iniciación o a la finalización del movimiento.

Los valores de la fuerza tractiva crítica para cada tipo de material sólido se obtienen experimentalmente. De la misma manera se puede conocer los valores de la velocidad crítica de arrastre.

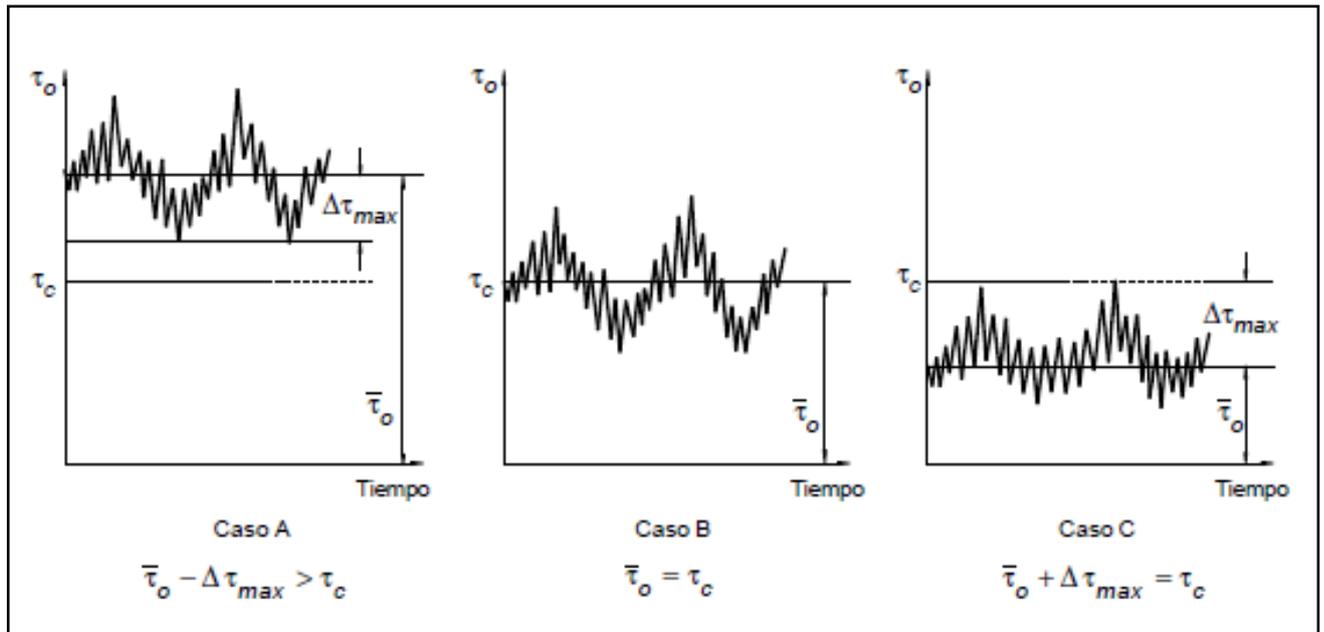


Figura 10: Influencia de las fluctuaciones en la iniciación del movimiento

Fuente: ROCHA, A. 1998

• **CRITERIO DE SHIELDS**

Se ha demostrado que, como consecuencia de diversas investigaciones teóricas y experimentales, que la iniciación del movimiento de una partícula sólida de diámetro “d” puede describirse, cuando hay influencia de la subcapa laminar, como la relación entre los dos parámetros adicionales siguientes:

Parámetro de SHIELDS

$$\tau_c^* = \frac{(\tau_o)_c}{(\gamma_s - \gamma)d} = \frac{\rho V_*^2}{(\gamma_s - \gamma)d} = F_{cr}^* \quad (43)$$

Índice de Inestabilidad

$$Re_* = \frac{V_* d}{\nu} = 11.6 \frac{d}{\delta} \quad (44)$$

Dónde:

$(\tau_o)_c$: Fuerza tractiva sobre el fondo en el momento de la iniciación del movimiento. Se puede designar también como τ_c .

V_* : Velocidad de corte = $\sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} = \sqrt{gRS}$

Re_* : Número de Reynolds calculado con la velocidad de corte y el diámetro de la partícula.

δ : Espesor de la subcapa laminar

En el diagrama de SHIELDS, figura 11 se presenta gráficamente la función:

$$\frac{(\tau_0)_c}{(\gamma_s - \gamma)d} = \varphi(Re_*) \quad (45)$$

Como consecuencia de los trabajos experimentales realizados por el mismo y otros investigadores.

El primer miembro de la ecuación 45 corresponde al parámetro adimensional de la fuerza tractiva crítica (parámetro de SHIELDS) y se designa como τ_c^* o también como F_{cr}^* .

El segundo miembro es el índice de Inestabilidad. Se le designa también con el nombre de número de Reynolds corte referido al diámetro. Se designa como Re_* .

El diagrama de SHIELDS se basa en los resultados de numerosos investigadores, quienes trabajaron con materiales diversos (arena, ámbar, granito, vidrio, grava, etc.) El diagrama muestra la línea divisoria entre movimiento y reposo de una partícula en zonas de influencia viscosa.

El diagrama de SHIELDS mostrado en la figura 11, tiene unas líneas rectas auxiliares para el diámetro y la velocidad de corte, las que permiten calcular las condiciones de iniciación del movimiento cuando se trata de partículas de cuarzo ($\gamma_s = 2.65 \text{ Tn/m}^3$) y la temperatura del agua es de 12 °C. Así como, por ejemplo, para una partícula de cuarzo de 0.5 mm de diámetro se le inmediatamente que la velocidad de corte V_* necesaria para la iniciación del movimiento es de 0.0165 m/s (Se verifica que el Número de Reynolds es de 6.6 y que el Parámetro de SHIELDS es 0.034)

Hay varias formas de analizar este importante diagrama. Una de ellas consiste en distinguir cuatro zonas (ROCHA, A. 1998).

Zona 1:

$\frac{V_* d}{\nu} < 2$, para el cual se considera que el espesor de la subcapa laminar δ es mayor que el diámetro de las partículas ($\delta = 11.6 \frac{\nu}{V_*}$). Para $Re_* \leq 1$ se cumple que $Re_* \tau_c^* = 0.1$.

Zona 2:

$2 < \frac{V_* d}{\nu} < 20$, para el cual se considera el espesor de la subcapa laminar y el diámetro de las partículas son del mismo orden de magnitud. En esta zona, para $Re_* = 11.6$ se tiene que $d = \delta$ y el parámetro de SHIELDS tiene valor mínimo: $\tau_c^* = 0.033$.

Zona 3:

$20 < \frac{V_* d}{\nu} < 400$, para el cual se considera que el espesor de la subcapa laminar es menor que el diámetro de las partículas.

El contorno se comporta como hidráulicamente rugoso.

Zona 4:

$\frac{V_* d}{\nu} > 400$, En esta zona se dice que la turbulencia se ha desarrollado plenamente. El parámetro de SHIELDS tiende a ser constante y no depende ya del Número de Reynolds. La constante tiene un valor que generalmente se fija en 0.06.

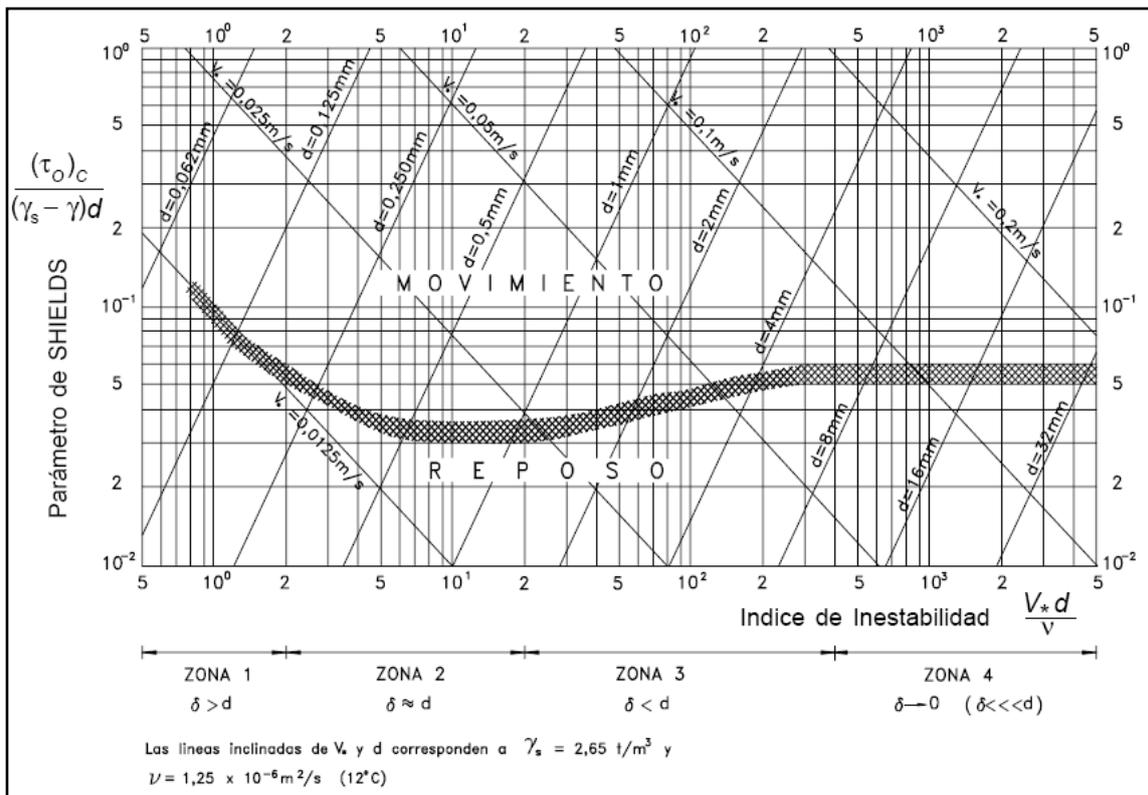


Figura 11: Diagrama de SHIELDS para la iniciación del movimiento

Fuente: ROCHA, A. 1998

Para la obtención de las condiciones de la iniciación del movimiento mediante la aplicación del diagrama de SHIELDS se sugiere el siguiente método general (se conoce las características de las partículas, del fluido y la pendiente). (ROCHA, A. 1998). Como se muestra a continuación:

1. Suponer un valor para el parámetro de SHIELDS τ_c^* con lo que se puede calcular $(\tau_0)_c$, puesto que:

$$(\tau_0)_c = \tau_c^*(\gamma_s - \gamma)d \quad (46)$$

2. A partir del conocimiento de $(\tau_0)_c$ podemos calcular el tirante.

$$y = \frac{(\tau_0)_c}{\gamma S} \quad (47)$$

3. Ahora calculamos la velocidad de corte

$$V_* = \sqrt{gyS}$$

4. Podemos entonces determinar el valor de Re_*

$$Re_* = \frac{V_* d}{\nu}$$

5. Comparamos este valor así obtenido con el que en el diagrama de SHIELDS corresponde a la iniciación del movimiento para el valor τ_c^* asumido en el punto 1 de esta secuencia. Si no son iguales se repite el procedimiento hasta lograr la igualdad.

6. Obtenido el valor correcto de Re_* se calcula el coeficiente de CHEZY, que en el caso más general es:

$$C = 18 \log \frac{6R}{\frac{k}{2} + \frac{\delta}{7}} \quad (48)$$

Los coeficientes de esta expresión pueden variar ligeramente en función de determinados resultados experimentales. Si el contorno es hidráulicamente rugoso entonces $\delta \rightarrow 0$. El valor de k , rugosidad absoluta, depende de la granulometría del lecho. Para granulometría uniforme (contorno rugoso) el coeficiente C de CHEZY puede calcularse considerando $k=2d$.

$$C = 18 \log \frac{12R}{2d} = 18 \log \frac{6R}{d} \quad (49)$$

7. Aplicamos la ecuación de CHEZY y obtenemos la velocidad media. En este caso la velocidad media es la velocidad crítica de arrastre (Es decir, de iniciación del movimiento).

8. Puede finalmente calcularse q_0 , que es el gasto crítico específico, o de iniciación del movimiento (por unidad de ancho).

$$q_0 = V_c y \quad (50)$$

$$Q_0 = q_0 B \quad (51)$$

B es el ancho del canal.

La razón por la cual hay que recurrir a un método de aproximaciones sucesivas, radica en que la velocidad de corte aparece como dato de entrada para el cálculo de ambos parámetros (ROCHA, 1998).

Sin embargo, la curva de SHIELDS puede ser expresada con las fórmulas siguientes (BONNEFILLE, R. 1963; YALIN, M. 1972):

$$Fr *_{cr} = 0.24 D_*^{-1} \quad , si \quad 1 < D_* \leq 4$$

$$Fr *_{cr} = 0.14 D_*^{-0.64} \quad , si \quad 4 < D_* \leq 10$$

$$Fr *_{cr} = 0.04 D_*^{-0.1} \quad , si \quad 10 < D_* \leq 20$$

$$Fr *_{cr} = 0.013 D_*^{0.29} \quad , si \quad 20 < D_* \leq 150$$

$$Fr *_{cr} = 0.055 \quad , si \quad D_* > 150$$

Dónde:

$$Fr *_{cr} = \frac{\tau_{oc}}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} \quad \text{-----} \rightarrow \text{Parámetro de SHIELDS Crítico}$$

$$D_* = \left(\frac{\rho' g}{v^2} \right)^{1/3} \cdot d \quad \text{-----} \rightarrow \text{Parámetro de Partícula}$$

$$\rho' = \frac{(\rho_F - \rho)}{\rho}$$

- **FASES DEL TRANSPORTE SÓLIDO**

Para un flujo de velocidad gradualmente creciente se tiene que la configuración del fondo es variable y pasa por varios estados que son función de la velocidad media del flujo. Dichos estados, tal como se aprecia en la figura 12, son los siguientes (ROCHA, A. 1998):

Fondo Plano: Es una etapa inicial que corresponde a una velocidad pequeña. Se observa movimientos aislados e intermitentes de las partículas más gruesas constituyentes del fondo; las más pequeñas entran eventualmente en suspensión.

Rizos: Al incrementarse las velocidades aparecen en el fondo ondulaciones de pequeña amplitud. Hay un momento de resistencia (Aumento del coeficiente de Manning y disminución del de CHEZY). El número de Froude es menor que 1.

Dunas: La fase siguiente representa un cambio en la forma de los rizos. Adquieren hacia aguas arriba una pendiente suave en la que se produce erosión y hacia abajo una pendiente fuerte que es igual a la tangente del ángulo en reposo. Hay aumento de la resistencia. Eventualmente las dunas pueden alargarse hasta concentrarse en barras. El número de Froude es menor que 1.

Antidunas: Representan una inversión de las dunas. Suelen ser más simétricas. El número de Froude es mayor que 1.

Fondo Plano: Aparecen nuevamente para altas velocidades.

Los rizos y las dunas se distinguen entre sí por su tamaño. Se mueven en la dirección de la corriente, pero con una velocidad menor que la del flujo. No producen perturbaciones en la superficie libre. En cambio, las antidunas pueden moverse en cualquier dirección o ser estacionarias. Producen perturbaciones en la superficie libre del escurrimiento.

Estas fases pueden describirse de acuerdo con diferentes parámetros adimensionales. Los siguientes parámetros fueron establecidos por Liu, Albertson, Richardson y otros (ROCHA, A. 1998).

Dichos parámetros son:

$\frac{V_*}{w}$, Número de Movilidad: Que representa la relación entre la velocidad de corte y la velocidad de caída de las partículas en aguas tranquilas.

$\frac{V_* d}{\nu}$, índice de Inestabilidad: Que representa la relación entre la velocidad de corte, el diámetro de la partícula y la viscosidad cinemática del agua.

$\frac{d}{\delta}$, Que representa la relación entre el diámetro de la partícula y el espesor de la subcapa laminar.

La vinculación entre estos parámetros y las diferentes fases se muestra en la figura 13.

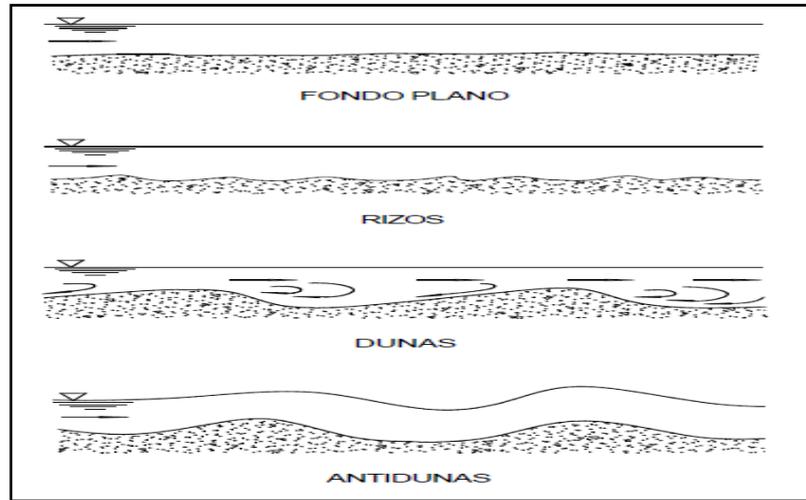


Figura 12: Fases del transporte sólido

Fuente: ROCHA, A. 1998

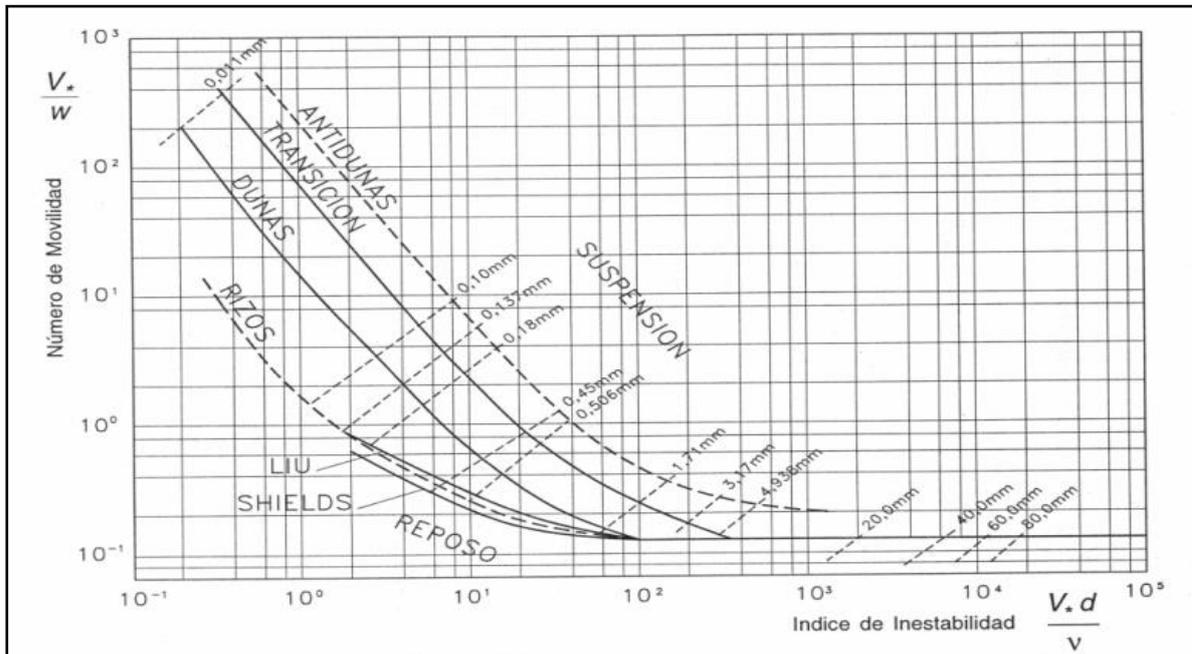


Figura 13: Fases del transporte de sedimentos

Fuente: ROCHA, A. 1998

- **MACRO Y MICRORRUGOSIDAD: DESCOMPOSICIÓN DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA**

Cuando un lecho fluvial presenta fases (rizos, dunas, etc.) entonces la resistencia al escurrimiento (rugosidades) no depende exclusivamente de la que se origina en el tamaño de los granos, sino también de la que se debe al tamaño y separación de las irregularidades del fondo (fases).

La tensión τ_0 que se opone al escurrimiento resulta estar formada por la suma de τ_0' (debida al tamaño de los granos) y τ_0'' (debida a las formas de fondo)

$$\tau_0 = \tau_0' + \tau_0'' \quad (52)$$

Aplicando este concepto al coeficiente “n” de KUTTER se tiene que su descomposición se puede establecer del modo siguiente:

El radio hidráulico R puede descomponerse idealmente en dos partes

$$R = R' + R'' \quad (53)$$

R' Es la parte del radio hidráulico asociado a la microrrugosidad n' y R'' es la otra parte del radio hidráulico asociado a la macrorrugosidad n'' . Aplicando la fórmula de Manning al total de la sección y a cada una de las partes en las que idealmente se le ha descompuesto, se obtiene:

$$V = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{n} = \frac{S^{1/2} R'^{2/3}}{n'} = \frac{R''^{2/3} S^{1/2}}{n''}$$

De cada una de estas ecuaciones obtenemos valores del radio hidráulico, que reemplazados en la ecuación 53 dan lo siguiente:

$$\frac{V^{3/2} n^{3/2}}{S^{3/4}} = \frac{V^{3/2} n'^{3/2}}{S^{3/4}} + \frac{V^{3/2} n''^{3/2}}{S^{3/4}}$$

Como la velocidad y la pendiente son únicos, se llega a:

$$n^{3/2} = n'^{3/2} + n''^{3/2} \quad (54)$$

d) GASTO SÓLIDO EN SUSPENSIÓN

La suspensión está constituida por las partículas finas, las que se distribuyen en toda la sección transversal del canal y dan color al agua.

El movimiento de las partículas del fondo empieza cuando la fuerza tractiva, llega a un valor igual a la fuerza tractiva crítica, y la excede. El exceso de la fuerza tractiva, con respecto a la crítica, es lo que causa el movimiento de las partículas del fondo y determina la intensidad del arrastre, que se caracteriza porque las partículas ruedan o se deslizan sobre el fondo.

Si la fuerza tractiva aumenta, lo que podría ocurrir por un aumento de caudal, algunas partículas se desprenden del fondo y avanzan temporalmente en saltos. Esta es la modalidad de transporte llamada saltación.

Si la fuerza tractiva continúa aumentando, lo que significa aumento de caudal, de velocidad, etc. llega un momento en el que la velocidad de corte será mayor que la velocidad de caída de las partículas, y estas entran en suspensión. La partícula se mantiene en suspensión a una altura de equilibrio entre la componente ascendente de la turbulencia y la velocidad de caída de la partícula. Conceptualmente, y para fines prácticos, el inicio de la suspensión corresponde a la llamada condición de BAGNOLD, que se presenta cuando la velocidad de corte es mayor que la velocidad de caída de las partículas.

$$V_* > w \quad (55)$$

Aunque para partículas muy finas el inicio de la suspensión corresponde a una condición menos exigente. ENGELUND trabaja con la condición $V_* = 0.25w$, como condición límite.

De otro lado, debe tenerse presente que no hay un límite claro entre saltación y suspensión. En realidad, no basta con que una partícula se desprenda temporalmente del fondo para admitir que esté en suspensión. En investigaciones realizadas en el Laboratorio de Hidráulica de Delft se consideró que una partícula estaba en suspensión cuando al desplazarse se mantenía separada del fondo una distancia mayor que 100 veces su diámetro.

• DISTRIBUCIÓN VERTICAL DE CONCENTRACIONES

Como consecuencia de los estudios teóricos y experimentales efectuados por varios investigadores se estableció una ecuación que permite calcular la distribución vertical de concentraciones en un canal. La suposición básica consiste en considerar un canal con movimiento permanente y uniforme en el que el flujo sea bidimensional.

La ecuación que se encontró es la siguiente:

$$\frac{C_h}{C_a} = \left(\frac{y - h a}{y - a h} \right)^Z \quad (56)$$

C_h representa la concentración a la altura “h” del fondo.

C_a es la concentración a la distancia “a” del fondo. Esta distancia se define como una franja de espesor “2d” (Dos veces el diámetro de la partícula). Para fines prácticos se considera, sin embargo, que $a=0.05y$.

Como consecuencia a lo anterior resulta que el campo de validez de la ecuación 56 está restringido a la región $a \leq h \leq y$. El gasto sólido debajo del nivel “a” se considera como de fondo. El exponente “Z” recibe el nombre de Número de ROUSE o Parámetro Característico de la Suspensión.

$$Z = 2.5 \frac{w}{V_*} \quad (57)$$

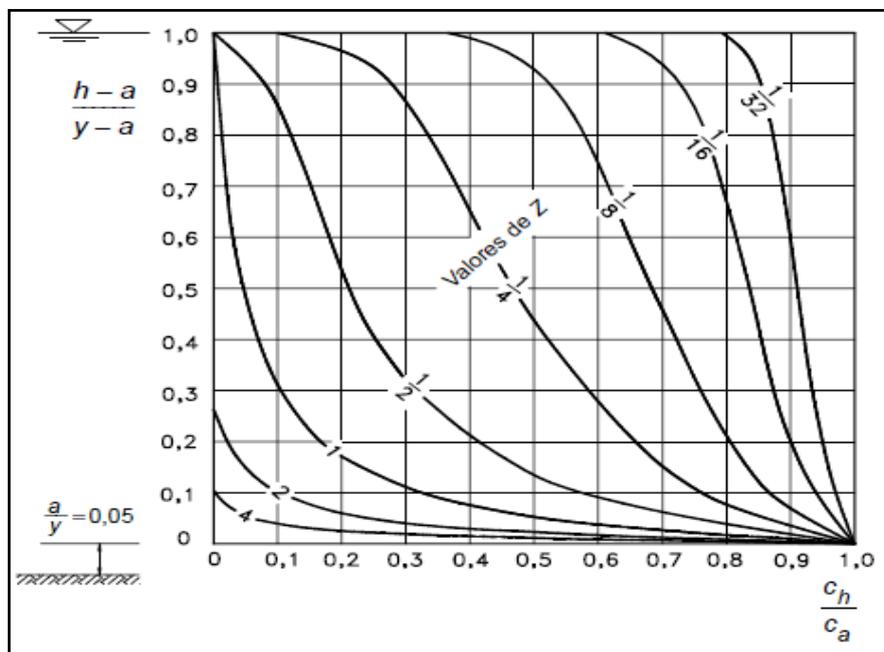


Figura 14: Distribución vertical de concentraciones

Fuente: ROCHA, A. 1998

En una porción de canal, de ancho unitario y altura “dh”, el gasto sólido en suspensión específico puede expresarse de la siguiente manera:

$$dt_S = C_h V_h dh \quad (58)$$

Como se mencionó anteriormente, “h” es la distancia variable, a partir del fondo, a la que corresponde la concentración y velocidad señaladas con subíndice “h”.

Integrando la ecuación 58 obtenemos la expresión correspondiente al gasto sólido en suspensión específico.

$$t_s = \int_{\text{fondo } (h=a)}^{\text{Superficie } (h=y)} C_h V_h dh \quad (59)$$

$$V_h = \frac{V_*}{k} \ln \frac{30h}{k} \quad (60)$$

El parámetro k , es la constante de Von Karman.

De las ecuaciones analizadas anteriormente se concluye que para establecer la distribución vertical de concentraciones es necesario conocer la concentración en un punto (la que debe ser medida).

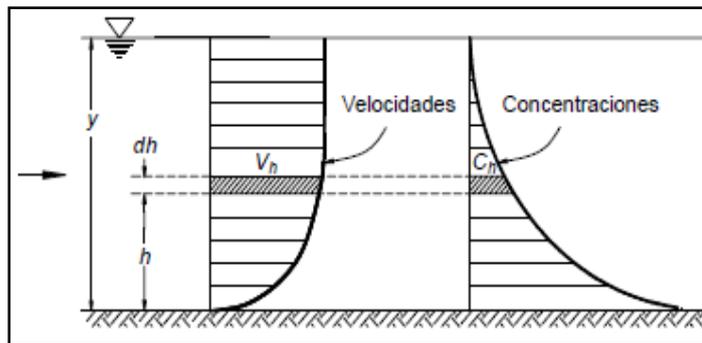


Figura 15: Esquema de definición para el cálculo del gasto sólido en suspensión

Fuente: ROCHA, A. 1998

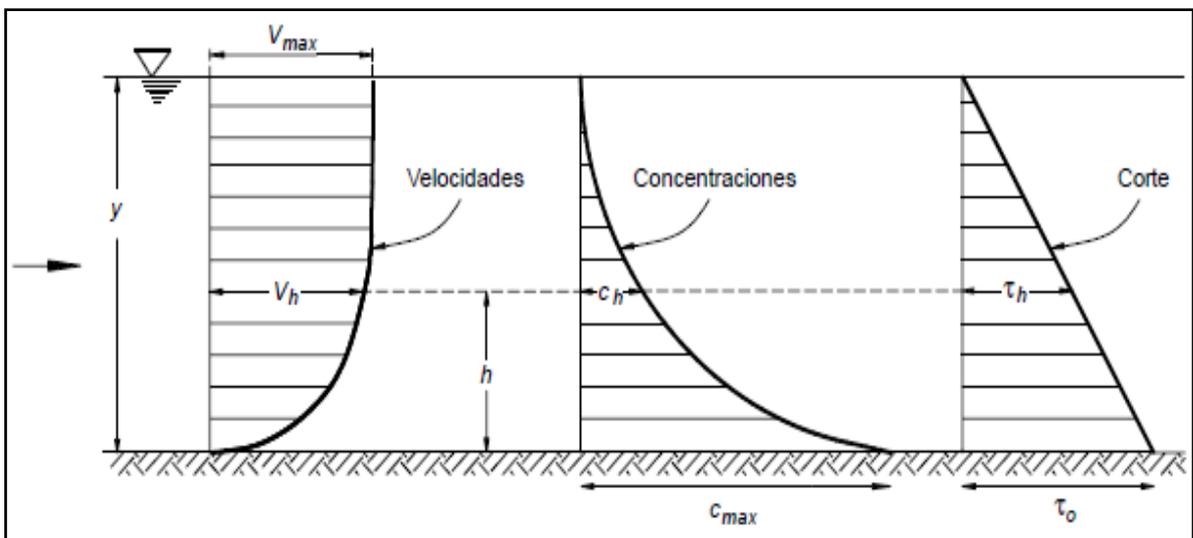


Figura 16: Distribución típica de velocidades, concentraciones de sedimentos y esfuerzos de corte

Fuente: ROCHA, A. 1998

2.4. ESTRUCTURAS DE CONTROL DEL FLUJO

Los procesos naturales y la interferencia humana pueden perturbar el equilibrio entre la carga de sedimento que contribuye la cuenca al canal y la capacidad de transporte del flujo (MOHAMEN, F. 2002).

Las variaciones estacionales en el flujo, el dragado del río (debido a la minería aurífera ilegal en la Amazonía), la construcción de un embalse y la deforestación son ejemplos de causas de perturbación.

En un río básicamente se presentan dos tipos de erosión: Profundización del cauce y erosión lateral. El equilibrio del cauce está controlado por el balance entre la carga de sedimentos depositada y capacidad de transporte del flujo. Sin embargo, aún en las corrientes más estables se presentan fenómenos de erosión. Siendo entonces las estructuras de control del flujo necesarias para proteger el canal contra los cambios que se producen debido a las perturbaciones.

La estabilización de los ríos debe cumplir con uno o más de los siguientes objetivos:

- Permitir el paso seguro y libre del flujo de las crecientes.
- Permitir un transporte eficiente de la carga suspendida y de fondo.
- Garantizar un cauce estable del río con nula o mínima erosión lateral.
- Proporcionar una profundización suficiente y buen cauce para navegación.
- Direccional el flujo a través de un sector definido del río.

Las principales estructuras comúnmente utilizadas en la estabilización de riberas son las siguientes:

- Espigones.
- Diques longitudinales.
- Estructuras retardadoras.
- Revestimiento de los taludes de las riberas.
- Muros de contención, entre otros.

Si bien, existe una variedad de estructuras para de control del flujo, se debe prestar una especial atención en la erosión local de la estructura. El éxito de una protección es su protección (MAZA, J. y GARCÍA, M. 2015).

En esta investigación, por su naturaleza, partiremos de la teoría de espigones, luego trataremos de espigones permeables para finalmente centrarse en la teoría de los

espigones permeables contruidos usando madera, los cuales se basan en la tecnología de los Engineered Log Jams (ELJs).

a) ESPIGONES

Son estructuras interpuestas a la corriente con un cierto ángulo de inclinación en dirección contraria al flujo. El propósito de estas estructuras consiste en alejar las líneas de corriente con alta velocidad de la orilla, y evitar así que el material de la margen pueda ser transportado y ella se erosione; Además, los espigones facilitan que los sedimentos se depositen entre ellos, área comúnmente denominada como campo de espigones, permitiendo así una protección adicional de la orilla. Los espigones pueden estar unidos simplemente a la orilla en contacto con ella, o bien, estar empotrados una cierta longitud dentro de la margen. Estas estructuras se construyen muy a menudo usando diversos materiales, tales como: madera, piedra, grava, roca, acero, etc. (ROCHA, A. 1998).

• Tipos de Espigones

Una de las clasificaciones más completas y citadas a nivel mundial es la que hizo Przedwojski en el año 1995, quien menciona que los diferentes tipos de espigones pueden distinguirse de acuerdo al método y materiales de construcción, la acción de las estructuras sobre el flujo de la corriente y su proyección en planta. A continuación, hablamos de cada una de ellas.

Clasificación de acuerdo al método y materiales de construcción

Los espigones pueden ser permeables, permitiendo el paso del agua a través de estos a bajas velocidades, o impermeables, bloqueando y desviando la corriente. Los espigones permeables son fabricados de pilas de acero, bamboo o madera, mientras que los espigones impermeables también llamados espigones sólidos son contruidos usando roca o concreto.

Ante estas dos posibilidades, la principal desventaja hidráulica de los espigones impermeables es el efecto de la separación del flujo en la cabeza de la estructura, causada por el bloqueo del flujo (CAO, et al 2013).

Clasificación de acuerdo a la inmersión

Los espigones pueden ser diseñados ya sea como sumergidos o no sumergidos. El tipo a usar está dado por las condiciones de diseño. Usualmente los espigones impermeables son diseñados para funcionar no sumergidos, ya que el flujo sobre la estructura puede causar severas erosiones a lo largo del banco en el cual se encuentra anclado. Para las

condiciones sumergidas, en el otro caso, pueden diseñarse espigones permeables debido a que perturban el flujo mucho menos que los espigones impermeables.

Clasificación de acuerdo a la acción en el flujo de la corriente

Los espigones pueden ser clasificados como retardadores, cuando se requiere construir una defensa ribereña contra la erosión de las márgenes; deflectores, cuando se requiere la formación de un cauce más profundo, generalmente con fines de navegación; o espigones de atracción, cuando estos sirven para atraer el flujo de la corriente hacia sí mismos y no repelen el flujo hacia el banco externo.

Clasificación de acuerdo con su proyección en planta

Los espigones pueden estar contruidos con diferentes formas en planta. Así como, por ejemplo, espigones rectos, con la cabeza en forma de T, con la cabeza en forma de L, en forma de hockey (herramienta deportiva) invertida o rectos en planta con la posibilidad de aprovecharlo como muelle.

• Sistema de espigones permeables

Se denomina sistema de espigones permeables, a un conjunto de estructuras individuales, instaladas en forma consecutiva, capaces de cumplir la función de retardadores.

Los espigones permeables, conocidos también como “retardadores”, permiten que el agua pase a través de ellos a baja velocidad. Estas estructuras son útiles cuando se desea favorecer la sedimentación y la formación de playas entre espigones (campo de espigones), permitiendo recuperar las márgenes dañadas, generalmente trabajan sumergidos y producen menor perturbación en la corriente que los espigones impermeables. Estas estructuras pueden presentar alta o baja permeabilidad, siendo su función principal “retardar” el flujo y disminuir la velocidad cerca de las márgenes.

Estas estructuras, se caracterizan por lo siguiente (ROCHA, A. 2013):

- El agua, cargada de sedimentos finos, debe pasar a través de ellos.
- El espacio comprendido entre un espigón y el otro (campo de espigones) debe irse rellenando con el depósito de los sedimentos finos en suspensión que trae el río, para posteriormente favorecerse el desarrollo de la vegetación.
- Protegen y robustecen la orilla fluvial y, por consiguiente, contribuyen a la formación de una “orilla virtual” como consecuencia de lo señalado en los puntos anteriores.
- Se pueden ir modificando y adaptando a las circunstancias que se presenten.

En general, con un sistema de espigones permeables se logra disminuir la velocidad de la corriente y favorecer la deposición de partículas transportadas en suspensión en los ríos.

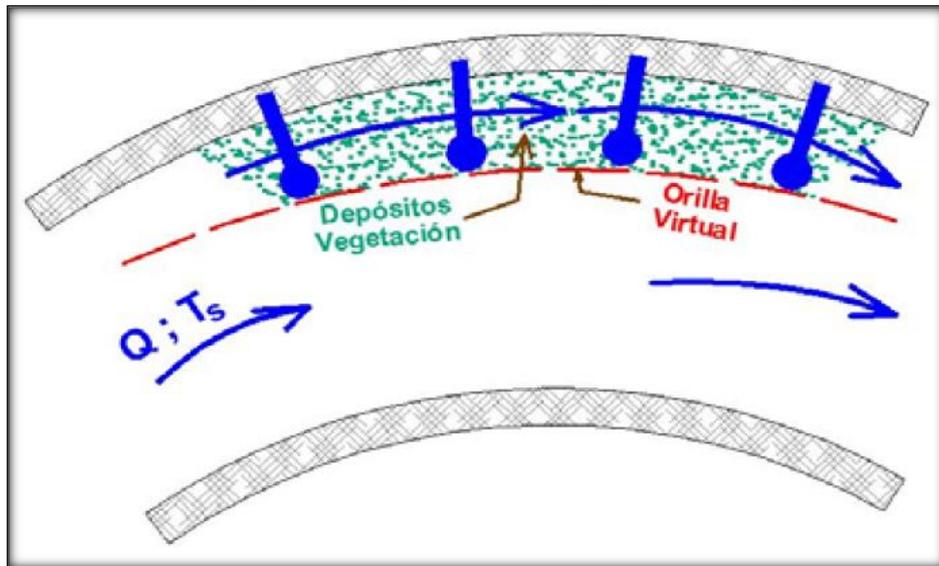


Figura 17: Formación de una orilla virtual en un tramo curvo de un río protegido con un sistema de espigones permeables.

Fuente: ROCHA, A. 2013

- **Permeabilidad de los espigones**

La permeabilidad, se define como la relación entre el área de vacíos y el área total proyectada del espigón. Se puede definir el grado de permeabilidad (P), según (MAHMOUD, et al 2012), como:

$$P = \frac{\text{Área de vacíos}}{\text{Área de espigon total proyectado}} \times 100 \quad (61)$$

b) ESPIGONES PERMEABLES FABRICADOS CON MADERA (ELJS)

Los espigones permeables fabricados con madera (troncos de árboles), se basan en la tecnología de los Engineered Log Jams (ELJs). Esta tecnología se refiere a un grupo diverso de estructuras construidas en base a troncos que ofrecen un medio efectivo para restaurar el hábitat y tratar problemas tradicionales de ingeniería de ríos como la erosión de riberas, inundaciones, daños en puentes e incisión de canales.

La tecnología de los ELJs se basa en la premisa de que la manipulación de entornos fluviales ya sea para problemas tradicionales en la ingeniería fluvial o para la restauración de hábitats, es probable que sea más económica y ambientalmente sostenible si el entorno resultante emula las condiciones y procesos naturales a las del paisaje y comunidades ecológicas adaptadas. Este enfoque es similar al campo emergente de biomimetismo en

el cual los sistemas naturales son imitados para resolver problemas humanos (BENYUS, J. 2002).

Los ELJs son estructuras únicas en el sentido de que son estructuras de ingeniería que replican la complejidad que se encuentra en los sistemas naturales. Para la construcción de estas estructuras se usa la madera como material principal, siendo la madera un material utilizado durante siglos para la construcción de estructuras dentro de las corrientes de los ríos tales como represas, diques, entre otras.

El concepto de ELJ comenzó con la observación de que los atascos naturales no solo introducen complejidad física en arroyos y ríos, lo que crea un hábitat productivo para los peces, sino que también puede controlar la morfología y el grado de los sistemas fluviales. La tecnología de los ELJs ofrece una alternativa a la ingeniería y gestión fluvial tradicional cumpliendo las siguientes funciones:

- Rehabilitación del hábitat acuático y ribereño en ambientes fluviales.
- Protección de las márgenes, lo que permite la deflexión del flujo para detener o revertir la erosión del banco.
- Protección contra inundaciones mediante la difusión de los caudales picos de las inundaciones, desviando el flujo de sitios críticos y reconectando las llanuras de inundación.
- Control de pendiente para limitar o evitar la incisión de canales y la formación de arroyos.
- Limitar el flujo de escombros.
- Control de deslizamientos de tierra provocada por la erosión de la ribera
- Gestión y protección de puentes y alcantarillas:
 - o Protección de pilares.
 - o Mejoras en el transporte (alineación de canales).
 - o Manejo de escombros.
- Implementación de estrategias sostenibles a largo plazo para restauración, desarrollo e infraestructura dentro de entornos fluviales.
- Aumento de la cantidad y calidad del hábitat de los peces.

- **Proceso de diseño de los espigones permeables de madera**

El proceso de diseño recomendado para ELJs comienza con una evaluación de la cuenca hidrográfica, seguida por un análisis de la hidrología, la hidráulica, el régimen de sedimentos y la dinámica de los canales del lugar dónde se pretende proyectar estas estructuras (HERRERA ENVIRONMENTAL CONSULTANTS, 2006).

Es importante tener en consideración además la identificación de oportunidades, limitaciones y evaluar los riesgos asociados con acciones particulares. Si se identifican oportunidades para posibles aplicaciones de los ELJs, se seleccionan los tipos apropiados de atascos naturales en función de los objetivos del proyecto y las limitaciones del sitio. Después de que la estrategia de escala de alcance general y el diseño de ELJs se refinan y se completa una evaluación de riesgos, las estructuras de ELJs individuales se diseñan y se preparan las especificaciones para los registros y los atascos. Finalmente, las estructuras se construyen y evalúan a lo largo del tiempo.

Los materiales utilizados en la construcción de ELJs son principalmente tallos de árboles (troncos) con o sin raíz adjunta. Una estructura ELJ puede consistir en una docena de registros o varios cientos de registros. El objetivo de cualquier estructura ELJ es primero imitar las funciones de los atascos naturales, como alterar los patrones de flujo o atrapar sedimentos, y secundariamente hacerlo de una manera que emule más de cerca las características naturales de los atascos. Los atascamientos naturales se aseguran por la geometría de los registros individuales, la configuración en la que se entrelazan entre sí, y la incrustación en el sustrato aluvial del río. Los medios artificiales para asegurar un ELJ como lastre de roca, cadena o troncos de concreto deben usarse solo cuando sea absolutamente necesario (HERRERA ENVIRONMENTAL CONSULTANTS, 2006).

La configuración estructural de los ELJ posee tres elementos estructurales básicos: Miembros principales o registros clave, miembros secundarios o troncos apilados y maderas de anclaje o pilas. Los ELJs pueden consistir en solo uno o todos estos tres elementos.

Los miembros principales son registros individuales, que es poco probable que se muevan durante un evento extremo, y se utilizan como base de una estructura ELJ en los canales aluviales.

Los miembros secundarios o troncos apilados son ligeramente más pequeños que los miembros principales y se utilizan en algunos ELJ para complementar a los miembros principales. Los miembros apilados se colocan en dos o más capas ortogonales que unen miembros principales y aumentan la integridad de la estructura. La mayoría de los

miembros apilados deben conservar una raíz, lo que evita que los registros de las capas subyacentes se muevan fuera de la estructura.

Los miembros apilados producen una fuente de escombros caótica y densa directamente aguas arriba. Esta acumulación de desechos desvía el flujo alrededor del ELJ y disminuye el flujo a través de la estructura. Aguas arriba de la estructura, los miembros apilados permiten retener materia orgánica y madera que la corriente arrastra después de un evento extremo (Ver figuras 18, 19, 20 y 21). Una gran cantidad de troncos retenidos, lo que es típico de la mayoría de los ELJs, aumenta drásticamente el sustrato disponible para los invertebrados. A diferencia de los sustratos inorgánicos, los troncos apilados se encuentran dentro de la columna de agua y, por lo tanto, ofrecen mucho más espacio intersticial y cobertura para los peces. La cubierta compleja creada por los miembros de la estructura proporciona un hábitat extremadamente productivo para invertebrados, peces, mamíferos y aves (HERRERA ENVIRONMENTAL CONSULTANTS, 2006).

Las pilas son un componente opcional para tipos particulares de ELJ que pueden aumentar significativamente el factor de estabilidad de seguridad al aumentar la resistencia al corte total de la estructura ELJ. Las pilas se suelen colocar entre miembros principales y secundarios. Las pilas también proporcionan un medio para crear un marco sobre el cual un ELJ puede establecerse intacto en el lecho del canal, un proceso que es particularmente importante en casos donde el riesgo de erosión es alto. Las pilas se pueden colocar verticalmente o inclinadas. Las pilas inclinadas se usan para limitar el desplazamiento vertical de otros elementos de registro y se pueden usar para retener registros apilados (HERRERA ENVIRONMENTAL CONSULTANTS, 2006).

No se necesitan materiales artificiales para la construcción de un ELJ, pero pueden usarse para circunstancias especiales o para aliviar restricciones debido a la disponibilidad o el costo de los materiales. Si se usan materiales artificiales, no deberían alterar la apariencia básica o la función de los ELJs. La construcción de ELJ típicamente requiere una excavación y nivelación significativas. Los ELJ se han construido con el uso de virutas de madera y acero, núcleos de roca e incluso troncos de concreto.

La mayoría de los proyectos ELJ implican una serie de estructuras dentro de la corriente del flujo seleccionado y su zona de migración del canal. El diseño ELJ (tipo, tamaño y posición de ELJ) depende de la comprensión de las condiciones geomorfológicas, hidrológicas e hidráulicas del sitio del proyecto que sea suficiente para caracterizar la dinámica del río y predecir el rango probable de condiciones futuras (HERRERA ENVIRONMENTAL CONSULTANTS, 2006).

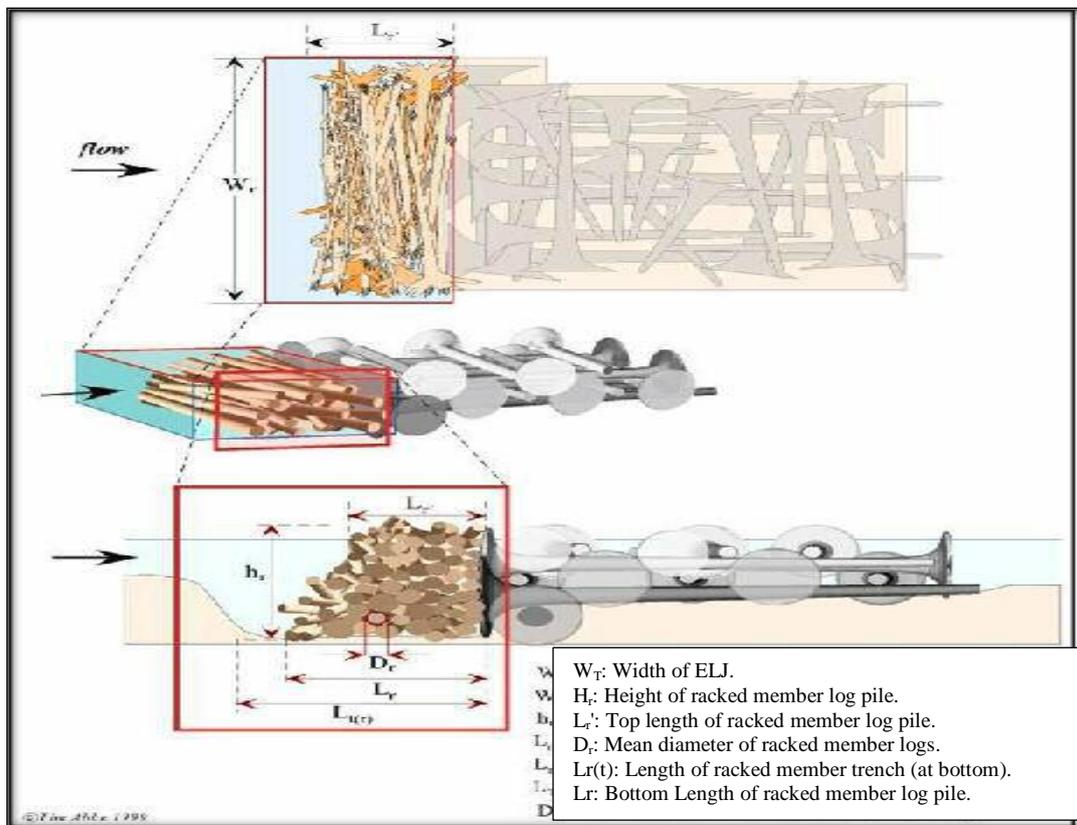


Figura 18: ELJ de deflexión de flujo, que muestra la ubicación de los troncos apilados en el extremo aguas arriba de la estructura.

Fuente: (HERRERA ENVIRONMENTAL CONSULTANTS, 2006)



Figura 19: Deflexión del flujo de un ELJ y ejemplo de una estructura tal como está que protege la orilla izquierda (mirando hacia abajo) y creando piscina y cobertura compleja para peces en North Fork Stillaguamish River, Snohomish County, Washington (flujo de izquierda a derecha).

Fuente: (HERRERA ENVIRONMENTAL CONSULTANTS, 2006)



Figura 20: Colocación de estacas de sauce en un sistema de ELJs proyectados en el río Lower Molalla, en Oregón – Washington

Fuente: CLACKAMAS SOIL AND WATER CONSERVATION DISTRICT, 2014

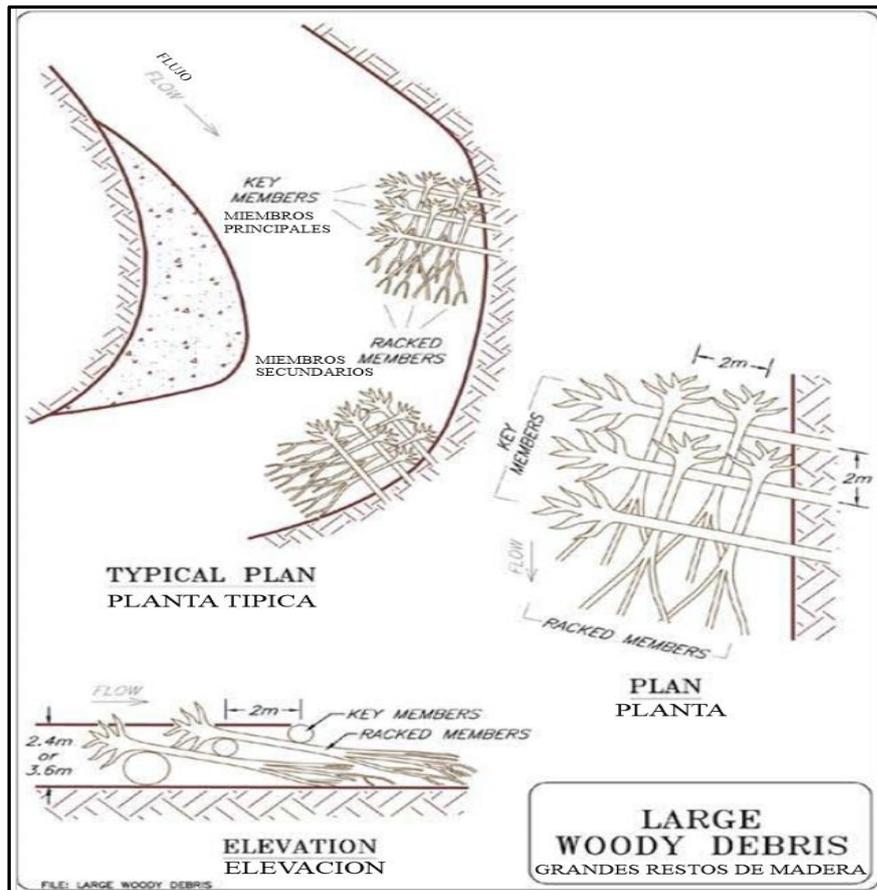


Figura 21: Detalles de los componentes estructurales de los ELJ

Fuente: SALIX APPLIED EARTHCARE NCHRP, 2005

Longitud

La longitud efectiva de los espigones se define como la longitud proyectada en una línea teórica perpendicular a la ribera del banco. El principal aspecto de diseño respecto a la mínima longitud efectiva del espigón es mantener la estabilidad del banco con respecto al desarrollo de los remolinos aguas abajo de la cabeza de la estructura (CAO, at al 2013). Este equipo de investigación, también recomienda que la longitud debería estar en el rango de 0.2 a 0.4 veces el ancho promedio del canal. Es decir:

$$L \leq (0.2 \text{ a } 0.4) B \quad (62)$$

Dónde:

L: Longitud del espigón.

B: Ancho promedio del canal.

Espaciamiento

El espaciamiento (E) entre espigones permeables debería estar en el rango de 1.5 a 5 veces la longitud efectiva del espigón (L) (CAO, et al 2013), es decir:

$$E \leq (1.5 \text{ a } 5) L \quad (63)$$

Ángulo de orientación

La orientación del espigón se define como el ángulo formado hacia aguas abajo por el eje del espigón y la tangente a la margen en el punto de arranque del espigón (ROCHA, A. 1998) (ver figura 22).

Para los espigones permeables, la forma de la estructura y el ángulo de orientación es de poca importancia en comparación con los espigones impermeables, motivo por el cual se recomienda construir los espigones permeables individuales en dirección normal al banco; es decir, considerando un ángulo de orientación de 90° , ya que es económico y apropiado desde el punto de vista hidráulico (CAO, et al 2013).

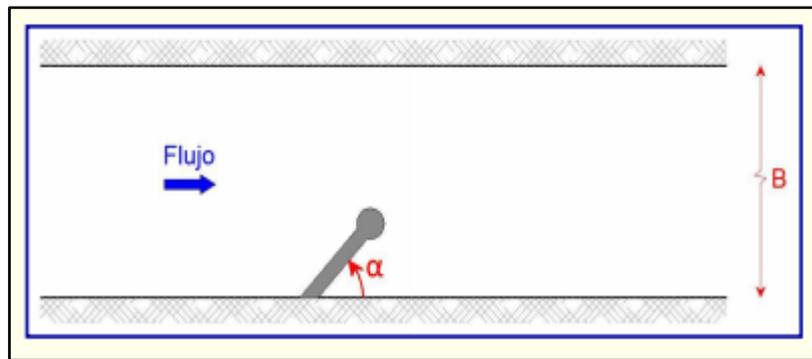


Figura 22: Orientación de los Espigones

Fuente: ROCHA, A. 1998

Eficiencia de retención de sedimentos

Según el Diccionario de la Real Academia Española, la eficiencia es la capacidad de realizar o cumplir adecuadamente una función.

Adoptado la definición anterior, la eficiencia de retención de sedimentos es la capacidad de un sistema de espigones permeables fabricados con madera de atrapar sedimentos transportados en suspensión en un lecho fluvial, en un determinado tramo.

Matemáticamente, se puede expresar de la siguiente manera:

$$E(\%) = \frac{Q_{SS\text{ENTRADA}} - Q_{SS\text{SALIDA}}}{Q_{SS\text{ENTRADA}}} * 100 \quad (64)$$

Dónde:

$Q_{SS\text{SALIDA}}$: Caudal sólido en suspensión registrado a la salida del sistema de espigones permeables.

$Q_{SS\text{ENTRADA}}$: Caudal sólido en suspensión registrado a la entrada del sistema de espigones permeables.

- **Comportamiento del flujo cerca de los espigones permeables de madera**

El comportamiento del flujo alrededor de los espigones permeables fabricados con troncos de árboles (ELJs) difiere significativamente, considerando un solo espigón y una serie de espigones, espaciados adecuadamente y ubicados en forma consecutiva a lo largo del canal.

Comportamiento del flujo cerca de un solo espigón permeable de madera

El caso más simple de estudio es un solo ELJ en un canal recto. El espigón limita una cierta parte de la sección transversal del río y afecta apreciablemente la estructura cinemática del flujo en su vecindad. La velocidad media y la descarga específica aumentan debido a la contracción. El aumento en la velocidad media conduce a un aumento en sus gradientes y una generación más intensiva de turbulencias. Muchos investigadores analizaron el patrón de flujo en la vecindad de un solo espigón y encontraron algunas características de flujo significativas que podrían destacarse en los siguientes puntos:

- Región de separación
- Migración de grandes remolinos horizontales
- Fluctuación del nivel del agua

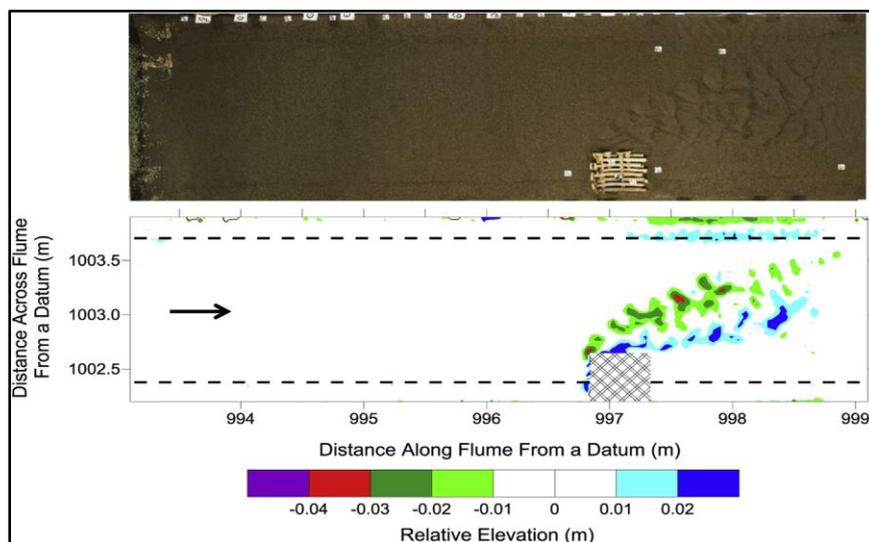


Figura 23: Comportamiento del flujo alrededor de un espigón permeable de madera

Comportamiento del flujo en una serie de espigones permeables de madera

En la etapa de diseño de espigones permeables, las incógnitas de mayor relevancia para el ingeniero a cargo de un proyecto de protección y recuperación de márgenes usando espigones permeables, son la permeabilidad, la longitud de trabajo y el espaciamiento entre estructuras. La importancia de estos parámetros radica en los efectos que pueda causar el espigón en el comportamiento del flujo. Mientras la permeabilidad del espigón aumenta, la longitud del espigón tiene una limitada influencia en la estructura del flujo (MOHAMMAD, et al 2015). Ellos mencionan también que las velocidades máximas tienden a disminuir mientras que las velocidades mínimas tienden a incrementarse, cuando se aumenta la permeabilidad de la estructura.

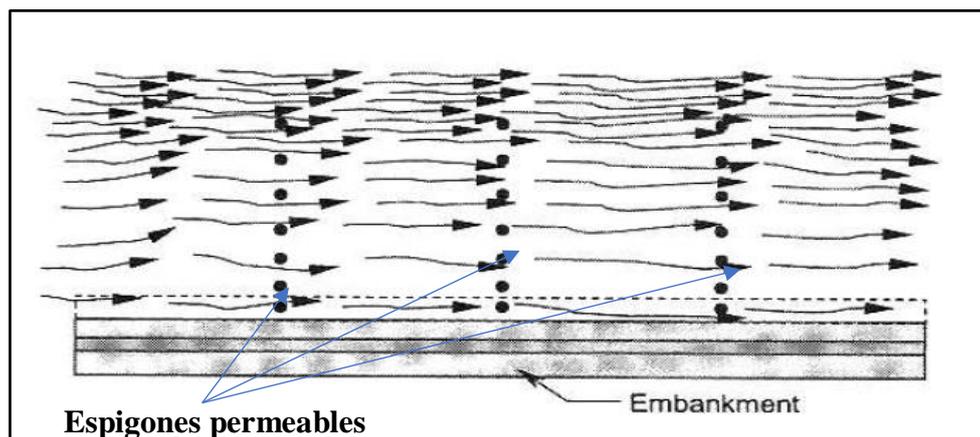


Figura 24: Patrones de flujo en un sistema de espigones permeables

Fuente: (CAO, et al 2013)

2.5.DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

- a) **RIBERA:** Se denomina ribera u orilla al borde de un cuerpo de agua. Las riberas en los ríos pueden estar compuestas de materiales como arena, grava, limo u otros.
- b) **EROSIÓN:** Remoción de partículas sólidas del lecho fluvial efectuado por el agua.
- c) **SEDIMENTACIÓN:** Deposición de partículas sólidas sobre el lecho fluvial.
- d) **LECHO FLUVIAL:** Parte de un valle por donde discurren las aguas en su curso. Es el confín físico normal de un flujo de agua, siendo sus confines laterales las riberas.

- e) **MORFODINÁMICA:** Se refiere a los procesos denudativos, como: Deslizamientos, Fenómenos de erosión hídrica, caídas de roca, áreas mal drenadas, flujos de tierra y de rocas y flujos de menor tamaño.

- f) **PROCESOS MORFOLÓGICOS:** Los procesos morfológicos son el medio a través del cual el río busca un nuevo equilibrio cuando ha sufrido una alteración debido a agentes externos.

- g) **RESILIENCIA:** La resiliencia es la capacidad de algo o alguien para adaptarse positivamente a situaciones adversas.

- h) **EFICIENCIA:** Capacidad para realizar o cumplir adecuadamente una función.

- i) **CAUDAL CRÍTICO DE INICIACIÓN DEL MOVIMIENTO:** El inicio del movimiento de las partículas en de fondo, se da cuando el esfuerzo cortante actuante, es igual al esfuerzo cortante crítico. En ese sentido, el caudal correspondiente a inicio del movimiento se denomina caudal crítico de iniciación del movimiento, el mismo que es el producto del área de la sección transversal por la velocidad crítica.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

La etapa experimental del presente trabajo de investigación se desarrolló en la División Didáctica del Laboratorio Nacional de Hidráulica “Alfonso Alcedán La Cruz”, durante el periodo: 10/02/2017 – 2/08/2017.

3.1.DISEÑO DE LOS ESPIGONES PERMEABLES DE MADERA

El diseño de los espigones permeables de madera, se basa en el concepto de espigones de troncos entramados (Engineered Log Jams), juntamente con consideraciones teóricas de las estructuras tradicionales (espigones, deflectores, etc.). Sin embargo, la disposición de los troncos y la geometría de la estructura ensayada, son variantes desarrolladas por el Laboratorio Nacional de Hidráulica “Alfonso Alcedán La Cruz”.

El material utilizado para la construcción de los espigones permeables, es la madera rolliza, de 1.2 cm de diámetro en los miembros principales y 1.2 cm de diámetro en los miembros secundarios. Por otro lado, la raíz de los espigones presenta un diámetro de 2.5 cm. (Ver figura 25).

a) GEOMETRÍA DEL ESPIGÓN

Con la finalidad de garantizar la estabilidad y así evitar el vuelco de la estructura debido a los momentos que producen la fuerza de arrastre y las presiones hidrostáticas, los espigones tienen la forma de un paralelepípedo (Ver figura 25). El ancho de la estructura fue de 0.55 veces su longitud.

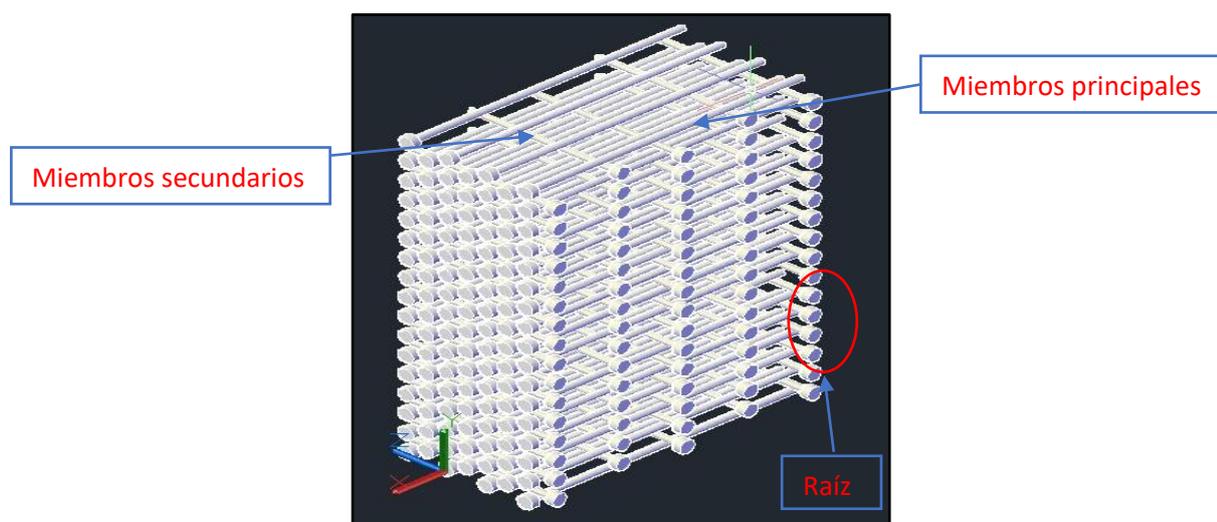


Figura 25: Geometría y disposición del entramado de los espigones permeables de madera

b) DISPOSICIÓN DEL ENTRAMADO

Las estructuras entramadas, son aquellas integradas por piezas en planos verticales, horizontales o inclinados constituyendo un conjunto estructural resistente (CASAS, I.

2006).

Para el entramado de los espigones aquí estudiados, se usaron troncos con fajos de raíces apuntando hacia aguas arriba con el fin de aprovechar la captura de material de sedimentos y troncos (estos conceptos son tomados de los espigones tipo Engineered Log Jams). El entramado consta de dos tipos de troncos denominados: espigones orientados perpendiculares al flujo (key members) y espigones orientados en dirección del flujo; ambos con su respectiva raíz.

c) DIMENSIONAMIENTO DE LOS ESPIGONES

El dimensionamiento de los ELJs, se realizó teniendo en consideración las recomendaciones teóricas existentes referente a espigones permeables, basada en la recolección de datos de campo y laboratorio, según (CAO, et al 2013). Así como también, los criterios de diseño adoptados en el Laboratorio Nacional de Hidráulica.

a) Longitud de los espigones permeables de madera

Considerando la ecuación 62, la longitud efectiva de los espigones (L) está en función del ancho promedio del canal (B).

El ancho promedio del canal experimental es de 1.9 m, con el cual se adopta una longitud efectiva de 0.475 m. Manteniendo una relación L/B de 0.25, valor que se encuentra dentro del rango establecido en la ecuación 62.

b) Espaciamiento de los espigones permeables de madera

Considerando la ecuación 63, el espaciamiento (E) está en función de la longitud efectiva de los espigones (L).

La longitud efectiva adoptada es de 0.475 m, con el cual se adopta un espaciamiento entre espigones de 2.00 m. Manteniendo una relación E/L de 4.21, valor que se encuentra en el rango establecido en la ecuación 63.

c) Permeabilidad de los espigones permeables de madera

Las permeabilidades de las estructuras evaluadas fueron de 26% en el primer ensayo y 46% en el segundo, respectivamente. Estos valores fueron tomados de un estudio previo denominado “Estudio Experimental de la Permeabilidad de los Espigones con Troncos de Árboles” realizados en el Laboratorio Nacional de Hidráulica como trabajo de tesis del Bach. Jean Deivi Huaracca Canchari, financiado por el Instituto General de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), se eligieron estas permeabilidades debido a que presentaron los valores de máxima y mínima erosión local, respectivamente.

La permeabilidad de las estructuras se determinó aplicando la ecuación 68, tal y como se detalla a continuación:

Permeabilidad 46%

Área de Vacíos : 486.6026 cm²

Área del Espigón Proyectado en dirección del flujo : 1058 cm²

Permeabilidad : 45.99% ~ 46%

Permeabilidad 26%

Área de Vacíos : 275.125 cm²

Área del Espigón Proyectado en dirección del flujo : 1058 cm²

Permeabilidad : 26.0042% ~ 26%

A continuación, se muestra una esquematización gráfica de lo anteriormente calculado.



Figura 27: Nivel máximo de agua durante los ensayos experimentales.



Figura 26: Área de la estructura en contacto con el agua durante la etapa experimental.

d) Ángulo de orientación de los espigones permeables de madera

En el presente trabajo de investigación, se ha creído por conveniente cumplir las recomendaciones hechas por CAO, et al (2013).

Es decir, se ha ensayado las estructuras con un ángulo de orientación con respecto al flujo de 90°, debido a que las recomendaciones vertidas, se basan en numerosos trabajos experimentales, así como también análisis del comportamiento hidráulico de las estructuras en prototipo. Sin embargo, queda como recomendación seguir otros estudios experimentales, considerando otros ángulos.

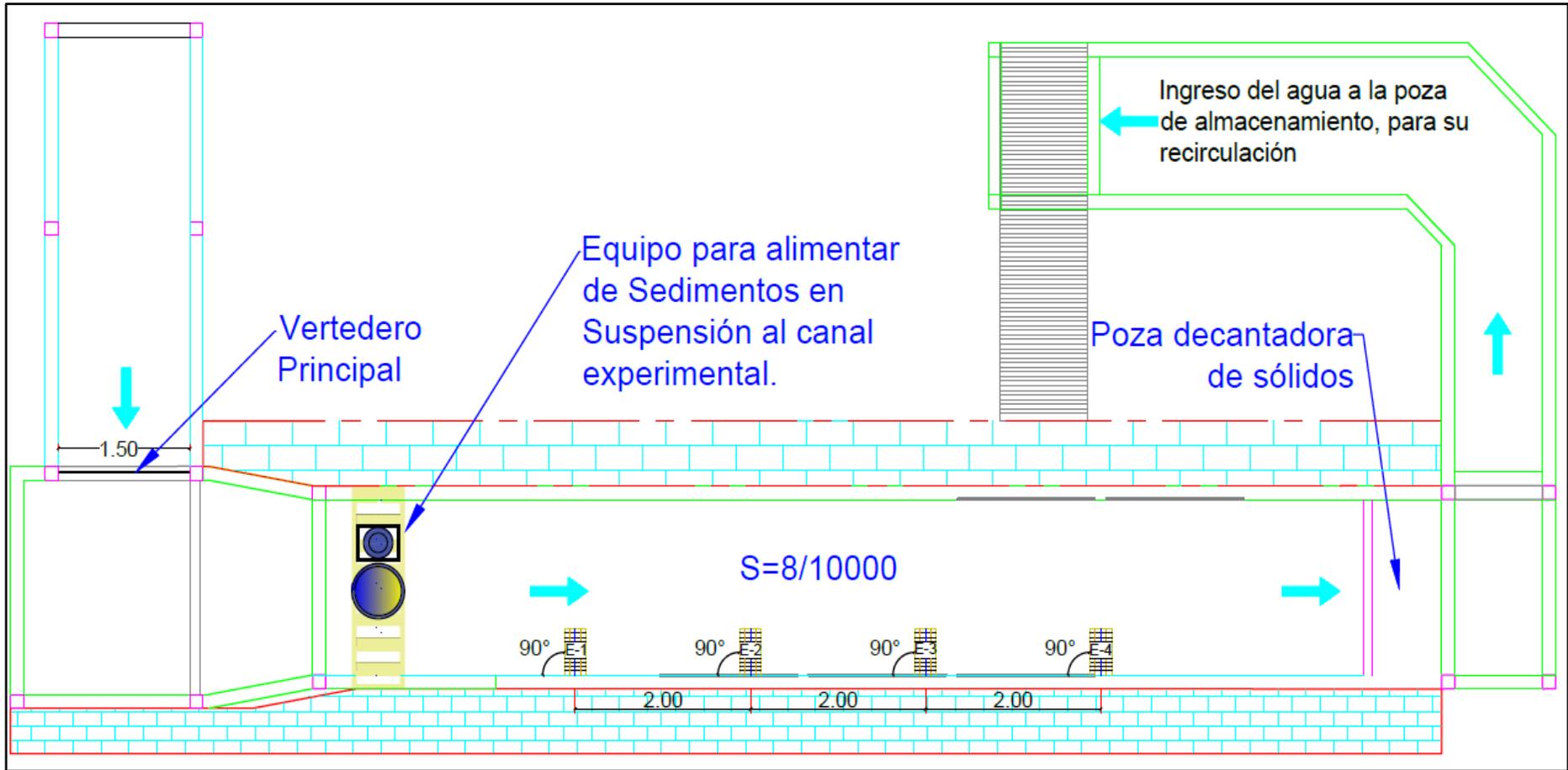


Figura 28: Planta general del canal experimental

d) GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL DE FONDO Y SUSPENSIÓN

Durante la etapa experimental se usó dos tipos de sedimentos no cohesivos (arena fina y arena gruesa), con la finalidad de evitar las fuerzas intermoleculares de cohesión, y garantizar el movimiento de las partículas tanto en el fondo, como en la suspensión.

La arena gruesa se colocó como material de fondo y la arena fina sirvió para alimentar de sedimentos en suspensión.

El d_{50} y d_{80} , de cada tipo de material fue determinado usando la curva granulométrica, la misma que se obtuvo a través de un análisis granulométrico por tamizado. Las figuras 29 y 30 muestran las curvas granulométricas de arena fina y gruesa empleadas durante los ensayos experimentales.

La gravedad específica de los sedimentos es muy cercana a 2.65, puesto que todos los materiales están compuestos fundamentalmente de cuarzo. Este valor se determinó experimentalmente en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Ingeniería (LEM-UNI).

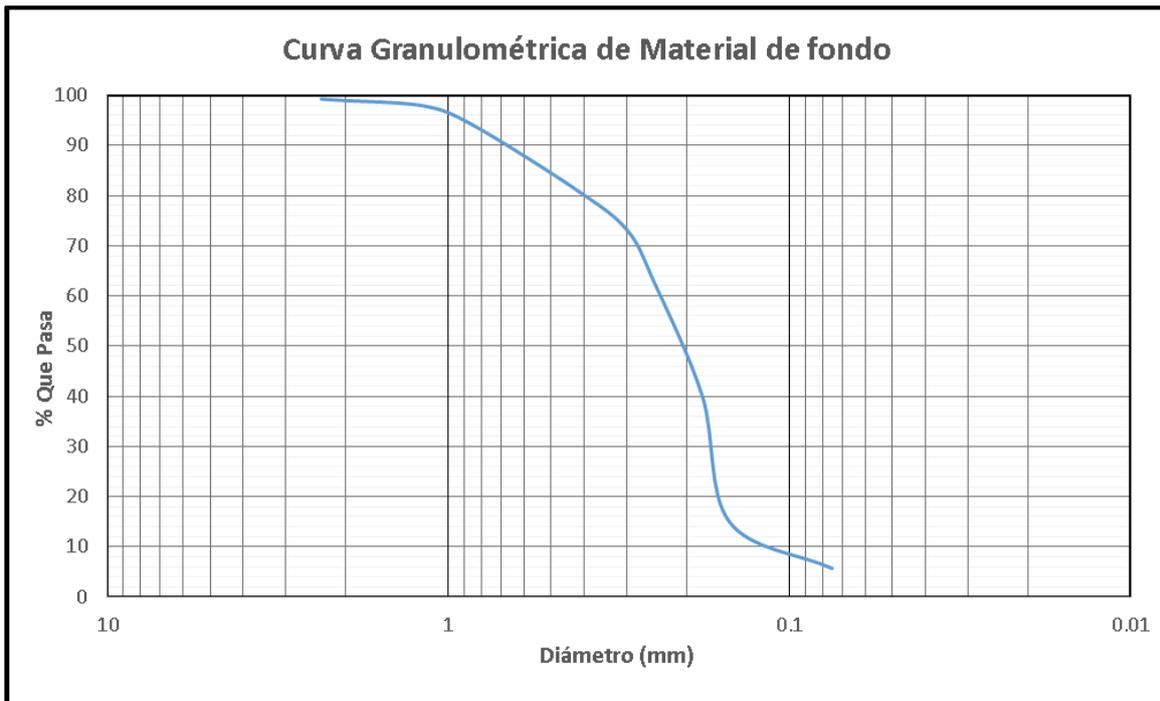


Figura 29: Curva granulométrica del material de fondo del canal experimental.

e) **CONDICIONES HIDRÁULICAS DEL CANAL EXPERIMENTAL**

Las condiciones hidráulicas fueron elegidas para cumplir con los requisitos de movilidad y suspensión de sedimentos en todos los casos de estudio.

Los tirantes fueron establecidos a fin de que el esfuerzo cortante en el fondo del canal sea mucho mayor que el esfuerzo cortante crítico para la iniciación del movimiento de las partículas en el fondo. Es así que se estableció un tirante $Y=0.245$ m. El ancho del canal $B=1.9$ m y la pendiente de 0.0008 m/m.

Bajo estas condiciones establecidas, la velocidad media estimada es de 0.334 m/s, con lo cual se obtiene un número de Froude $Fr=0.22$. Siendo el flujo subcrítico.

Por otro lado, el valor del coeficiente de rugosidad de Manning equivalente, es decir; la rugosidad por el tamaño del grano como la rugosidad por las formas de fondo es de 0.0285 .

f) **MOVILIDAD DE SEDIMENTOS**

Para asegurar la representación completa de todos los mecanismos de transporte implicados en el estudio, es necesario garantizar tanto la carga de fondo como el transporte de carga suspendida. Por este motivo se analizó cada uno de los parámetros de importancia involucrados. A continuación, se analizan con mayor detalle.

Como se aprecia en las curvas granulométricas anteriormente mostradas, el diámetro representativo empleado tanto del material de fondo como el material en suspensión es el d_{50} , el mismo que equivale a 0.204 mm y 0.175 mm, respectivamente. Cabe mencionar que los ensayos se realizaron bajo condiciones similares de temperatura, logrando no alterarse significativamente la viscosidad cinemática del agua.

La temperatura del agua al momento de realizar los ensayos experimentales fue de 20°C , para lo cual la viscosidad cinemática de $1.007 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y un factor de forma igual a 0.7 por tratarse de arena natural (JANSEN, P. 1979; RIJN, V. 1993; ROCHA, A. 1998; MARTÍNEZ, E. 2001).

Bajo estas condiciones se ha procedido a estimar la velocidad de caída de las partículas tanto del material de fondo como en suspensión, obteniendo 29.28 mm/s y 20.74 mm/s, respectivamente (Ver Tabla 6).

Tabla 6: Velocidad de Sedimentación del material de fondo ($D_{50}=0.204\text{mm}$) y del material en suspensión ($D_{50}=0.175\text{mm}$)

	$D_{50}=0.175 \text{ mm}$	$D_{50}=0.204\text{mm}$
T°	20 °C	20 °C
Viscosidad Cinemática (ν)	$1.007 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	$1.007 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Aceleración de la gravedad (g)	$9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Peso específico relativo de los sólidos (S)	2.65	2.65
Coefficiente de arrastre (C_d)	8.777	5.137
Factor de Forma	0.7	0.7
Número de Reynolds partícula (Re^*)	3.4215	5.9310
Velocidad de Sedimentación	20.74 mm/s	29.28 mm/s

Para que ocurra el transporte de carga en el fondo, el valor del esfuerzo cortante en el lecho debe ser mayor que el esfuerzo cortante crítico para el inicio del movimiento dado por SHIELDS y modificado por MILLER en el 1997.

El valor del Índice de Movilidad de las partículas (Parámetro de SHIELDS) fue determinado siguiendo el procedimiento establecido en el Marco Teórico, obteniendo que el Parámetro de Partícula (D^*) tiene un valor de 5.136 con lo cual se obtuvo un valor de 0.049 para el Índice de Movilidad ($Fr *_{cr}$). A través de este último se determinó que el esfuerzo cortante crítico (τ_{oc}) tiene un valor de 0.162 N/m^2 . Por otro lado, el valor del esfuerzo cortante actuante en el fondo del canal experimental (τ_o) bajo las condiciones

de flujo establecidas tiene un valor de 1.922 N/m^2 , por lo que τ_o es mucho mayor que τ_{oc} , garantizando así el transporte de sedimentos en el fondo del canal experimental.

Si se analiza el inicio del movimiento en el diagrama de SHIELDS mostrado en la figura 11, con el índice de movilidad y el valor del índice de inestabilidad $(\frac{V_* d}{\nu})$ igual a 7.9, los valores caen dentro de la zona II del diagrama, lo cual se encuentra en la zona de movimiento.

Sin embargo, cuando se tiene un bajo índice de movilidad, como es nuestro caso, este criterio a menudo no es suficiente para el transporte de carga suspendida, motivo por el cual varios investigadores han propuesto algunos criterios para el inicio de la suspensión, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 7: Criterios para el inicio de la suspensión

Fuente: MOHAMED, et al 2010

CRITERIO	CONDICIÓN $\frac{V_*}{w_s}$	CRITERIO DE ACUERDO A:
1	1	Bagnold, 1960 (Fuente: Van RIJN, 1984)
2	$(4/D_*, \text{Para } D_* \leq 10$ $0.4, \text{Para } D_* > 10$	De los experimentos de Van RIJN, 1984
3	0.5 (Comienzo)	Raudkivi, 1990 (Fuente: Chanson, 1999)
4	1.2 (Suspensión dominante)	JULIEN, 1990 (Fuente: Chanson, 1999)
5	0.2 (Comienzo)	JULIEN, 1990
6	2.5 (Suspensión dominante)	Chanson, 1999
7	0.25 (Comienzo)	Englund, 1965 (Fuente: Van RIJN, 1984)

Algunos criterios que definen el límite inferior para el inicio de la suspensión pueden producir velocidades menores que la velocidad crítica para el inicio del movimiento. El

criterio 2 puede definir una etapa intermedia, en la cual las ráfagas turbulentas locales con partículas de sedimento se levantan en suspensión, el criterio 4 define un régimen en el cual la suspensión es dominante, siendo este criterio el usado para garantizar el transporte de carga suspendida durante la etapa experimental.

El valor del parámetro $\frac{V_*}{w_s} = 1.335$ para el material en el fondo del canal experimental y $\frac{V_*}{w_s} = 1.885$ para el material en suspensión alimentado durante los ensayos, obteniéndose un número de suspensión (Z) de 1.872 para el material del fondo y 1.326 para el material en suspensión alimentado, lo que garantiza la suspensión de sedimentos sobre toda la columna de agua (RIJN, V. 1993).

g) CURVA DE DESCARGA

El caudal pico se definió con la finalidad de garantizar el transporte de sedimentos en ambos ensayos experimentales.

Los ensayos experimentales se iniciaron a las 04:00 a.m. y culminaron a las 7:15 p.m.; durante ese periodo de tiempo se fue alimentando gradualmente el caudal hasta llegar al caudal pico de ensayo con la finalidad de no alterar el transporte de sedimentos tanto de fondo como en suspensión. Las mediciones de las velocidades, la alimentación de los sedimentos en suspensión y el posterior muestreo de estos, se realizaron una vez alcanzado el caudal pico de ensayo; es decir, a las 07:45 a.m. aproximadamente. El caudal pico se mantuvo por un periodo aproximado de 8 horas consecutivas.

Tabla 8: Datos del hidrograma de ensayo

Tirante (cm)	Q (L/S)	Hora de Inicio
15.20	21.40	4:00:00 a.m.
18.28	49.49	4:45:00 a.m.
20.39	81.40	5:30:00 a.m.
21.94	113.56	6:15:00 a.m.
23.06	142.37	7:00:00 a.m.
24.50	155.36	7:45:00: a.m.

La curva de descarga, que nos permitió conocer los niveles de agua versus caudal durante la etapa experimental fue la siguiente:

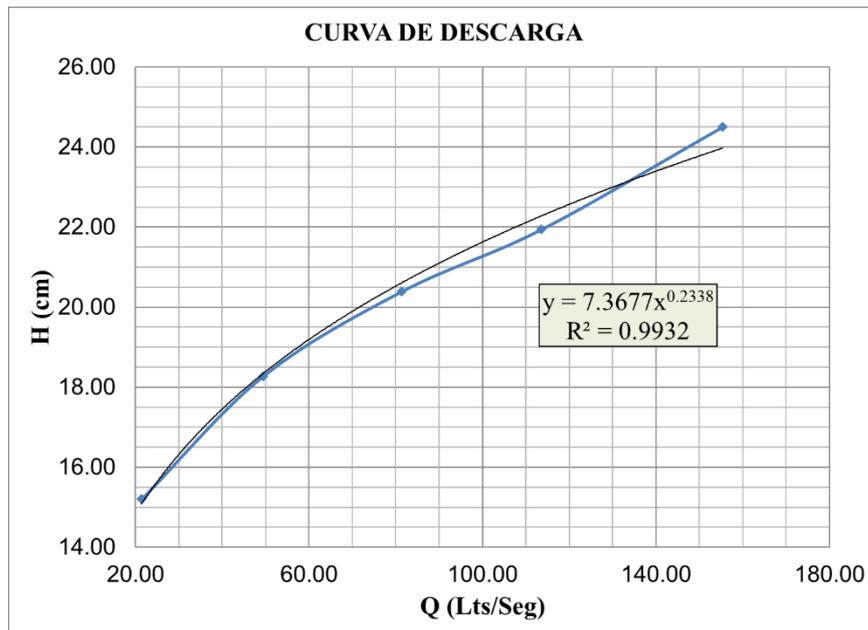


Figura 31: Curva de descarga utilizada durante los ensayos experimentales

h) EQUIPAMIENTO EXPERIMENTAL

Los estudios experimentales se llevaron a cabo en la División Didáctica del Laboratorio Nacional de Hidráulica de la Universidad Nacional de Ingeniería, en la ciudad de Lima – Perú, desde el 10 de febrero hasta el 02 de agosto del 2017. A continuación, se describe en detalle los principales componentes; así como también las instalaciones utilizadas para lograr los objetivos trazados en la presente investigación.

a) Taller de carpintería

El taller de carpintería se encuentra ubicado en el Laboratorio Nacional de Hidráulica. Cuenta con una variedad de equipos, los cuales permitieron la construcción de los espigones permeables de madera, entre ellos destacan la sierra circular, cepilladora, máquina perforadora, sierra en cinta, entre otras (Ver figura 70).

b) Canal experimental

El canal experimental utilizado fue construido en el año 2013 para realizar investigación en modelo físico de la central hidroeléctrica Napo Mazan.

Dicho canal, se encuentra ubicado en las instalaciones de la División Didáctica del LNH, tiene una longitud de 12 m, 1.9 m de ancho y 1.4 m de alto. La base del canal se asienta sobre en piso y las paredes laterales son construidas con concreto armado. En las secciones donde se colocaron los espigones permeables de madera se instaló vidrio con la finalidad de visualizar los fenómenos de sedimentación y deposición. El canal a la entrada consta de una transición, la que permitió que el flujo entre al canal sin turbulencia

y por consiguiente evitar falsa erosión en las estructuras que pudieron haber afectado los resultados.

En la salida se instaló una compuerta tipo Clapeta, la que se operó manualmente con la finalidad de regular los tirantes requeridos (Ver figura 71).

c) Tanque elevado

El tanque elevado sirvió para garantizar el caudal constante durante el periodo de ensayo. Sus dimensiones son 5 m de largo, 2.5 m de ancho y 2.5 m de altura y tiene una capacidad de almacenamiento de 5 m³. Se encuentra ubicado a 5 m del piso, a las afueras de la División Didáctica del LNH. Las bombas impulsaban el agua hasta el tanque elevado y posteriormente caía por gravedad. Para mantener el caudal requerido durante los ensayos experimentales, se reguló el caudal con un sistema de válvulas del tipo compuerta instaladas en las tuberías de alimentación al canal experimental. El tanque cuenta además con tuberías de rebose, las que permitieron que el tanque elevado se mantenga en un nivel constante (Ver figuras 73 y 74).

d) Poza de aproximación al vertedero rectangular y poza de disipación de energía

El caudal fue regulado por un sistema de válvulas del tipo compuerta, las que estaban instaladas en las tuberías de alimentación, y medido haciendo uso de un vertedero rectangular, el mismo que se encuentra ubicado en sentido perpendicular al canal experimental. Además, se instaló un limnómetro de gancho Neyrpic que permitió leer cargas de agua con una aproximación de 0.1 mm. Con la finalidad de garantizar una carga constante en el vertedero y no presentar error alguno al momento de hacer las mediciones, se instaló el vertedero aguas abajo de una poza de disipación de energía, la que estaba compuesta de dos cámaras de dimensiones variables y entre ellas se colocaron varias hileras de ladrillos pandereta a fin de permitir el paso del agua de una poza a la otra a baja velocidad.

Aguas abajo del vertedero, existe de igual manera una poza de disipación de energía, la que permitió el paso del agua al canal experimental sin turbulencia alguna, para tal fin este sistema consta de dos pozas, la primera recibe el agua del vertedero, la energía con la que llega el agua es disipada mediante mallas de alambre tipo gallinero, para posteriormente pasar a la otra poza a través de los orificios de la pared construida con ladrillo pandereta (Ver figuras 75, 76 y 77).

e) Desarenador, poza de succión y bomba hidráulica

El desarenador tiene por objeto minimizar el paso de los sedimentos hacia la poza de succión, reduciéndose así los daños a la bomba hidráulica y fundamentalmente para controlar el aporte de sedimentos al canal.

La poza de succión sirvió para abastecer de agua a la bomba hidráulica, además de recibir los excedentes del tanque elevado. Esta estructura se encuentra ubicada debajo de la División Didáctica del LNH. La poza tiene una longitud de 19 m, la profundidad y el ancho son de 4 m y 2.5 m, respectivamente. La capacidad de almacenamiento es de 25 m³.

La bomba hidráulica utilizada durante la etapa experimental (Serie: L386284) tiene una potencia de 50 HP y un caudal de bombeo nominal de 200 lt/s (Ver figura 78).

f) Equipamiento para incorporar sedimentos

Para incorporar sedimentos al canal experimental durante cada ensayo, se ha empleado un alimentador electrónico modelo Syntron. Este equipo, mediante el mecanismo de vibración, deja caer las partículas de sedimento en un tanque en cantidades requeridas. Simultáneamente, se suministra agua mediante un sistema de bombeo al tanque de manera tal que se establezca una mezcla de agua y sedimento por turbulencia para luego caer por gravedad a través de una tubería horizontal ranurada. Esto permitió distribuir uniformemente los sedimentos en suspensión a lo largo de todo su ancho (Ver figura 32).

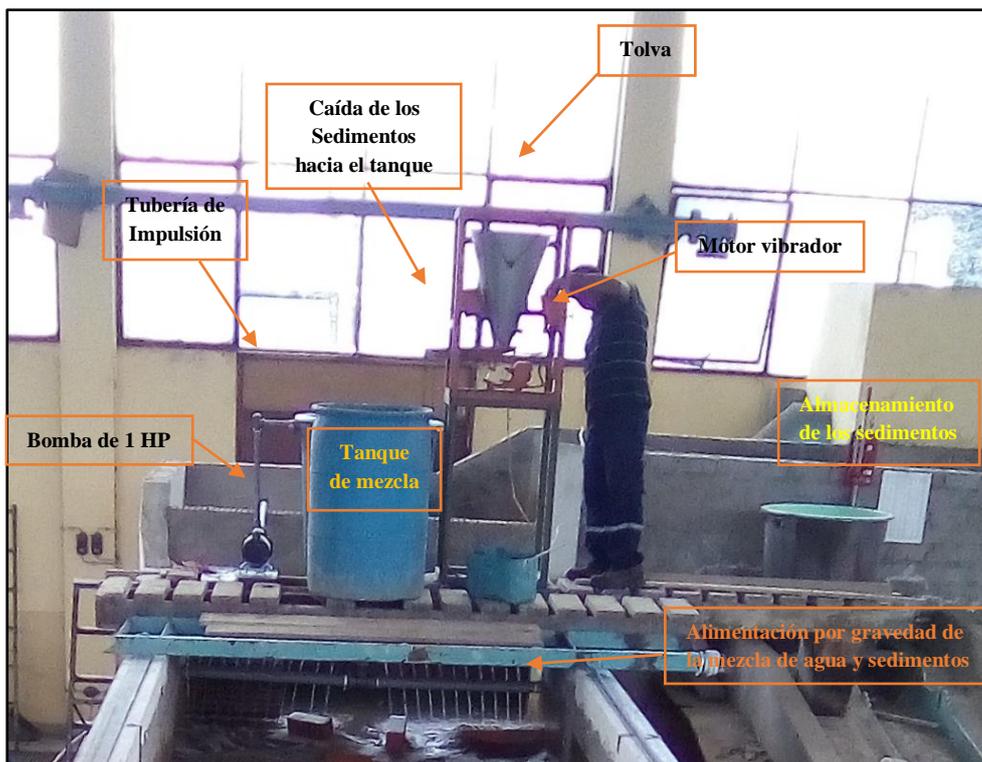


Figura 32: Suministro de sedimentos mediante un sistema de vibración electrónico

g) Equipamiento para la medición de la temperatura del agua

La medición de la temperatura del agua se hizo utilizando un termómetro electrónico de marca Toshiba, obteniendo luego un valor promedio de la temperatura del agua para cada ensayo. Estas mediciones se realizaron en todas las pruebas, los datos sirvieron para obtener la viscosidad del agua.

h) Equipamiento para la medición de los cambios en el nivel del lecho

Para medir los cambios en el nivel del lecho, se utilizó un escáner láser 3D. Los escaneos se realizaron después de la ejecución de las pruebas de laboratorio. Este equipo tiene la peculiaridad de lanzar miles de impulsos por segundo que son reflejados por las superficies, lo que permitió obtener una nube de puntos que se procesaron para obtener un levantamiento hiperrealista. Con los datos registrados por el escáner láser se obtuvo profundidades de erosión, sedimentación en el cauce, erosión cerca de las estructuras, sedimentación entre las estructuras, así como también las formas de fondo (Ver figura 80).

i) Equipamiento para medición de tirantes

La medición de tirantes se ha efectuado haciendo uso de una regla limnimétrica flexible adherida a las paredes del canal. Los valores obtenidos han sido contrastados con los datos obtenidos con el Vectrino Profiler, usado para la medición de velocidades.

j) Equipamiento para la medición de velocidades

Las velocidades durante la etapa experimental se registraron usando un Velocímetro Acústico Doppler (ADV), Vectrino Profiler. Este es un equipo de Velocimetría Acústica Doppler de alta resolución, usado generalmente para medir la turbulencia y la velocidad del agua en las tres direcciones (X, Y y Z). El equipo usa cuatro haces o transductores para medir las fluctuaciones de las velocidades instantáneas en un pequeño volumen de control (3.5 cm) a través del efecto Doppler, lo cual garantiza una alta precisión de los datos obtenidos. El efecto Doppler consiste en enviar un pulso acústico corto desde un transductor activo (central). Cuando dicho pulso atraviesa un punto a donde se orientan los transductores pasivos (laterales), el eco es registrado por cada uno de los haces. Las señales son procesadas para determinar sus desviaciones Doppler para luego ajustar la escala en base a la velocidad de propagación del sonido en el agua, dando como resultado la velocidad en las tres direcciones. Dichas velocidades se almacenan en un computador para luego ser analizadas y procesadas, obteniendo como producto final gráficas de

velocidades en diversos puntos de un total de 15 secciones. A continuación, se muestra sus componentes principales y se describe su funcionamiento.

- **Descripción de la sonda**

La sonda es el componente más importante del Vectrino Profiler, está hecha de titanio y consta de cuatro transductores de recepción (patas laterales) y uno de transmisión (centro de la sonda).

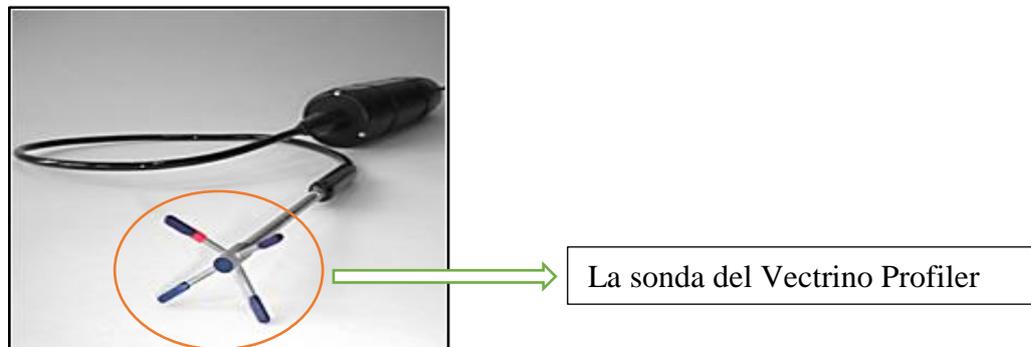


Figura 33: Sonda del Vectrino Profiler

- **Descripción funcional**

A continuación, se muestra cómo los transductores se intersectan entre sí a 40 mm del transmisor. El perfil de medición se define por esta intersección y por la distancia de alcance en el tiempo (75 mm). El transductor de transmisión envía un impulso corto que transita por la región de perfilación; a la vez, el Vectrino utiliza cuatro receptores, todos enfocados en el mismo volumen, para obtener los tres componentes de velocidad desde ese mismo volumen.

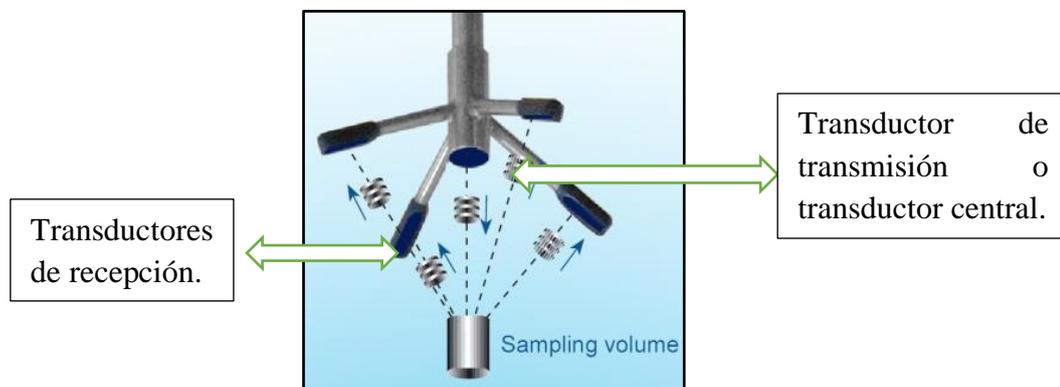


Figura 34: Esquematización de la transmisión del pulso desde la sonda central y recepción de los pulsos por las sondas laterales

Un pulso se transmite desde el transductor central, y el cambio Doppler introducido por las reflexiones de las partículas suspendidas en el agua, es recogido por los cuatro

receptores, ubicados en los extremos de la sonda. Este trabajo lo realiza en un volumen de control (Sampling Volume) de 3.5 cm.

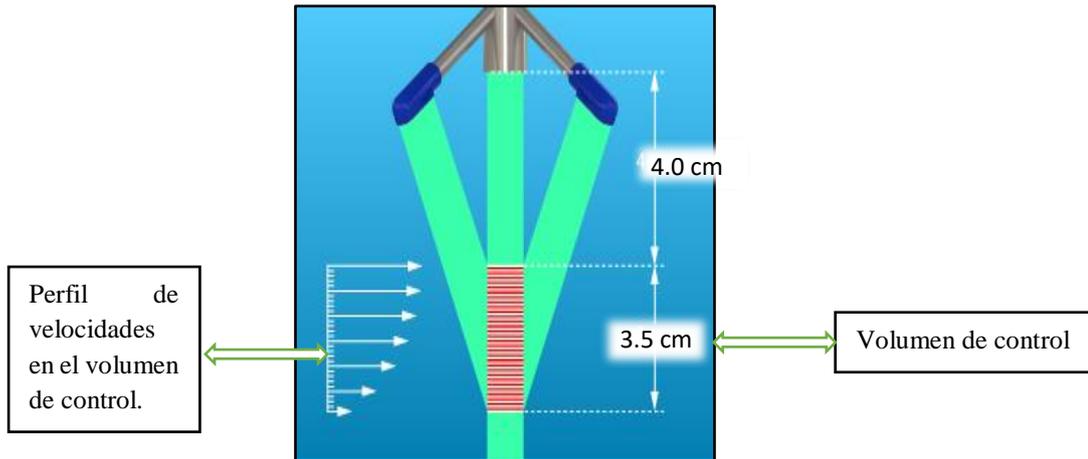


Figura 35: Longitudes de transmisión e intersección desde el transductor central

- **Sistema de coordenadas**

El Vectrino mide componentes de velocidad paralelos a sus haces, reportando datos en el sistema de coordenadas XYZ.

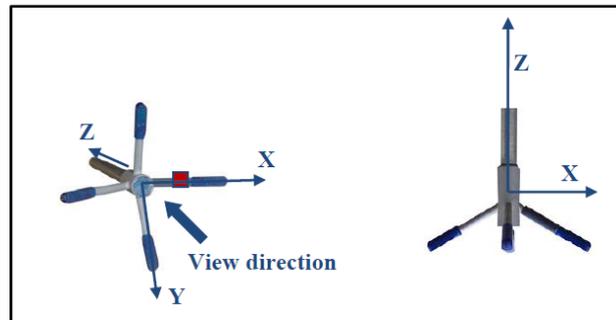


Figura 36: Sistema de coordenadas del Vectrino Profiler

Las coordenadas XYZ son relativas a la sonda e independientes de la dirección en la que apunta el instrumento (Aguas arriba o aguas abajo).

En coordenadas XYZ, una velocidad positiva en la dirección X, significa que el equipo apunta aguas abajo. Es decir, va en dirección de la flecha del eje X.

- **Procedimiento para la recolección de datos**

Para la recolección de datos de velocidades durante la etapa experimental, fue necesario realizar los siguientes pasos:

Instalación del Vectrino Profiler

La instalación consiste en montar el equipo sobre un soporte ubicado en un puente móvil, el mismo que se desplaza a lo largo de rieles ubicados sobre las paredes laterales a través de un sistema de rodajes, y conectarlo a una laptop a través del cable de almacenamiento.

Manipulación del equipo

Una persona se encargó de deslizar el equipo a lo largo de la columna de agua (Ver figura 37), tomando el primer registro de velocidades a 7.5 cm del fondo y posteriormente a 3.5 cm (longitud que corresponde al volumen de control) del anterior (Ver figura 35). Esta posición fue verificada mediante una cinta métrica instalada en el soporte del equipo hasta lograr medir las velocidades de toda la columna de agua. El procedimiento se repitió a lo largo de 15 secciones transversales, en cada sección transversal se registraron 13 puntos en promedio, espaciados una cierta longitud cada uno de ellos.

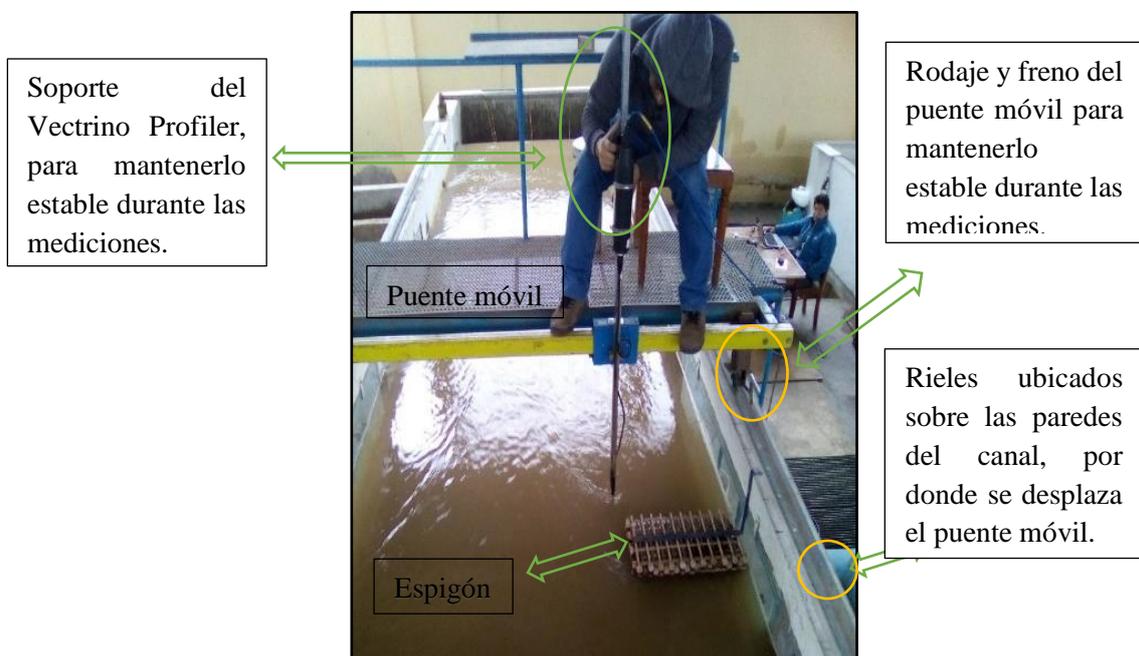


Figura 37: Partes principales del soporte del Vectrino Profiler y puente móvil



Cinta métrica ubicada en el soporte del Vectrino para regular las alturas de medición de velocidades a lo largo de la columna de agua.

Figura 38: Cinta métrica para la regulación del volumen de control

Los registros de velocidad tomados en los diversos puntos a lo largo de las 15 secciones se fueron almacenando simultáneamente en una laptop (Marca hp, Procesador Core i7, Memoria RAM 4.00 GB, Sistema Operativo de 64 bits) para su posterior procesamiento.

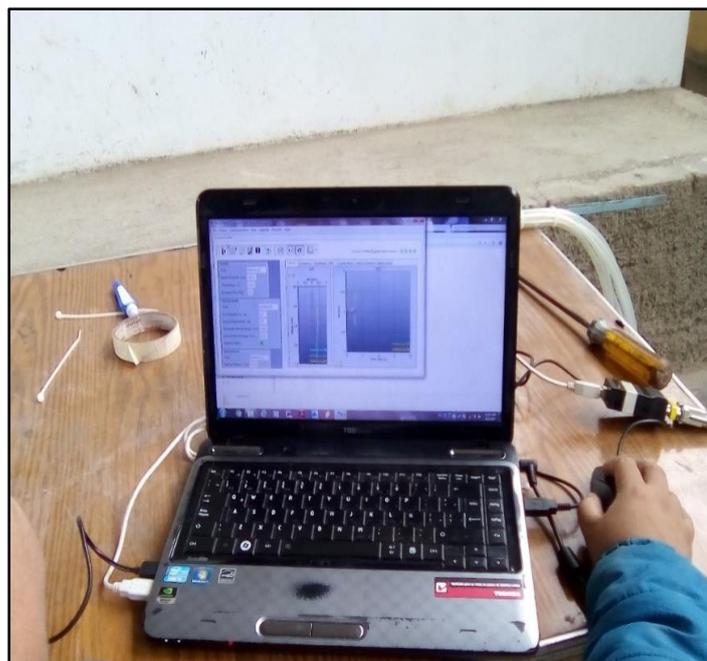


Figura 39: Almacenamiento de los datos de velocidades en una laptop para su posterior procesamiento

k) Equipamiento para el muestreo de sedimentos en suspensión

Para el muestreo de sedimentos en suspensión se usó un equipo de succión transversal, construido en el taller de mecánica del LNH. Este equipo está constituido por un sistema de tubos cuyos diámetros de succión son de 3/8", espaciados cada 5 cm verticalmente (Ver figuras 81, 82, 83 y 84), de forma que permita tomar muestras en diversos puntos del tirante de agua. La evacuación de la muestra se hizo aplicando el método del sifonaje, y almacenadas en depósitos de plástico, debidamente codificados. Este procedimiento se realizó en siete (07) secciones transversales, tal y como se muestra en la figura 50.

Una vez terminado el proceso de muestreo, se procedió a someter las muestras al horno del Laboratorio Nacional de Hidráulica, con la finalidad de obtener la concentración de sedimentos en suspensión en mg/l.

La muestra extraída fue sometida a movimientos manuales, con la finalidad de homogenizarla, seguidamente se extrajo en una probeta graduada la cantidad de 1000 ml (Ver figura 85), la cual fue llevada al horno a una temperatura de 110 °C por un periodo de tiempo de 4 horas, tiempo en el que se evaporó toda el agua de la muestra y finalmente se realizó el pesaje para obtener la concentración de sedimentos en suspensión.

i) PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento realizado en cada ensayo experimental es el que se describe a continuación:

Construcción de los ELJs

Las estructuras fueron construidas en el taller de carpintería del Laboratorio Nacional de Hidráulica, desarrollando las siguientes actividades:

- Compra y traslado de la madera a las instalaciones de la carpintería del LNH.
- Habilitación de las maderas longitudinales, transversales y raíces de los ELJs.
- Construcción de los espigones ELJs mediante entramados.

Preparación del Modelo para cada ensayo

En esta etapa se desarrollaron las siguientes actividades:

- Instalación de los espigones en la margen derecha del canal experimental (Ver figura 79).

- Ajuste de la pendiente del canal
- Nivelación del lecho de arena, a través de un reglado cada 0.5 m (Ver figura 79).
- Instalación y calibración de la máquina alimentadora de sedimentos en suspensión a los valores prefijados.
- Diseño y calibración del vertedero rectangular de pared delgada para la medición de los caudales alimentados al modelo experimental.
- Previo a cada ensayo se satura el lecho con la finalidad de representar la condición real de un río que usualmente tiene un lecho saturado antes de una avenida. La condición de la saturación se verifica cuando cesa el burbujeo en la superficie del lecho (Ver figura 86). Aquí, se tuvo especial cuidado en no generar falsa erosión en el lecho, lo que podría afectar los resultados finales.

Registro de datos y Recolección de muestras de sedimentos en suspensión

- Se dio inicio al ensayo con la apertura de las válvulas tipo compuerta ubicadas en la tubería de alimentación al modelo experimental.
- Se inició la medición de los caudales, con la finalidad de llegar al caudal máximo de la curva de descarga mostrada en el acápite anterior, los cambios de caudal fueron realizados gradualmente y considerando el tiempo establecido para cada uno de ellos, con la finalidad además de no alterar el proceso de transporte de sedimentos.
- Cuando se logró reproducir el caudal máximo, se dio apertura a la alimentación de sedimentos en suspensión, usando la máquina alimentadora electrónica tipo Syntron.
- Durante los ensayos se observó el proceso de erosión, deposición e intercambio de sedimentos en el campo de espigones, gracias a los vidrios transparentes ubicados en los lugares donde se instaló las estructuras. Cuando no se observaba movimiento de las partículas, entonces en canal había llegado al estado de equilibrio, por lo que se procedió a realizar las mediciones de velocidades y al muestreo de sedimentos en suspensión.
- Culminada la etapa de medición de velocidades y muestreo de sedimentos en suspensión, se procedió a dar por finalizado el ensayo.

- Se procedió a drenar el canal experimental sin alterar el movimiento de las partículas del material de fondo y esperar su secado a temperatura ambiente.
- Una vez secado el lecho, se procedió al escaneo del canal experimental, con la finalidad de obtener datos cuantitativos de erosión y deposición (Ver figura 80).

Evaporación de las muestras de sedimentos en suspensión

- Las muestras de sedimentos en suspensión fueron almacenadas en el taller de carpintería del Laboratorio Nacional de Hidráulica. Posteriormente se realizó la homogenización manual y la extracción de un volumen de 1000 ml para ser sometido a evaporación, a una temperatura de 110 °C.
- Una vez evaporada el agua de la muestra, se procedió a pesar los sedimentos que quedaron en el vaso de pyrex.
- Realizamos los cálculos de concentración de sedimentos en suspensión de las muestras extraídas.

j) ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS.

La eficiencia de retención de sedimentos, se estimó teniendo como referencia la ecuación 64. Para ello, fue necesario recolectar muestras de sedimentos en suspensión en varias secciones transversales, siendo las secciones S-1 y S-15 (Ver figura 50) las de principal importancia. Los valores aquí obtenidos se contrastaron con los cambios en los niveles del lecho en varias secciones transversales del canal experimental. Los que se obtuvieron a través de un escáner láser 3D. Además, el registro horario de las alturas en la sección S-8, usando el ADV (Acoustic Doppler Velocímetro), permitió reafirmar los valores obtenidos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presenta y discuten los resultados de la investigación, los mismos que fueron obtenidos a partir de mediciones realizadas durante la etapa experimental. Se analizaron las velocidades del flujo en un determinado número de secciones transversales para luego presentar y analizar el comportamiento de los sedimentos en suspensión.

4.1.PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

a) VELOCIDADES

Durante la etapa experimental se registró la medición de velocidades en un determinado número de secciones transversales para cada ensayo realizado, las cuales fueron ubicadas estratégicamente a fin de poder visualizar el comportamiento del flujo. Cada sección transversal contiene un determinado número de puntos de muestreo distribuidos adecuadamente, tal y cómo se muestra en los planos 01 y 02, respectivamente. La cantidad de puntos de muestreo en cada sección transversal se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 9: Cantidad de puntos de muestreo de velocidades, por sección transversal obtenidos para cada uno de los ensayos experimentales realizados.

Sección	Ensayo: P=26%	Ensayo: P=46%
	Nº de Puntos	Nº de Puntos
S-1	10	13
S-2	13	13
S-3	13	13
S-4	8	8
S-5	8	8
S-6	8	8
S-7	13	13
S-8	13	8
S-9	13	8
S-10	8	No se registró
S-11	8	6
S-12	8	No se registró
S-13	13	8
S-14	13	No se registró
S-15	10	8

En cada uno de los puntos que componen las secciones transversales del canal experimental, anteriormente indicadas, se ha registrado la medición de velocidades siguiendo el procedimiento establecido en el acápite anterior, obteniendo un perfil de velocidades para cada uno de los puntos muestreados (Ver Anexos).

Sin embargo, con la finalidad de mostrar el comportamiento del flujo para cada uno de los ensayos realizados, se muestra y analizan los vectores de velocidad, en el plano X-Y, obtenidos a partir de las velocidades medias de cada uno de los perfiles de velocidad de cada uno de los puntos componentes de las secciones transversales: S-1, S-2, S-5, S-8, S-11 y S-15 (ver figuras 42, 43, 44, 45, 46 y 47).

A la vez, se muestra una vista en planta del comportamiento del flujo mediante partículas de baja densidad, arrojadas uniformemente a lo largo de la sección transversal S-1, del canal experimental, para cada uno de los ensayos realizados (Ver figuras 40 y 41).



Figura 40: Vista en planta de las partículas de baja densidad, para el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad.



Figura 41: Vista en planta de las partículas de baja densidad, para el ensayo con estructuras de 46% de permeabilidad

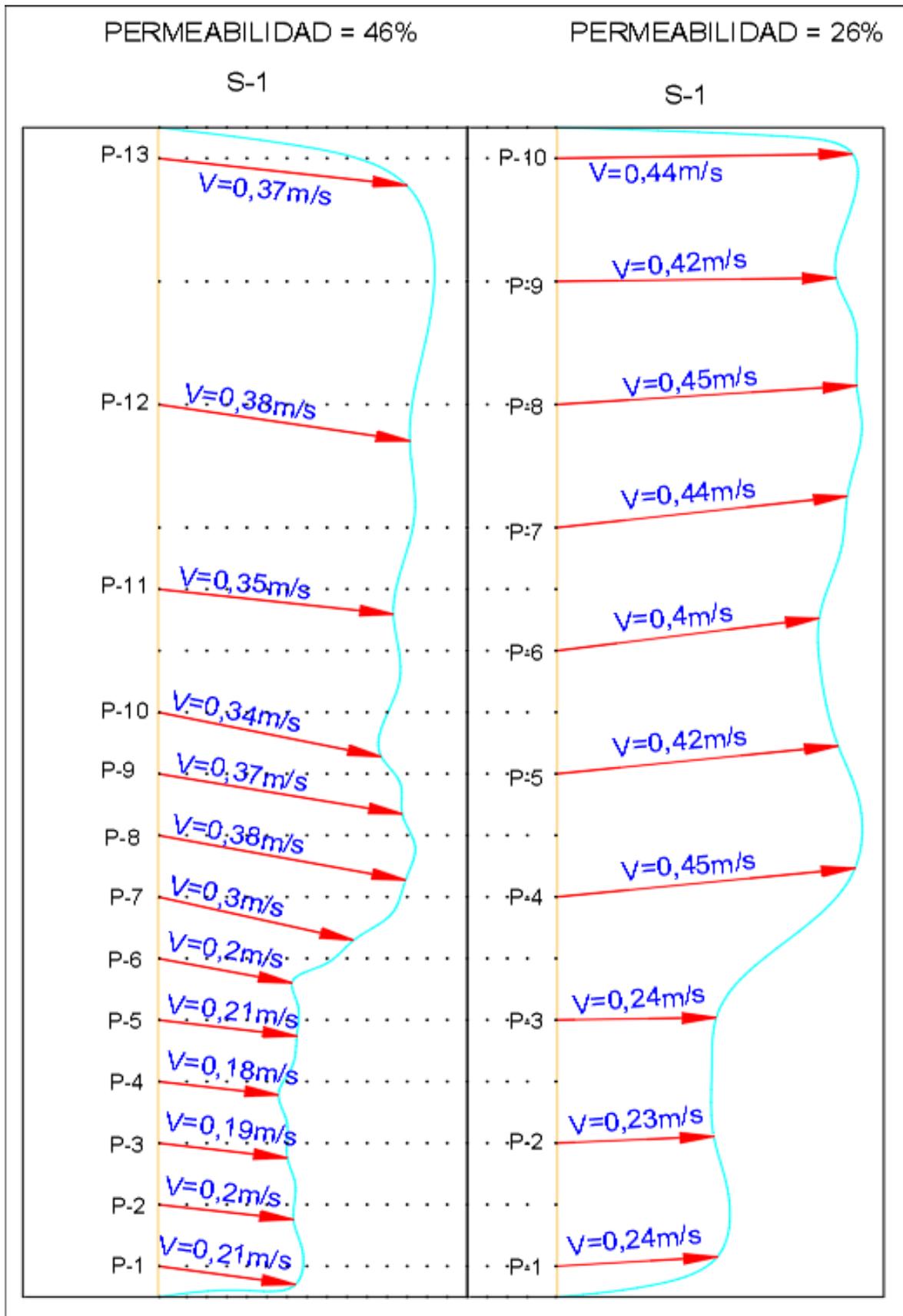


Figura 42: Comparación de los vectores de velocidad en la sección S-1.

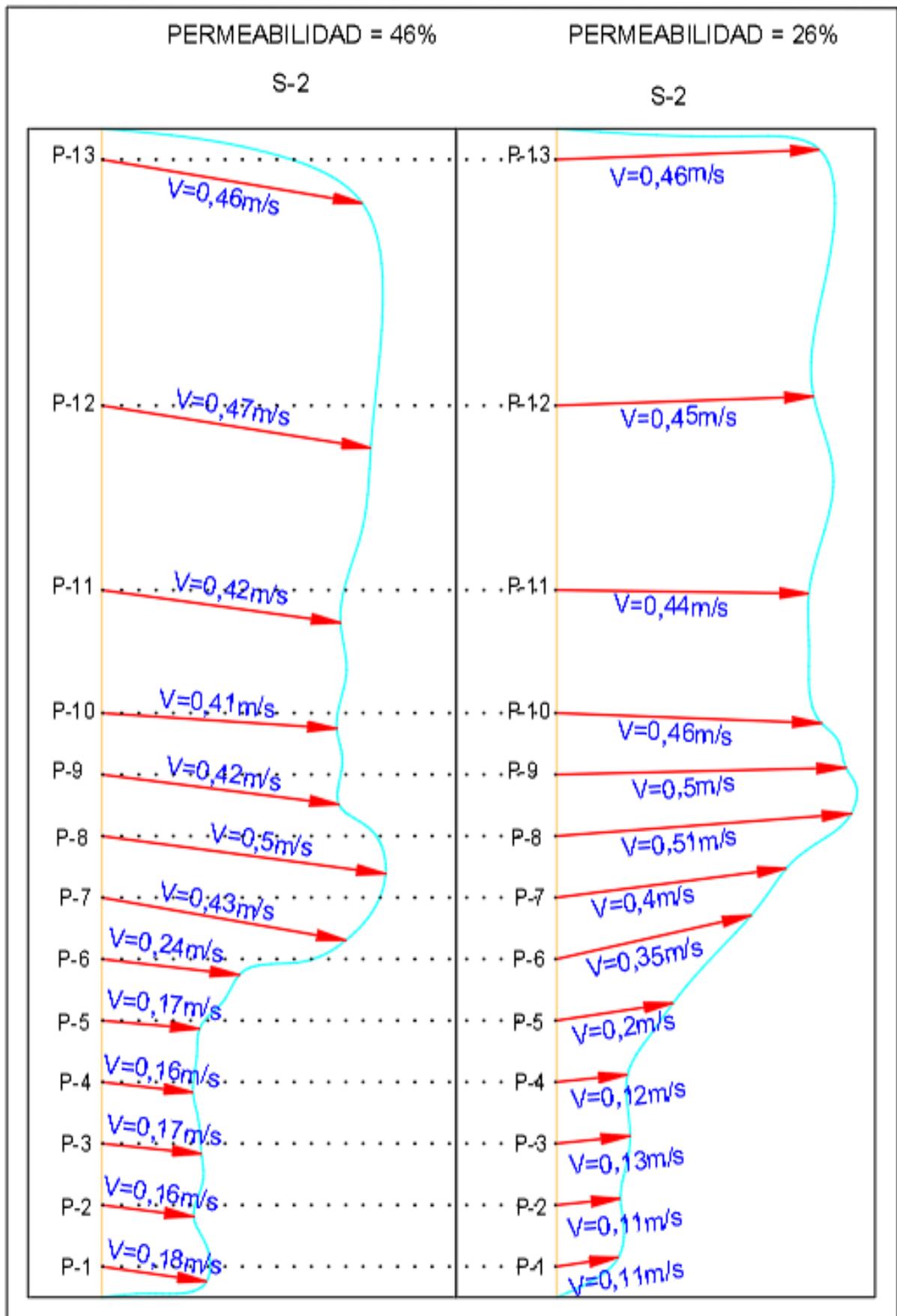


Figura 43: Comparación de los vectores de velocidad en la sección S-2

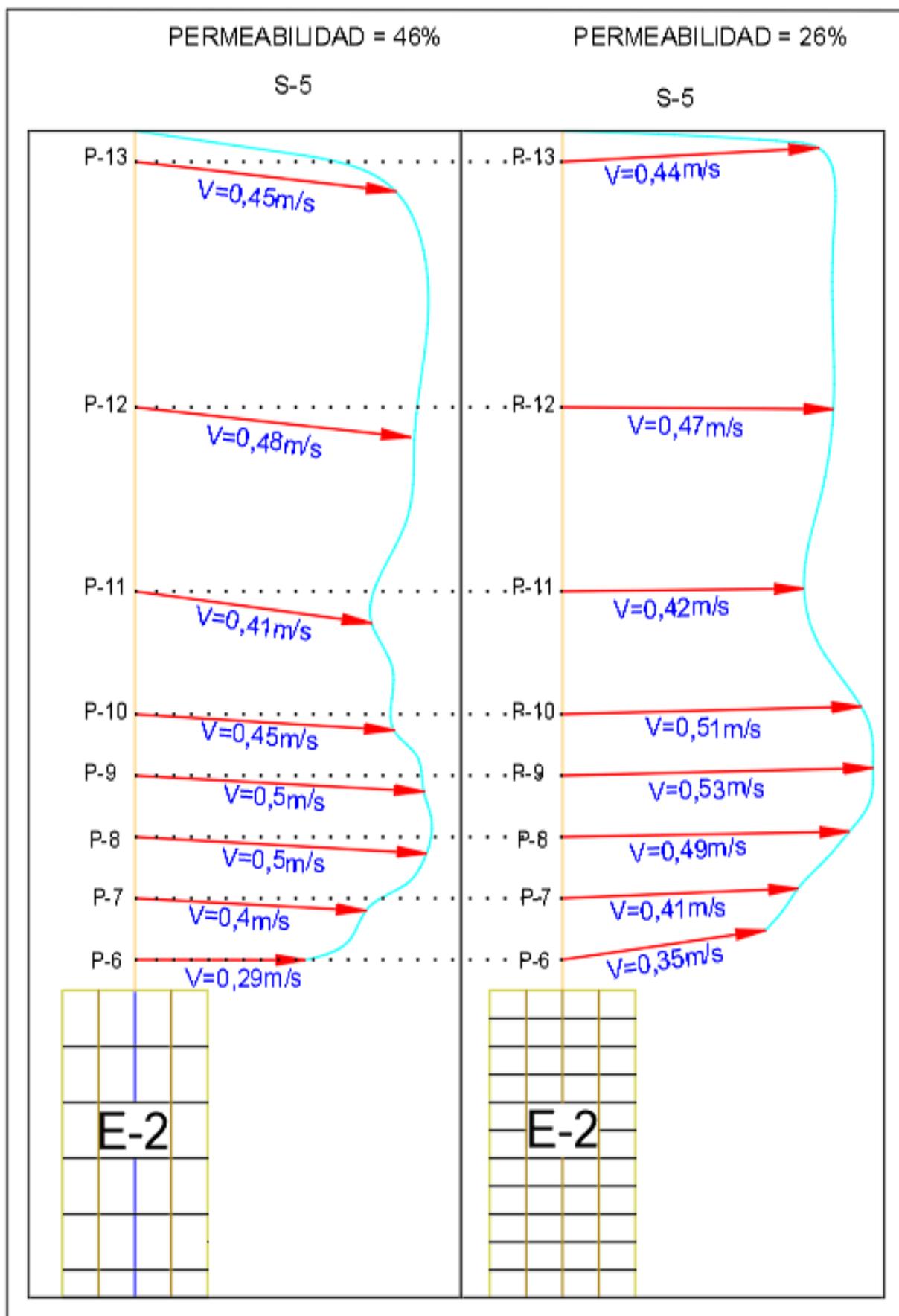


Figura 44: Comparación de los vectores de velocidad en la sección S-5

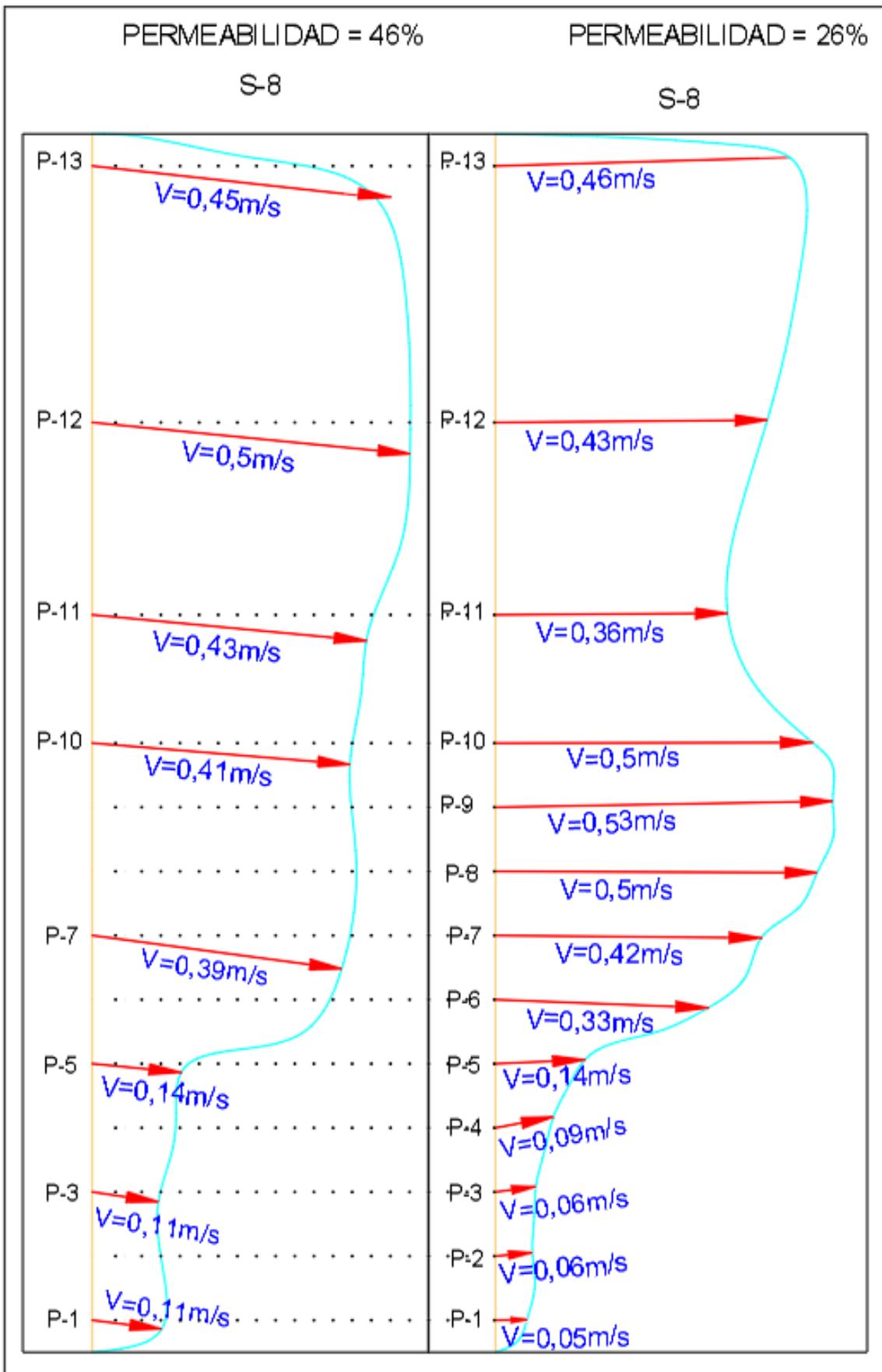


Figura 45: Comparación de los vectores de velocidad en la sección S-8

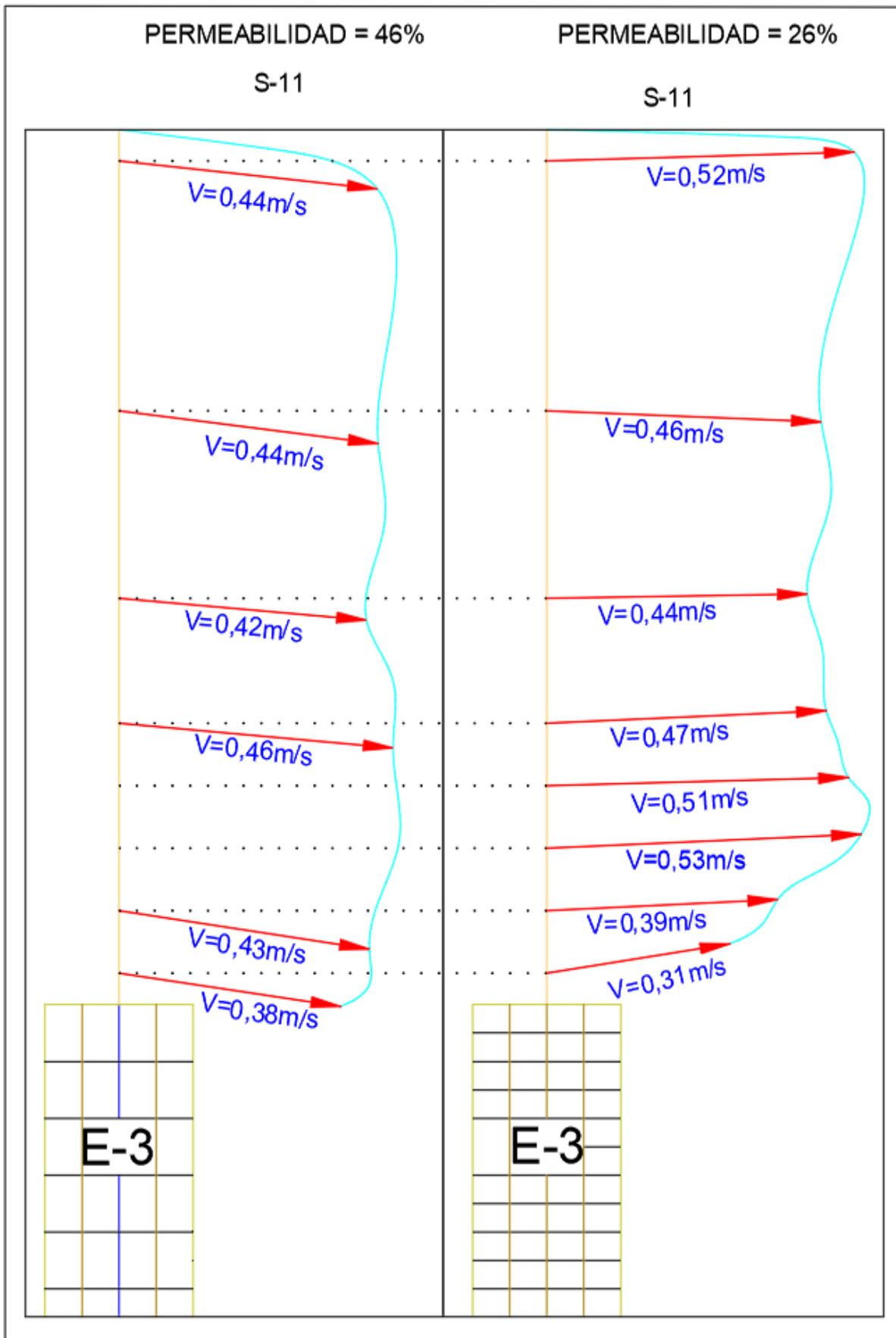


Figura 46: Comparación de los vectores de velocidad en la sección S-11.

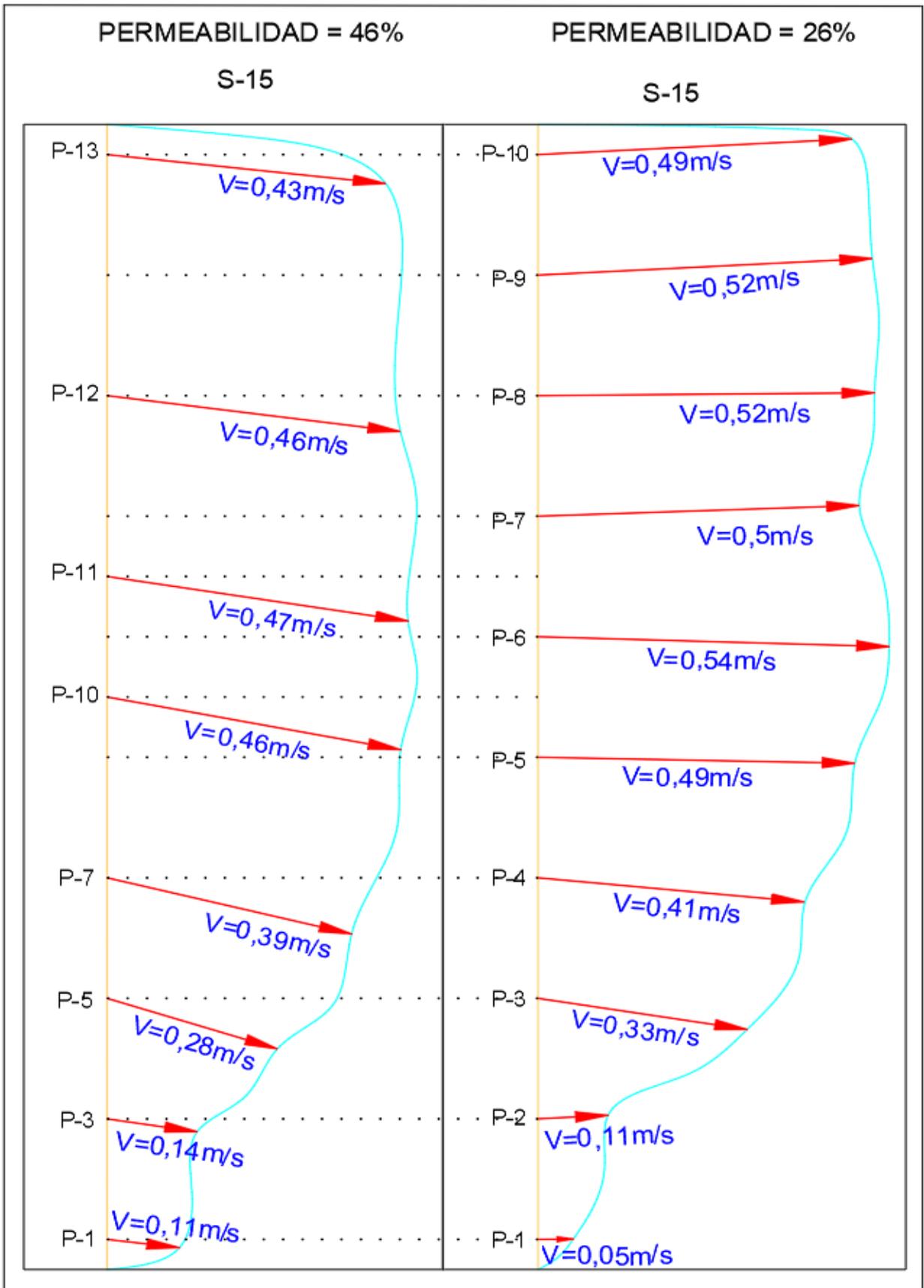


Figura 47: Comparación de los vectores de velocidad en la sección S-15

Como se aprecia en las figuras mostradas anteriormente, los vectores de velocidad tienden a alejarse de la margen derecha cuando la permeabilidad de la estructura es de 26% y se acercan cuando la permeabilidad es de 46%.

Si bien, los espigones de 26% de permeabilidad permiten alejar las líneas de corriente de la orilla, reduciendo eficientemente las velocidades del flujo en el campo de espigones (espacio comprendido entre dos espigones consecutivos); sin embargo, generan una excesiva erosión local en la cabeza de la estructura (Ver figura 49), comprometiendo la estabilidad de esta a lo largo del tiempo.

Por otro lado, al aumentar la permeabilidad; es decir, con 46% de permeabilidad de la estructura, los efectos relacionados a la separación del flujo y la gran generación de remolinos (seguidos por las corrientes de retorno) y, por lo tanto, la erosión local en la cabeza del espigón, se reducen considerablemente (Ver figura 48).



Figura 48: Vista general de la erosión en las estructuras de 46% de permeabilidad.



Figura 49: Vista general de la erosión en las estructuras de 26% de permeabilidad.

b) CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN

Las muestras de sedimentos en suspensión durante la etapa experimental fueron tomadas en un total de siete (07) secciones transversales en cada ensayo experimental, cada sección fue dividida en un determinado número de puntos (ver figura 50).

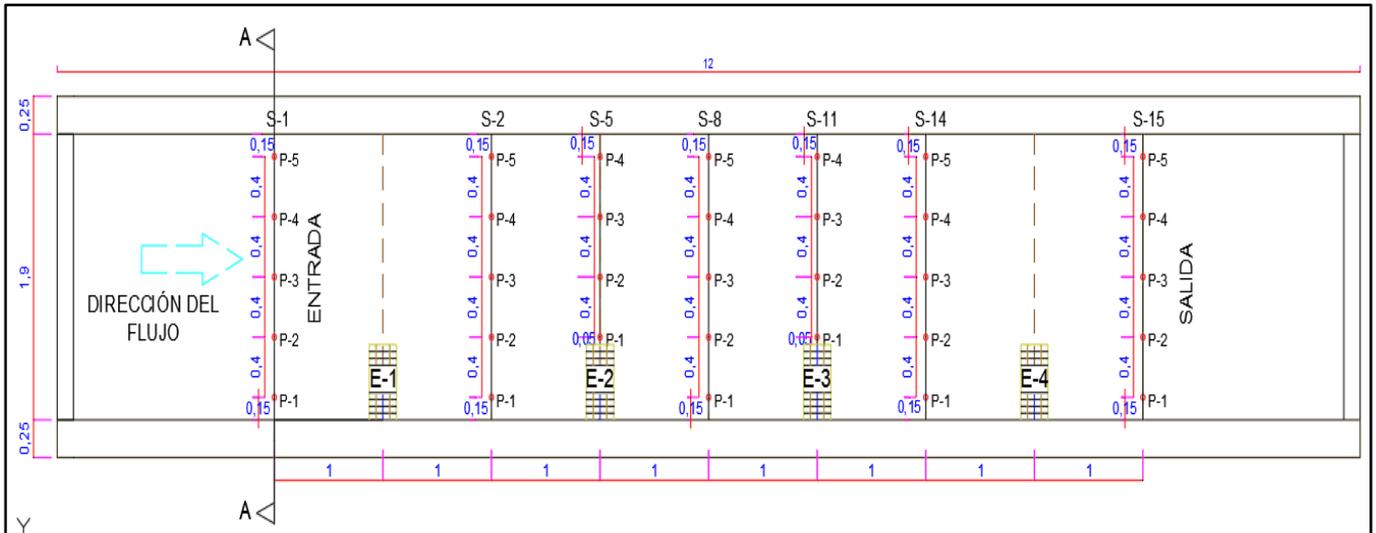


Figura 50: Ubicación de las secciones y puntos de muestreo de sedimentos en Suspensión en el canal experimental.

Como se aprecia en la figura 50, las secciones de muestreo de sedimentos en suspensión (S-1, S-2, S-8, S-14 y S-15) fueron ubicadas a una distancia de 1.00 m tanto aguas arriba como aguas abajo del eje de los espigones, y las secciones S-5 y S-11 se ubicaron en el eje de los espigones E-2 y E-3, respectivamente. El número de puntos de muestreo en cada sección transversal es variable, manteniendo cinco (05) puntos (ubicados a 0.15 m, 0.55 m, 0.95 m, 1.35 m y 1.75 m de la margen derecha de la canal experimental) en las secciones S-1, S-2, S-8, S-14 y S-15 (ver figura 51), y cuatro (04) puntos en las secciones S-5 y S-11 (ubicados a 0.55 m, 0.95 m, 1.35 m y 1.75 m de la margen derecha del canal experimental) debido a que se tomaron a partir de la cabeza en el eje de los espigones E-2 y E-3, respectivamente (ver figura 52).

En cada uno de los puntos de las secciones transversales indicadas, se han tomado cuatro (04) muestras, las que han sido identificadas como M-1, M-2, M-3 y M-4 (ver figuras 51 y 52), de las cuales la Muestra M-1 se obtuvo a 20 cm de profundidad con respecto al nivel superficial de agua, la muestra M-2 se a 15 cm, la muestra M-3 a 10 cm y la muestra M-4 a 5 cm, respectivamente.

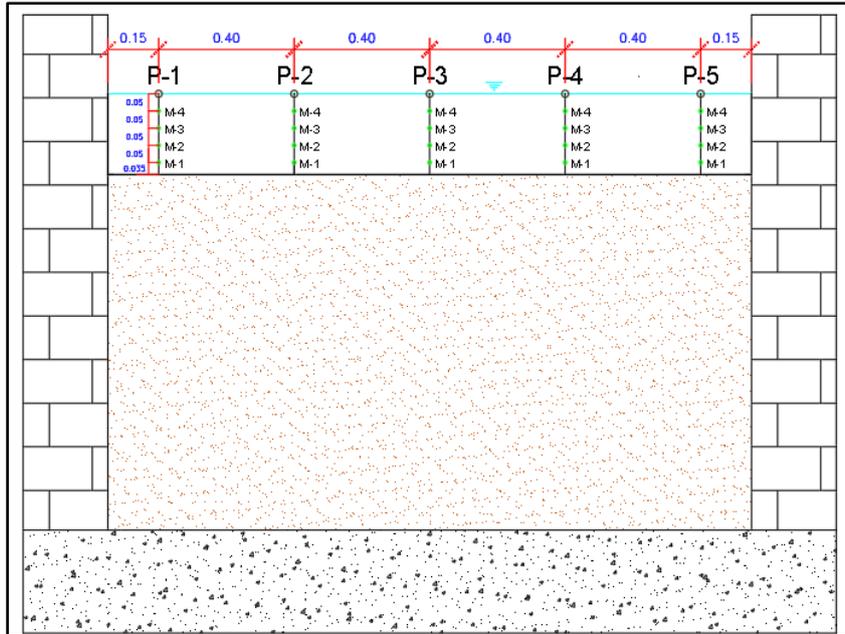


Figura 51: Ubicación de las muestras (M-1, M-2, M-3 y M-4) en cada punto de las secciones transversales S-1, S-2, S-8, S-14 y S-15.

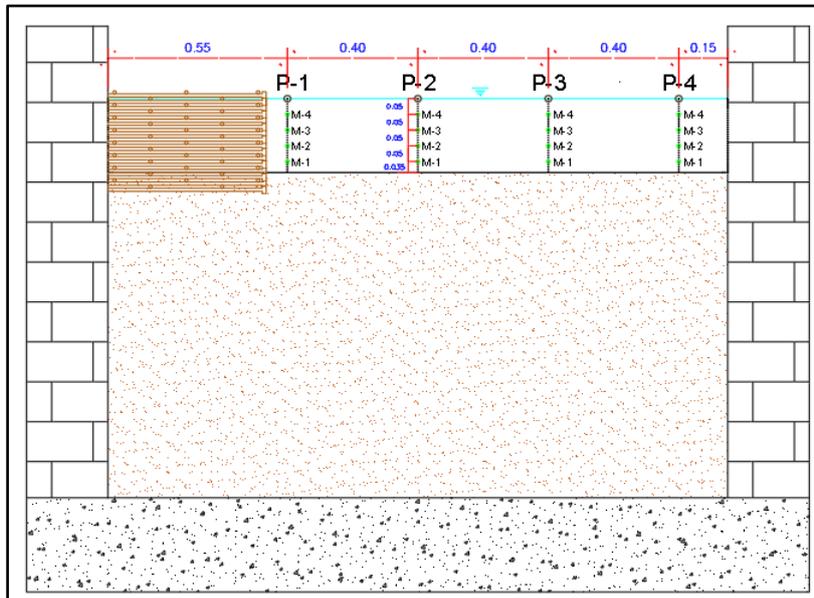


Figura 52: Ubicación de las muestras (M-1, M-2, M-3 y M-4) en cada punto de las secciones transversales S-5 y S-11, ubicadas en el eje de los espigones E-2 y E-3.

A continuación, se muestran las gráficas de concentraciones de sedimentos en suspensión (en mg/l) en el eje de las ordenadas y la distancia a la que se obtuvo la muestra, a partir de la margen derecha del canal experimental (en m), en el eje de las abscisas, para cada una de las secciones anteriormente mencionadas y para cada uno de los ensayos realizados.

Concentración de sedimentos en suspensión para el ensayo de 26% de permeabilidad

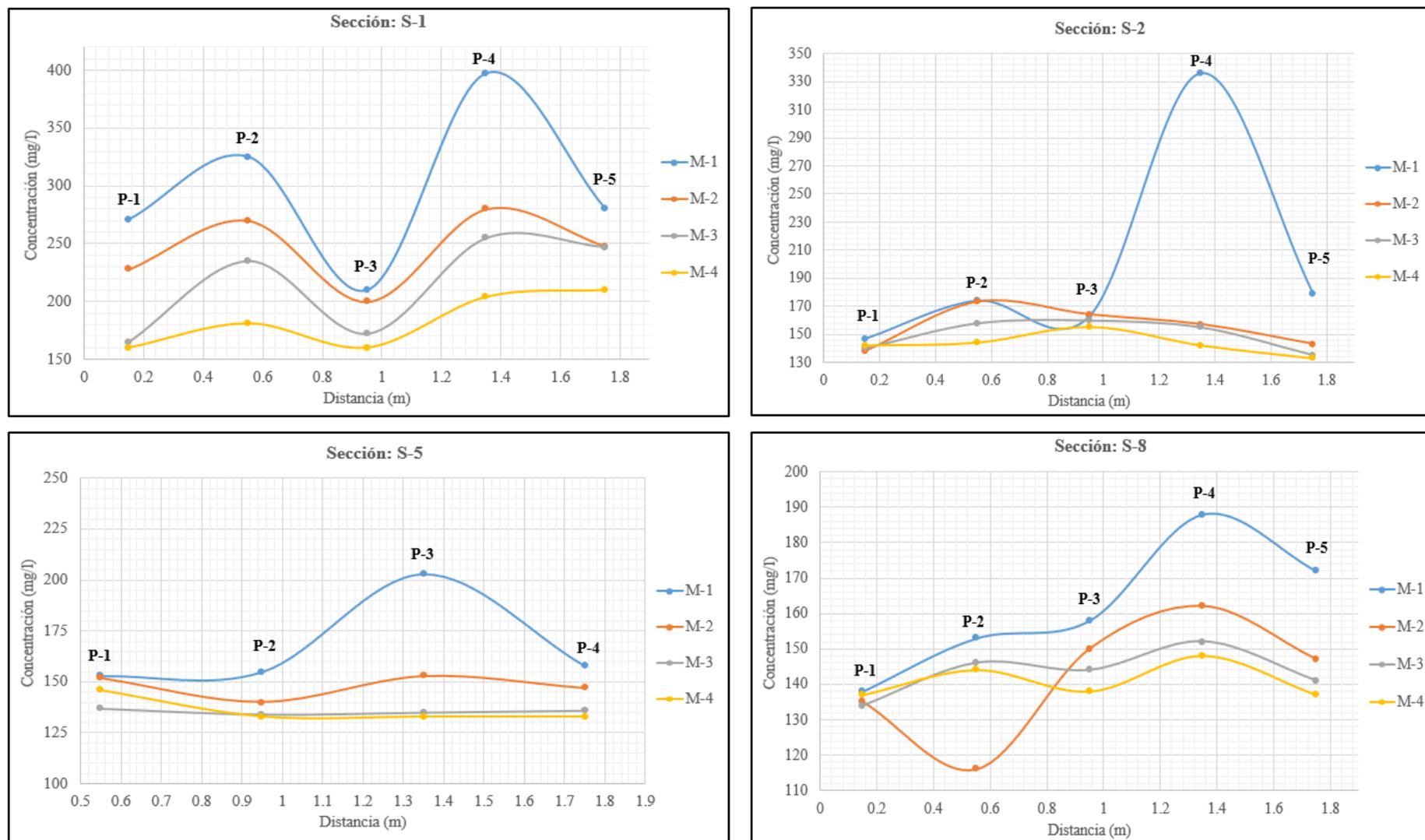


Figura 53: Concentración de sedimentos en suspensión en las secciones S-1, S-2, S-5 y S-8, para el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad.

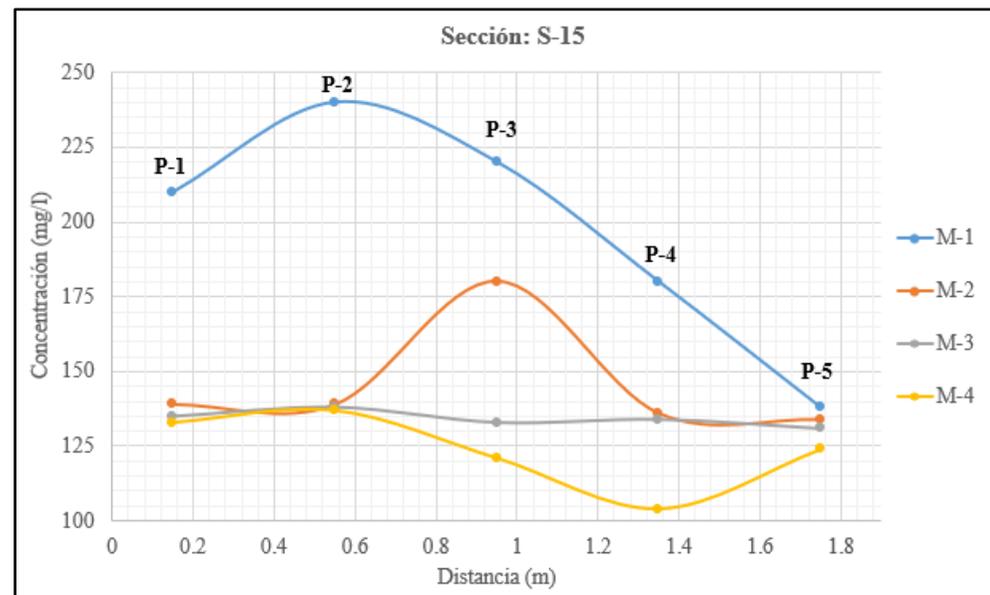
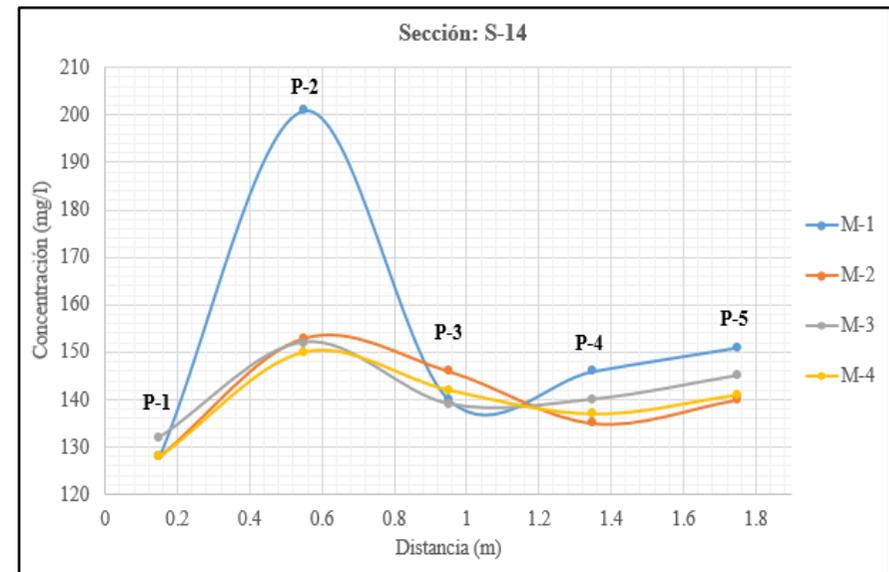
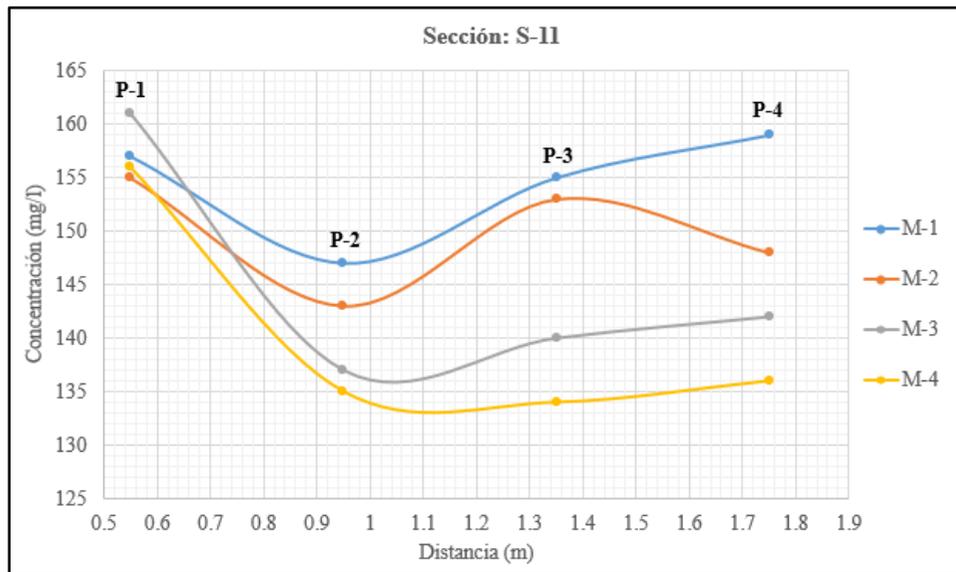


Figura 54: Concentración de sedimentos en suspensión en las secciones S-11, S-14 y S-15, para el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad.

Concentración de sedimentos en suspensión para el ensayo de 46% de permeabilidad

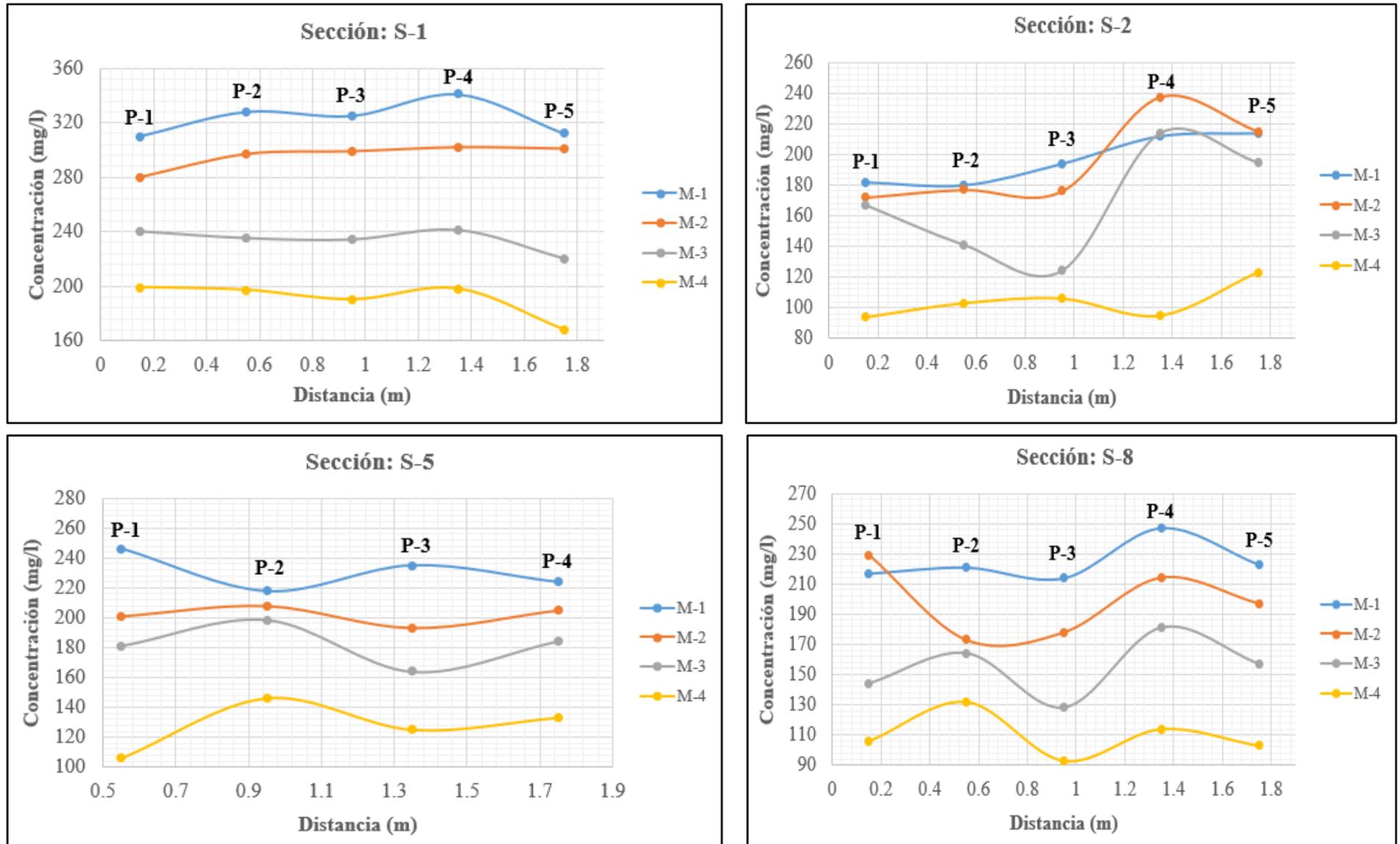


Figura 55: Concentración de sedimentos en suspensión en las secciones S-1, S-2, S-5 y S-8, para el ensayo con estructuras de 46% de permeabilidad.

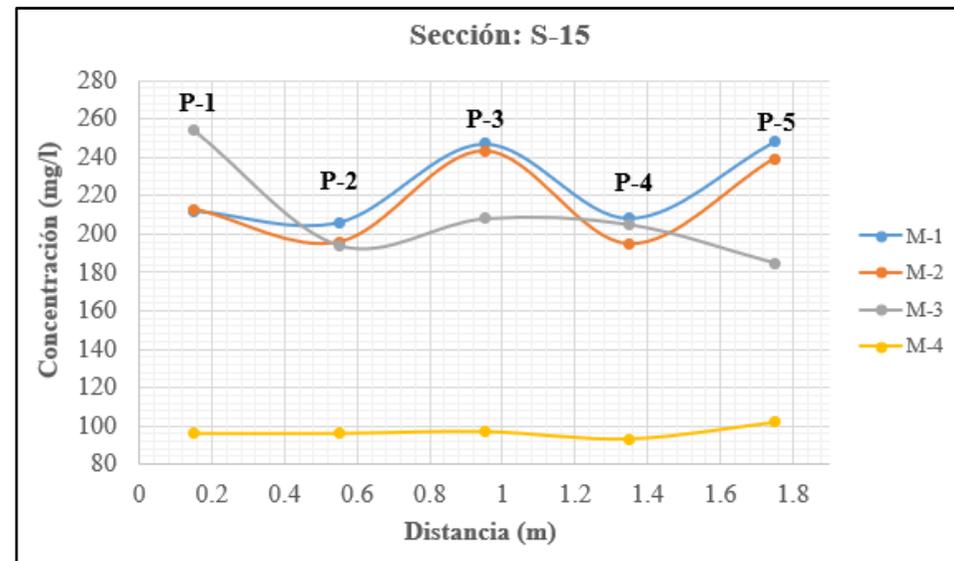
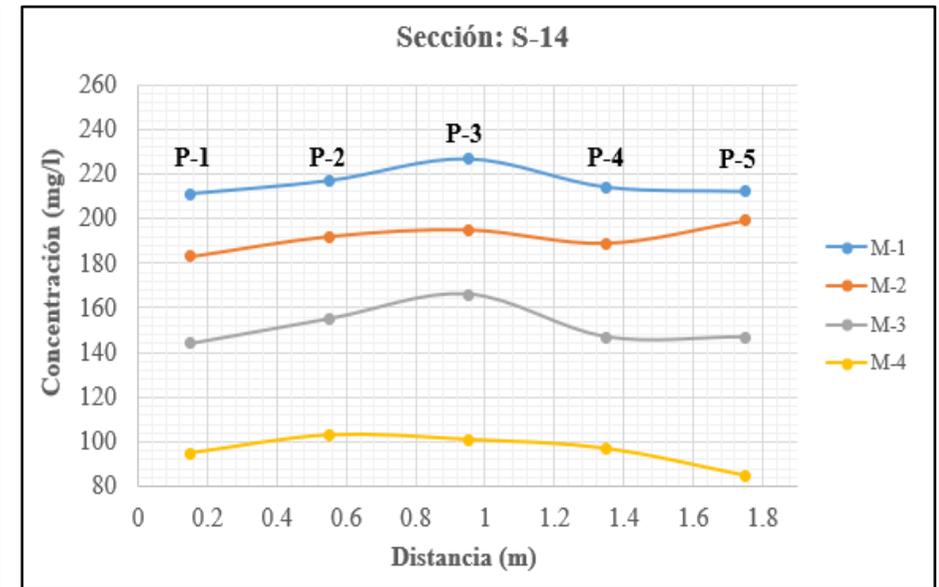
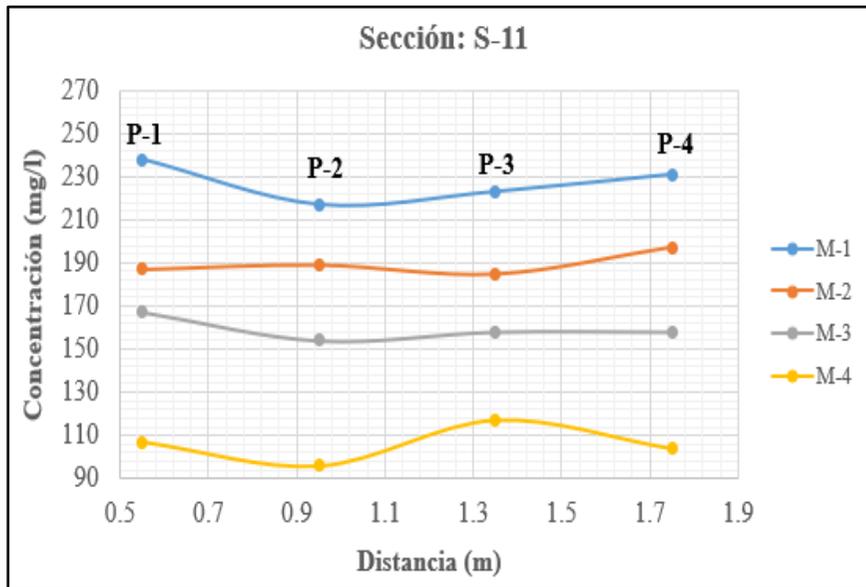


Figura 56: Concentración de sedimentos en suspensión en las secciones S-11, S-14 y S-15, para el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad.

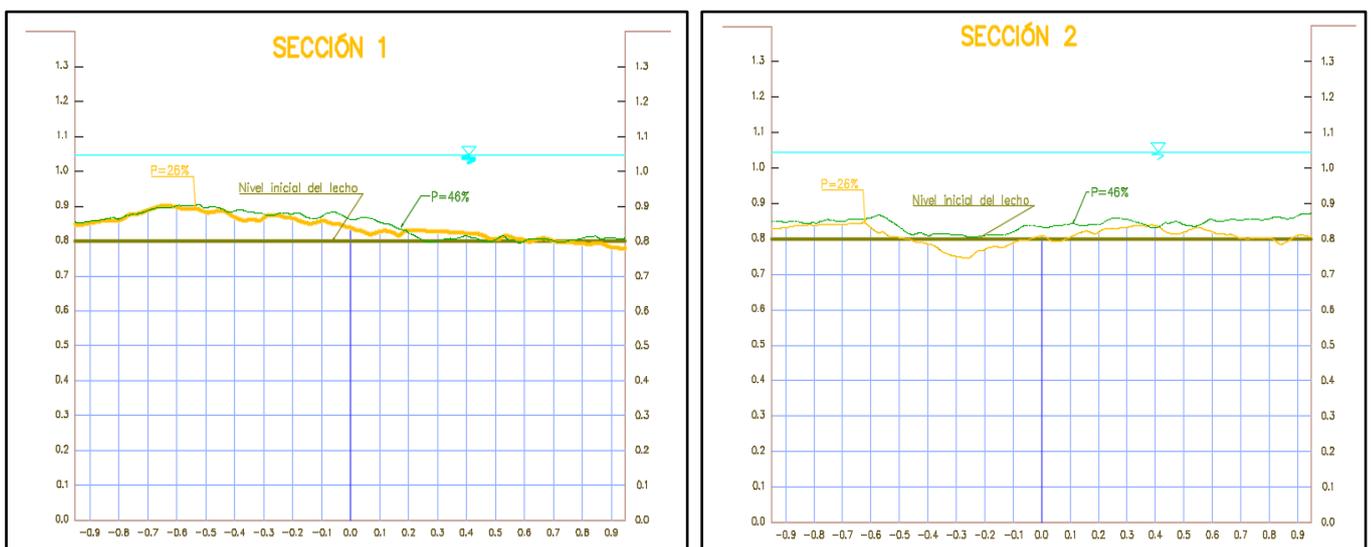
En las figuras anteriores se aprecia la concentración de sedimentos en suspensión para cada uno de los puntos de muestreo y para cada una de las secciones transversales elegidas durante la etapa experimental, donde se puede apreciar que la concentración de sedimentos en suspensión es mayor cerca al fondo del canal experimental, disminuyendo al acercarse a la superficie.

Por otro lado, en cuanto la velocidad de la corriente disminuye por debajo del punto necesario para mantener en suspensión, comienza a depositar su carga suspendida, el cual se da en forma selectiva. Por este motivo, aguas arriba se asientan los materiales más gruesos; después, a medida que la velocidad (y en consecuencia la energía) continúa debilitándose, se van asentando materiales cada vez más finos.

c) CAMBIOS EN LOS NIVELES DEL LECHO

Para analizar los cambios producidos en el fondo del canal experimental, después de cada ensayo realizado se ha procedido a escanear el lecho, usando un escáner láser 3D, el mismo que genera un punto cada milímetro. Este trabajo estuvo a cargo de la empresa INCADService.

Con la información obtenida se ha procedido a generar cortes transversales en diversas secciones del canal experimental para cada uno de los ensayos realizados utilizando el software libre PARAVIEW. Una vez generada la información, se ha procedido a hacer una comparación entre el nivel inicial y el nivel final del fondo, para cada uno de los ensayos realizados, determinando las zonas de erosión y deposición. Los cortes transversales se han generado en algunas de las secciones en las que se realizó la medición de velocidades (ver plano 01).



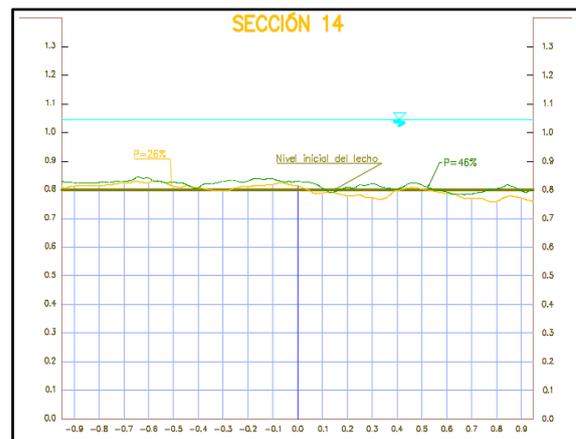
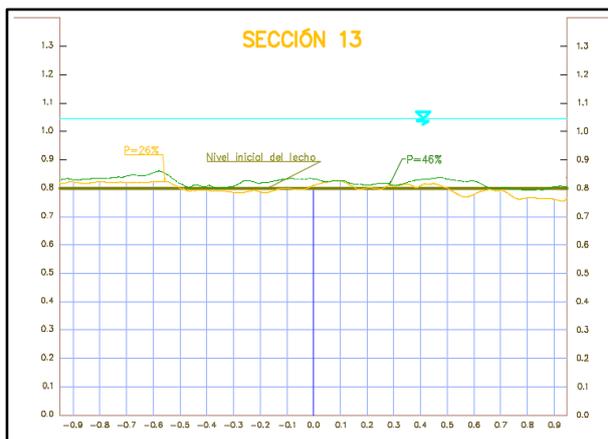
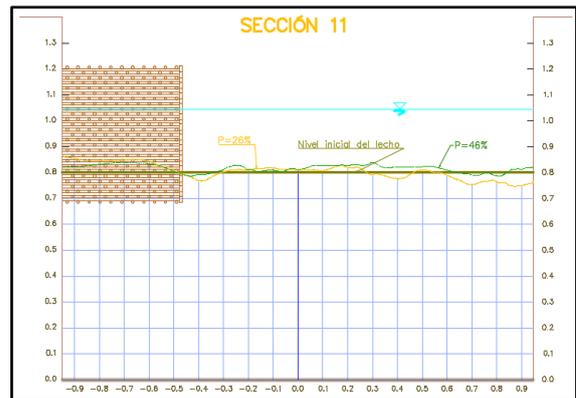
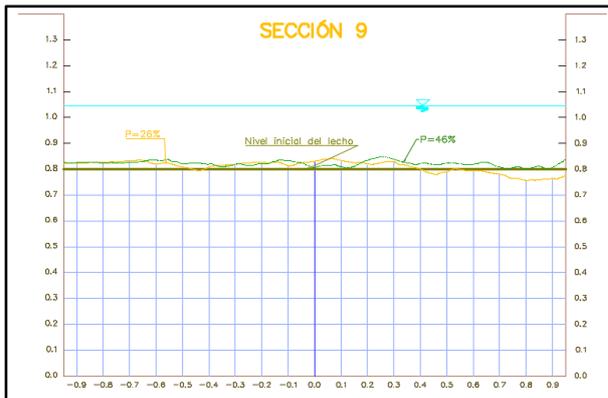
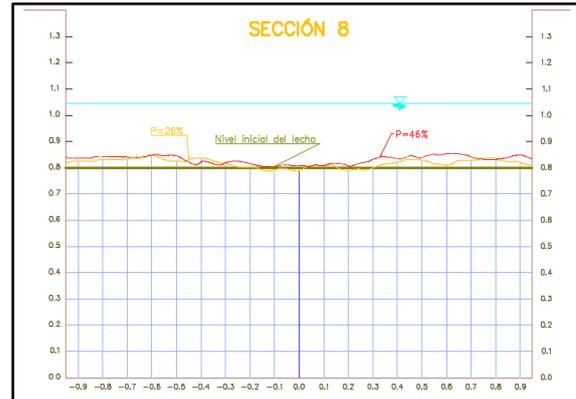
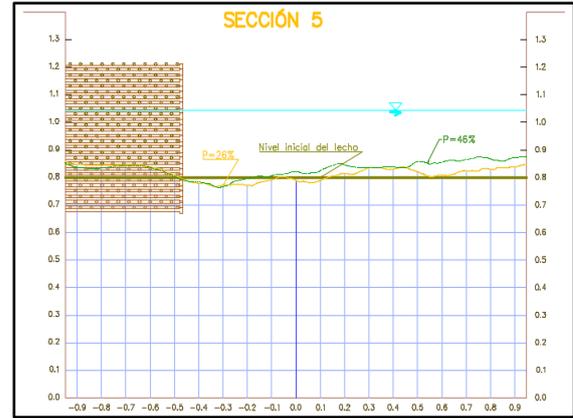
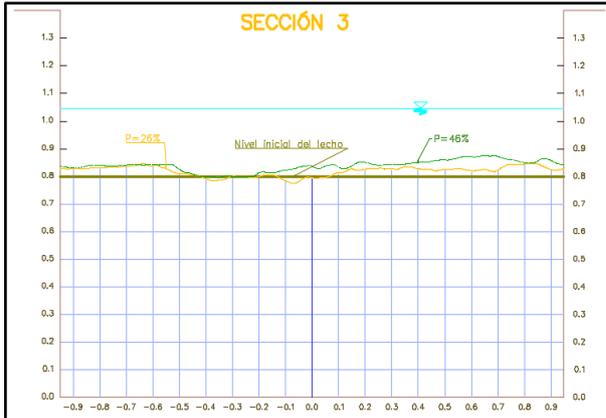




Figura 57: Cortes transversales en las secciones: S-1, S-2, S-3, S-5, S-7, S-8, S-9, S-11, S-13, S-14 y S-15.

Como se aprecia en las figuras anteriormente mostradas, existe mayor deposición de partículas transportadas en suspensión cuando la permeabilidad de las estructuras es de 46%, ocurriendo lo contrario cuando la permeabilidad de las estructuras es de 26%, esto debido a que cuando existe una mayor interferencia en el flujo, producido por algún obstáculo, como es el caso de los espigones, la turbulencia del flujo aumenta considerablemente interfiriendo así en la velocidad de caída de las partículas.

Por otro lado, cuando la permeabilidad de la estructura es de 46%, el flujo tiende a ser laminar, existiendo zonas de bajas velocidades, las mismas que se encuentran ubicadas en el campo de espigones, con lo cual la deposición aumenta considerablemente.

d) ALTURAS SEDIMENTADAS

Las alturas de sedimentación en cada uno de los ensayos experimentales, se presenta mediante el ploteo de la altura de sedimentación (H_s) en el eje de las ordenadas y la distancia con respecto a la margen derecha, en metros, en el eje de las abscisas. Esta información se registró en la sección S-8 únicamente, ya que se priorizó el análisis entre los espigones 2 y 3.

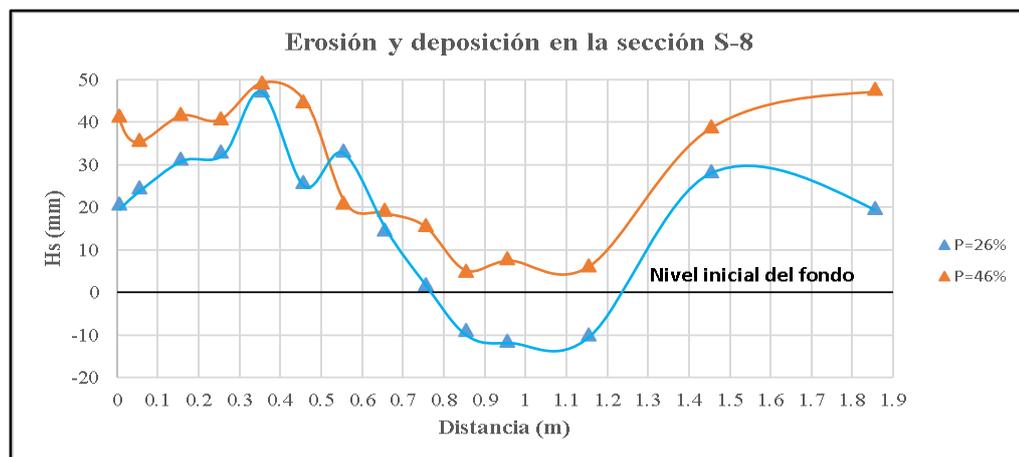


Figura 58: Erosión y deposición en todo el ancho del canal experimental, para cada uno de los ensayos realizados.

Como se aprecia en la figura 58, cuando la permeabilidad de las estructuras es de 46%, existe una mayor deposición de partículas en la sección S-8, la misma que se encuentra entre los espigones E-2 y E-3 (Ver plano N°01).

Por otro lado, cuando la permeabilidad de las estructuras es 26%, existe una zona de erosión de 10.8 mm, con respecto al nivel inicial del fondo, debido a que cuando la permeabilidad de las estructuras es menor, las corrientes de velocidad del flujo son desviadas a la cabeza de la estructura, generando por consiguiente erosión en el canal principal, lo cual compromete considerablemente la estabilidad de la estructura a lo largo del tiempo. Para analizar las alturas de deposición a lo largo del tiempo, se muestra la siguiente figura:

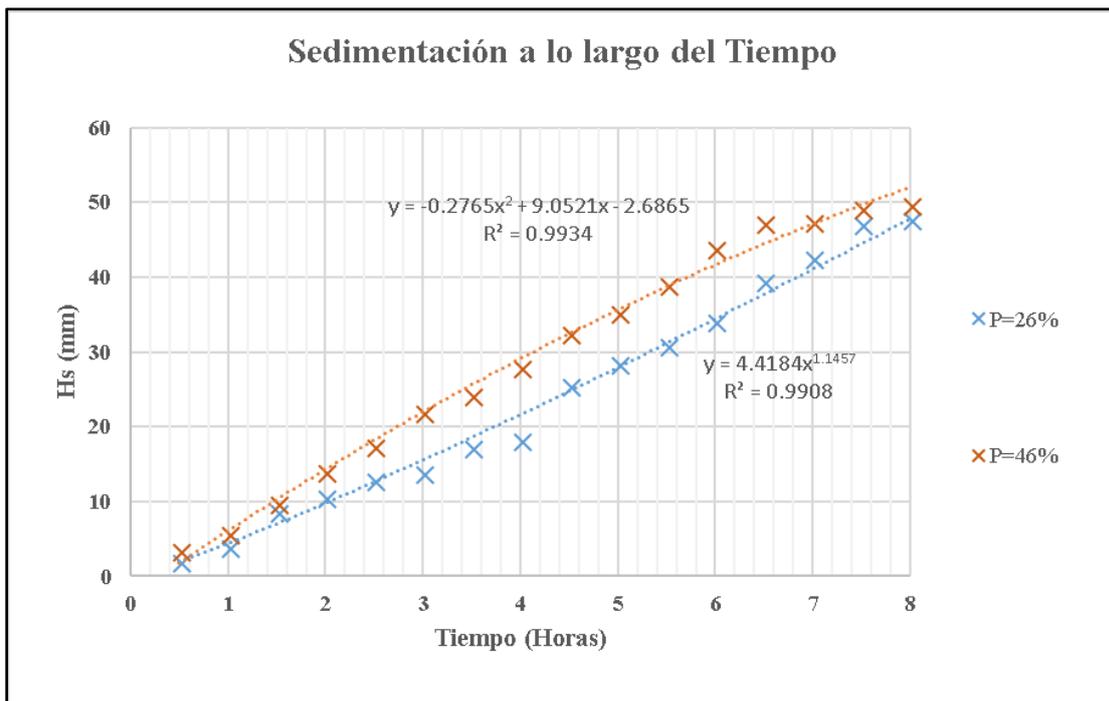


Figura 59: Alturas de sedimentación a lo largo del tiempo para cada uno de los ensayos realizados, a 35 cm de la margen derecha, en la sección S-8.

En la figura 59, se muestra la variación de las alturas de sedimentación a lo largo del tiempo en el punto P-4, ubicado a 35 cm de la margen derecha de la sección S-8, es decir entre los espigones E-2 y E-3. Las alturas de sedimentación varían potencialmente a lo largo del tiempo, siendo menores cuando la permeabilidad de las estructuras es de 26%.

e) FORMAS DE FONDO

Las formas de fondo en los lechos arenosos, como es el caso de la presente investigación tienen una influencia importante en la rugosidad del canal, motivo por el cual, en el presente apartado nos centramos en determinar el tipo de formas de fondo que existieron durante la etapa experimental, utilizando la clasificación de Liu propuesta en el año 1957, el cual está en función del parámetro de suspensión ($\frac{V_*}{w_s}$) y el índice de inestabilidad ($\frac{V_* d}{\nu}$) y contrastando con fotografías tomadas después de cada ensayo experimental realizado.

Los cálculos realizados en la etapa anterior muestran que el valor del parámetro de suspensión es igual a 1.335 y el índice de inestabilidad igual a 7.9.

Ingresando con estos valores en la gráfica de la figura 13, se concluye que las formas de fondo que predominaron en los ensayos experimentales fueron las dunas.

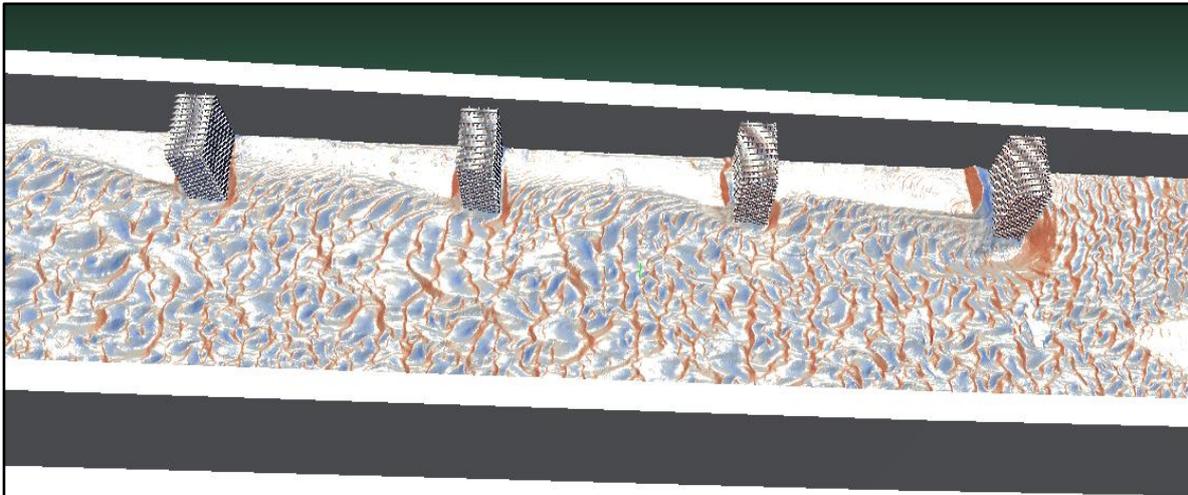


Figura 60: Visualización de las dunas en el canal experimental

f) ESTIMACIÓN DEL TRANSPORTE SÓLIDO EN SUSPENSIÓN

El transporte sólido en suspensión se ha estimado en las secciones S-1 ($Q_{S_{ENTRADA}}$), así como también en la sección S-15 ($Q_{S_{SALIDA}}$). Estos valores permitirán posteriormente estimar la eficiencia de retención de sedimentos, usando la ecuación 64.

Para estimar el transporte sólido en suspensión, las variables de interés necesarias son los perfiles de velocidad del flujo en la sección a evaluar, así como también los perfiles de concentración de sedimentos en suspensión para cada una de ellas.

A continuación, se muestra la estimación del transporte sólido en suspensión en las secciones S-1 y S-15, para cada uno de los ensayos realizados.

Ensayo: Permeabilidad 26%

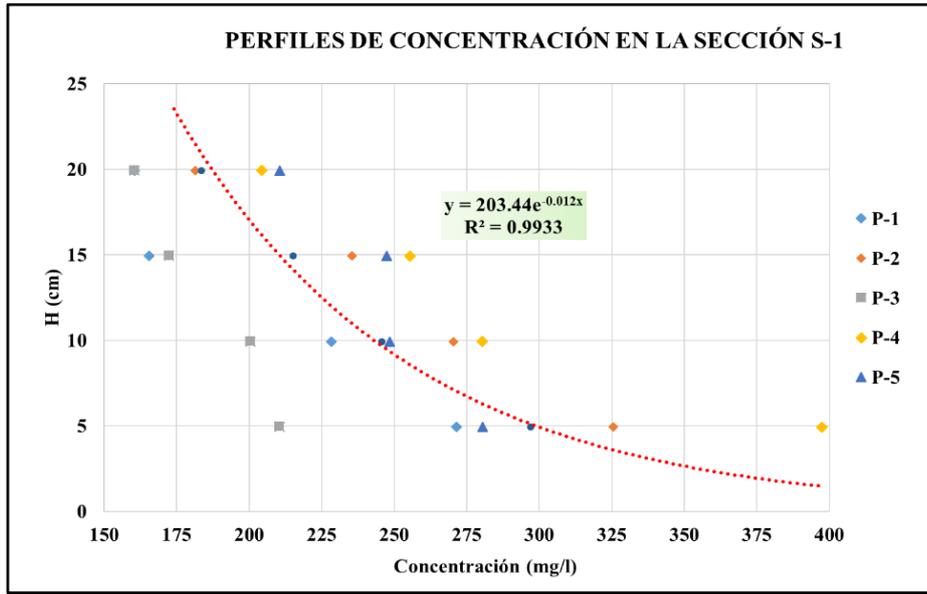


Figura 61: Perfiles de concentración de sedimentos en suspensión en la sección S-1, para el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad.

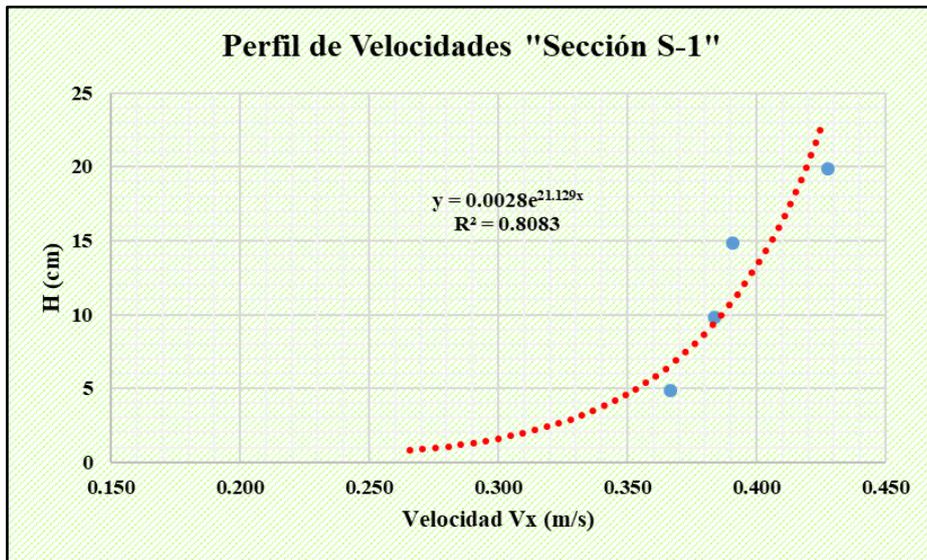


Figura 62: Perfil de velocidades en la sección S-1, para el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad

Tabla 10: Cálculo del caudal sólido en suspensión en la sección S-1, para en el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad.

Profundidad	C (mg/lt)	U (m/s)	d _h (m)	q _s (kg/s/m)
5	308.814118	0.349	0.075	0.0081
10	251.065453	0.385	0.05	0.0048
15	217.275359	0.405	0.05	0.0044
20	193.299228	0.419	0.0577	0.0047
SUMA				0.0220

Aplicando la ecuación 66, se obtiene que en la sección inicial (S-1) se tiene un caudal sólido en suspensión de 2.51 kg/min.

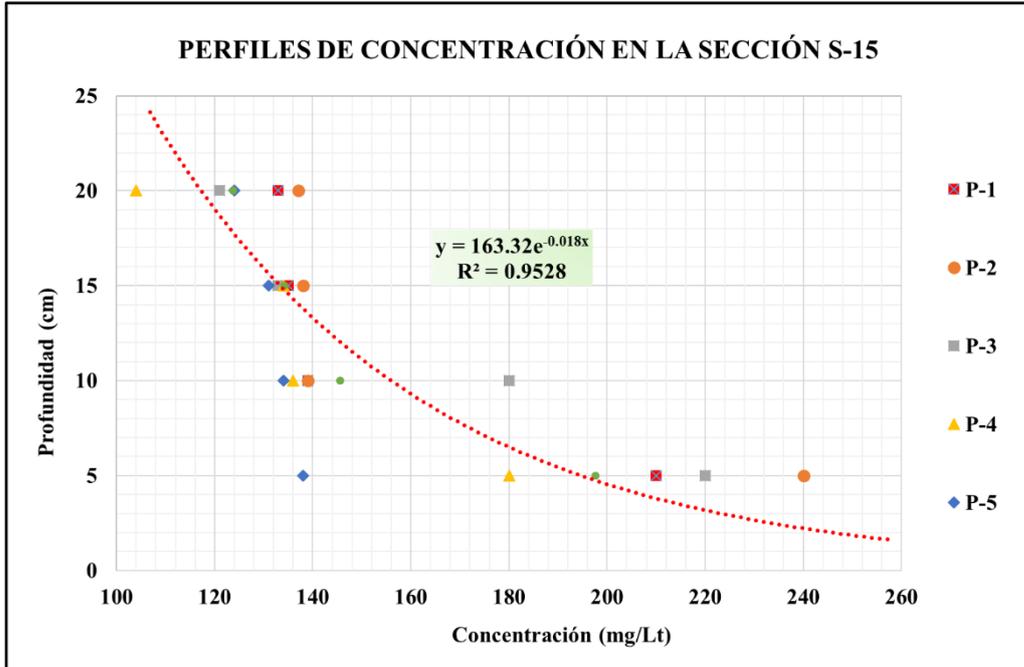


Figura 63: Perfiles de concentración de sedimentos en suspensión en la sección S-15, Para el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad

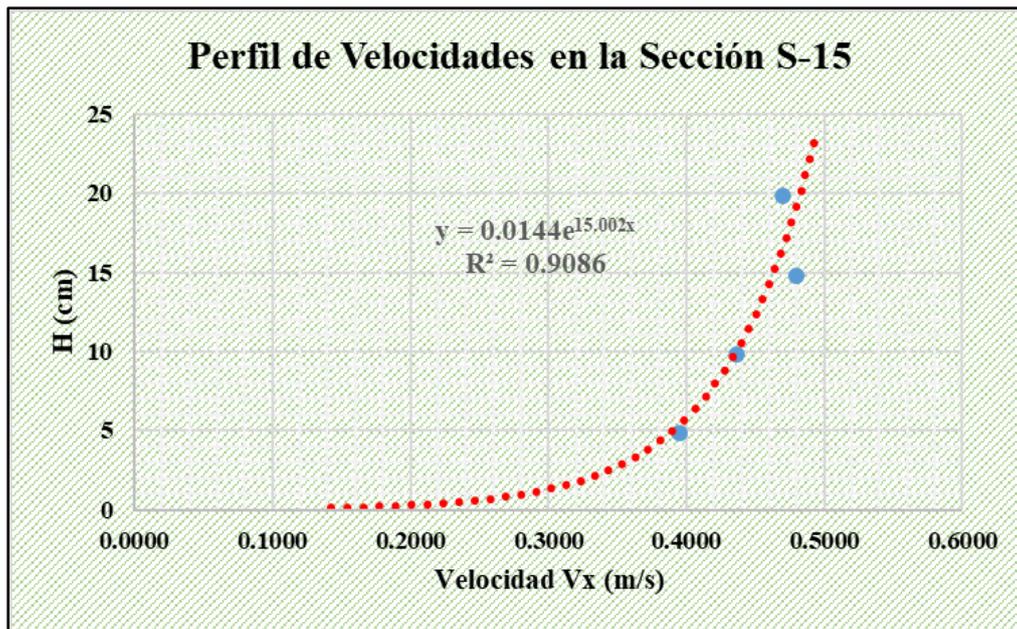


Figura 64: Perfil de velocidades en la sección S-15, para el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad

Tabla 11: Cálculo del caudal sólido en suspensión en la sección S-15, para en el ensayo con estructuras de 26% de permeabilidad.

Profundidad	C (mg/lit)	U (m/s)	d _h (m)	q _s (kg/s/m)
5	193.681823	0.383	0.075	0.0056
10	155.173198	0.433	0.05	0.0034
15	132.64793	0.461	0.05	0.0031
20	116.664336	0.481	0.0577	0.0032
SUMA				0.0152

En la sección S-15, se ha registrado un caudal sólido en suspensión de 1.73 kg/min.

Con la información anteriormente obtenida se determinó que, cuando los espigones permeables de madera presentan una permeabilidad de 26%, en el canal experimental quedaron retenidos 0.78 kg/min de sedimentos que inicialmente se transportaban en suspensión, lo cual representa un total de 374.4 kg de sedimentos retenidos durante el presente ensayo.

Ensayo: Permeabilidad 46%

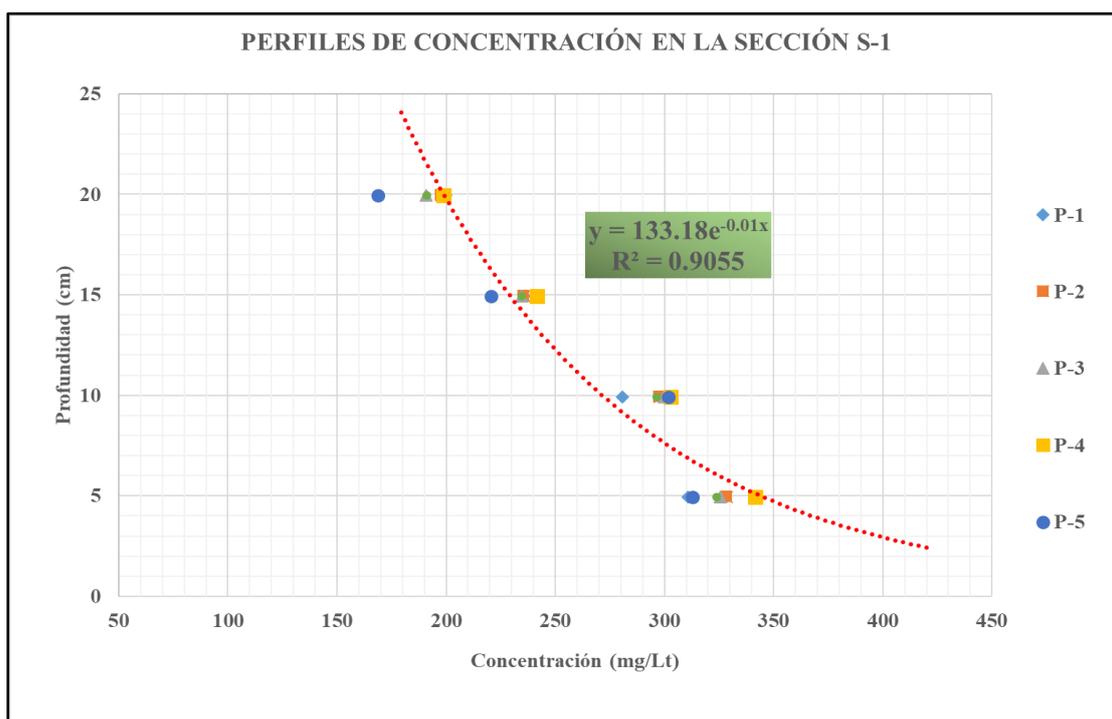


Figura 65: Perfiles de concentración de sedimentos en suspensión en la sección S-1, para el ensayo con estructuras de 46% de permeabilidad.

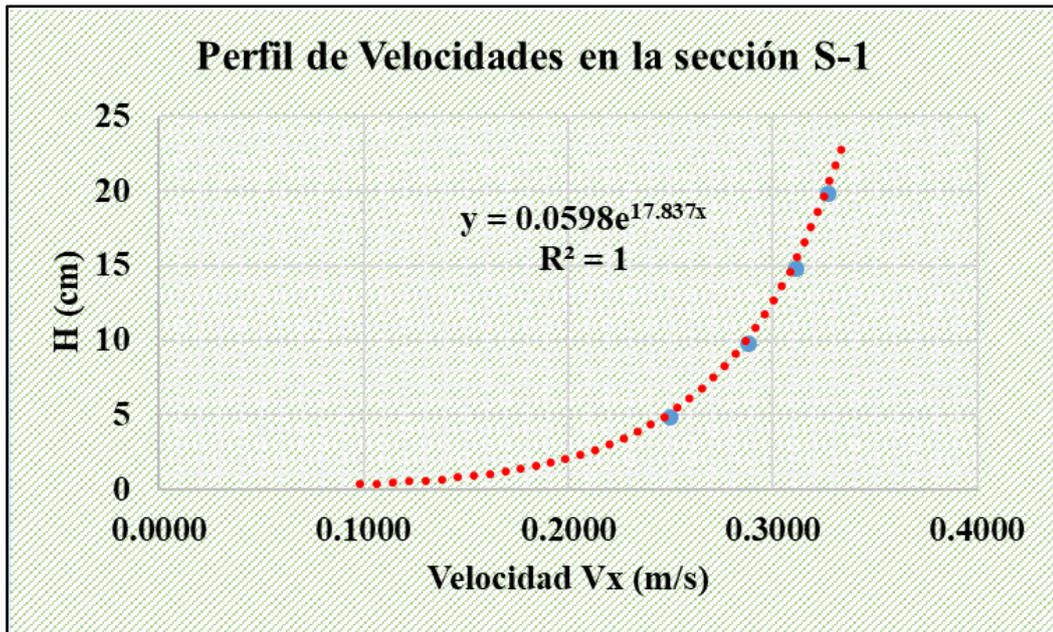


Figura 66: Perfil de velocidades en la sección S-1, para el ensayo con estructuras de 46% de permeabilidad.

Tabla 12: Cálculo del caudal sólido en suspensión en la sección S-1, para en el ensayo con estructuras de 46% de permeabilidad.

Profundidad	C (mg/lt)	U (m/s)	d_h (m)	q_s(kg/s/m)
5	328.226216	0.24814684	0.075	0.0061
10	258.911451	0.28700744	0.05	0.0037
15	218.363105	0.30973836	0.05	0.0034
20	189.596915	0.32586667	0.0577	0.0036
SUMA				0.0168

En la sección S-1, se ha determinado un caudal sólido de 1.92 kg/min transportado en suspensión, distribuido a lo largo del canal experimental de 1.9 m de ancho.

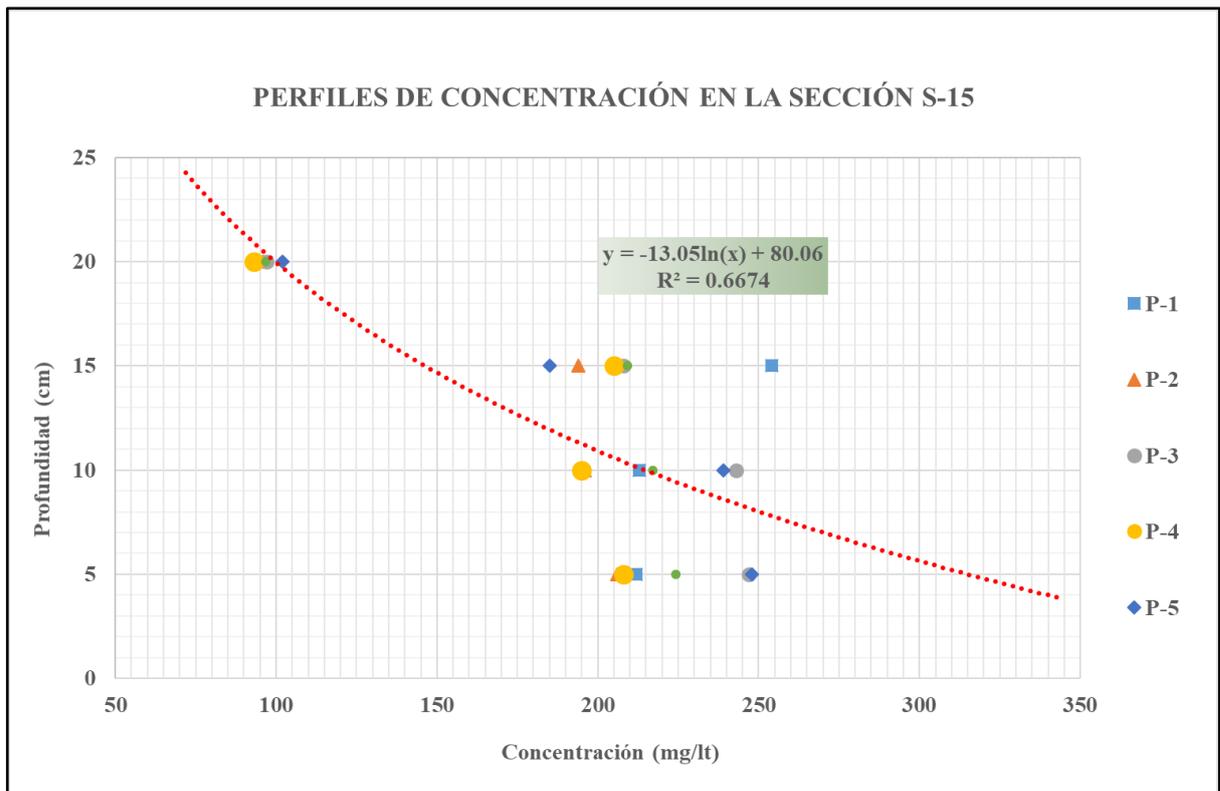


Figura 67: Perfiles de concentración de sedimentos en suspensión en la sección S-15, para el ensayo con estructuras de 46% de permeabilidad

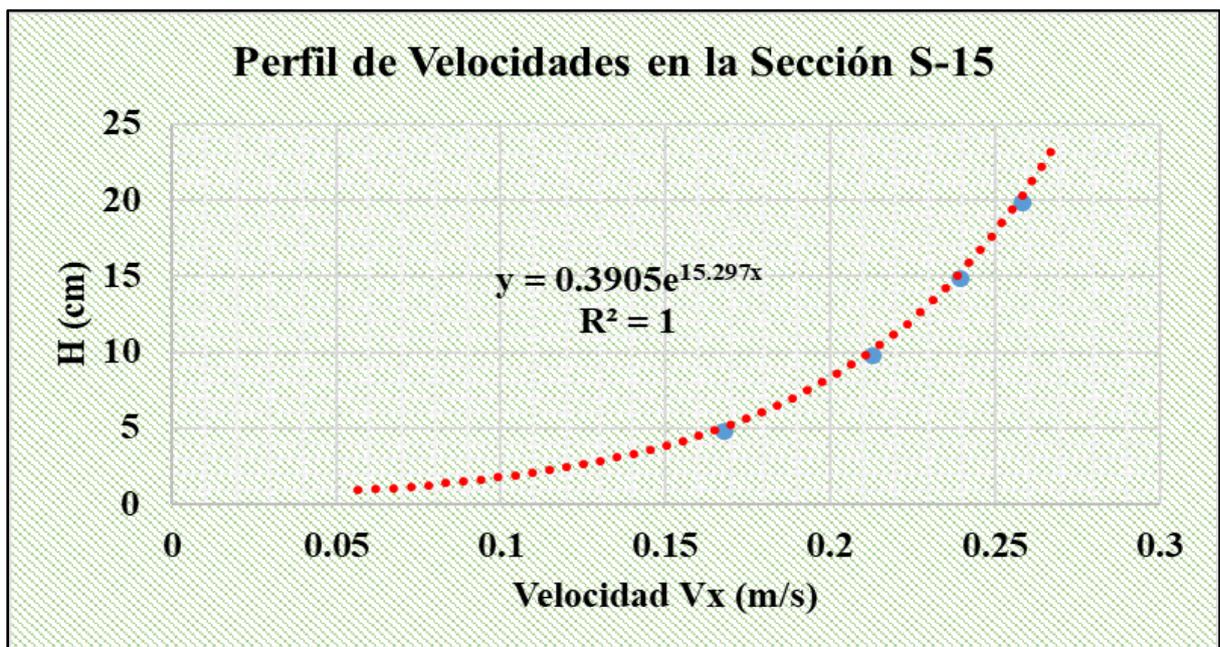


Figura 68: Perfil de velocidades en la sección S-15, para el ensayo con estructuras de 46% de permeabilidad

Tabla 13: Cálculo del caudal sólido en suspensión en la sección S-15, para en el ensayo con estructuras de 46% de permeabilidad.

Profundidad	C (mg/lt)	U (m/s)	d _h (m)	q _s (kg/s/m)
5	314.718106	0.16668488	0.075	0.0039
10	214.55818	0.21199676	0.05	0.0023
15	146.267969	0.23850285	0.05	0.0017
20	99.7123597	0.25730926	0.0577	0.0015
SUMA				0.0094

En la sección S-15, se ha registrado un caudal sólido transportado en suspensión de 1.07 kg/min.

Con la información obtenida se determinó que, cuando los espigones permeables de madera presentan una permeabilidad de 46%, en el canal experimental se retiene 0.85 kg/min de sedimentos que inicialmente se transportaban en suspensión, lo cual representa un total de 408 kg de sedimentos retenidos durante el presente ensayo.

g) ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS

Con la información anteriormente obtenida, y aplicando la ecuación 64, se logró determinar la eficiencia de retención de sedimentos, como se indica a continuación:

Ensayo: Permeabilidad 26%

$$Q_{S\text{ENTRADA}} = 2.51 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

$$Q_{S\text{SALIDA}} = 1.73 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 64, se tiene:

$$E(\%) = 31.08\%$$

Ensayo: Permeabilidad 46%

$$Q_{S\text{ENTRADA}} = 1.92 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

$$Q_{S\text{SALIDA}} = 1.07 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 64, se tiene:

$$E(\%) = 44.27\%$$

h) VARIACIÓN EN LOS NIVELES DEL AGUA

La variación en los niveles del agua se registró haciendo uso del mismo equipo utilizado para la medición de velocidades del flujo (Vectrino Profiler), las mediciones se realizaron cada hora, por un periodo de seis horas consecutivas, a partir de la segunda hora de iniciado el ensayo, en cada uno de los ensayos realizados.

Los datos obtenidos se plotearon teniendo como referencia el nivel inicial del lecho, los resultados muestran que no existió una drástica variación de los niveles de agua en cada uno de los ensayos experimentales realizados, existiendo una sobreelevación promedio máxima registrada de 3.5 mm, debido a la obstrucción del flujo por los espigones; a la vez, existió una depresión máxima promedio registrada de 2.1 mm, en el canal principal. La línea de tendencia tiene un comportamiento lineal, con un R^2 muy próximo a 1.

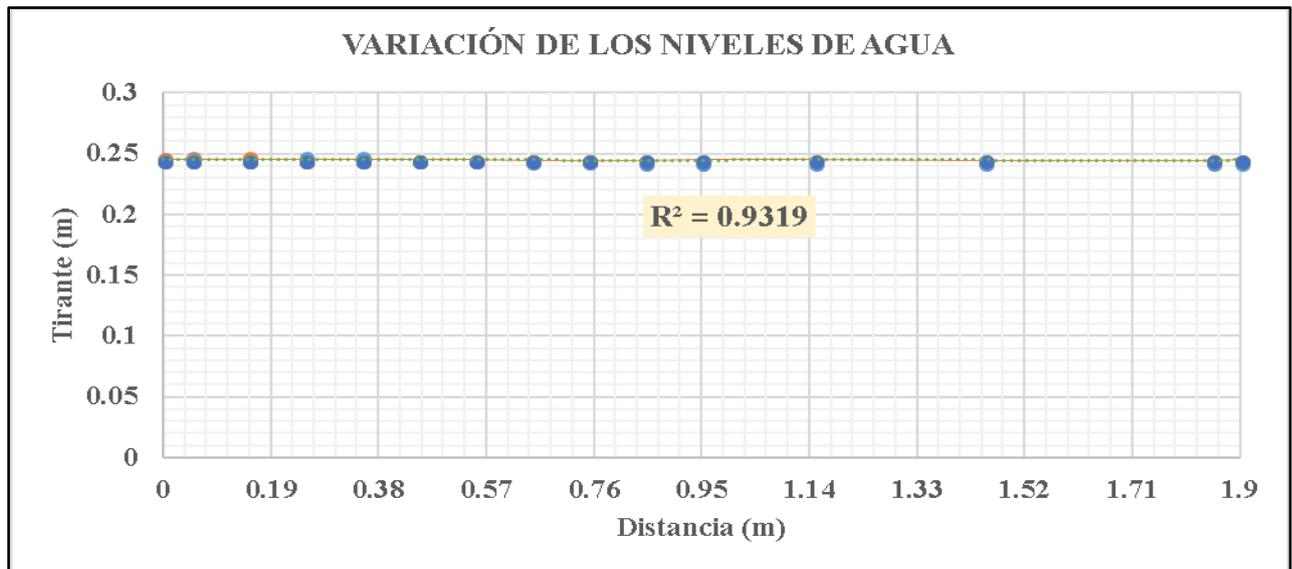


Figura 69: Variación promedio de los tirantes del agua en el canal experimental, para los ensayos con estructuras de 26% y 46%.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Durante la etapa experimental, con la finalidad de garantizar el transporte de sedimentos tanto en el fondo como en suspensión, fue necesario mantener un $Fr=0.22$.
- El D_{50} del material del fondo, como en suspensión, que permitieron garantizar el transporte sólido, tanto en el fondo como en suspensión, fueron 0.204 mm y 0.175 mm, respectivamente.
- Se estimó la eficiencia de retención de sedimentos, manteniendo la relación $L/B=0.25$ y $E/L=4.21$; así como también, un ángulo de orientación con respecto al flujo de 90° .
- Para las estructuras con 26% de permeabilidad, la velocidad del flujo en la punta de la estructura aumentó considerablemente, aumentando por consiguiente la erosión al pie del espigón, lo cual comprometió su estabilidad. Por otro lado, los vectores de velocidad en el campo de espigones para ambos ensayos experimentales, no presentaron una variación significativa.
- Para las estructuras con 26% de permeabilidad, existió una excesiva carga de sedimentos en suspensión en el canal principal, producto de las elevadas velocidades y la vorticidad generada en la punta de las estructuras. Por otro lado, cuando la permeabilidad de las estructuras fue de 46%, no existió una variación drástica en las concentraciones de sedimentos en suspensión a lo largo de las secciones transversales.
- Los espigones de madera con 46% de permeabilidad, presentaron mayor eficiencia de retención de sedimentos, en comparación a las de 26% de permeabilidad. Según lo calculado, las estructuras con 46% de permeabilidad, presentaron una eficiencia de 42.27%. Mientras que las de 26% de permeabilidad, presentaron una eficiencia de 31.08%. Estos resultados se contrastan con las alturas de sedimentación registradas y los cambios en los niveles del lecho obtenidos en cada una de las secciones transversales del canal experimental.

5.2.RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar este trabajo de investigación realizando una mayor cantidad de ensayos experimentales, variando la permeabilidad, longitud y ángulo de orientación de la estructura con respecto al flujo, a fin de obtener una expresión matemática para estimar la eficiencia de retención de sedimentos de los espigones permeables de madera, considerando mayor cantidad de variables intervinientes en el fenómeno estudiado. Para lo cual, se recomienda el uso del Análisis Dimensional.
- Cuando se trabaja con sedimentos en suspensión, tener un cuidado especial tanto al momento de obtener la muestra, como en la forma de evaporar las muestras obtenidas, ya que al variar en una cantidad pequeña el peso de la muestra, varía enormemente la concentración de sedimentos en suspensión.
- Se debe tener especial cuidado cuando se suministra carga de sedimentos en suspensión a un canal experimental, garantizando una distribución uniforme a lo largo de la sección transversal, a fin de garantizar la carga en suspensión en todo el canal experimental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASCE, (2000). *Hydraulic Modeling: Concepts and Practice*. Virginia: Editorial Copyright. Primera edición. p. 100-136.

ABERLE, J., RENNIE , C., ADMIRAAL, D., & MUSTE , M. (2017). *Experimental Hydraulics: Methods, Instrumentation, Data Processing and Management. Volume II: Instrumentation and Measurement Techniques*. Netherlands: Editorial CRC Press/Balkema.Tercera Edición. p. 50-150.

ARISTA ALARCÓN, R. L. (2004). *Estudio Experimental de Erosión Localizada a la Salida de una Compuerta*. Lima: Editorial UNI.Primer Edición. p.10-128.

BENYUS, J. (2002). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York: Editorial Perennial.Segunda Edición. p.20-138.

BERNHARDT, E. S. (2005). *Sythesizing U.S. River Restoration Efforts*.New York: Editorial Sience. Sexta Edición. p.1-26.

BONNEFILLE, R. (1963). *Essais des synthèse des lois de début d'entraînement des sédiments sous l'action d'un courant en régime continu*. Bulletin du CREC Nr. 5, S. 67-70.

CAO, Y., LIU, P., & JIANG , E. (2013). *The Design and Application of Permeable Groynes*. Pekin: Editorial Li Tian and Hetao Hou. p. 2502-2505.

CASAS, I. G. (2006). *Framed Structures: Composition and Origins*. Madrid: Editorial Revista Electrónica N° 2. Primera Edición. p.50-125.

CHOW, V. T. (1982). *Hidráulica de los canales abiertos*. México: Diana

FUENTES AGUILAR, R. (2002). *Modelos Hidráulicos: Teoría y Diseño*. Santiago de Chile: Editorial Dolmen Estudio.Primer Edición. p.10-120.

GALLISDORFER, M., BENNETT, S., ATKINSON , J., MOHAMMAD GHANEEZAD, S., BROOKS, A., SIMON, A., & LANGENDOEN, E. (2014). *Physical-scale model designs for engineered log jams in rivers*. Journal of Hydro-environment Research. p.115 - 128.

GARCÍA, N. H. (1989). *Ecuaciones fundamentales para flujo unidimensional a superficie libre*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

GHERARDELLI, C. (2007). Mecánica de Fluidos. En C. Gherardelli, *Análisis Dimensional y Semejanza*. Santiago de Chile: Editorial Universidad de Chile. Primera Edición. p. 87-97.

HERRERA ENVIRONMENTAL CONSULTANTS. (2006). *Conceptual Design Guidelines - Application of Engineered Logjams*. USA: Editorial USA.Primer Edición. p.80-125.

- JANSEN, P. (1979). *Principles of River Engineering: The non-tidal alluvial river*. Delft: Editorial Board. Primera Edición. p.102-138.
- JULIEN, P. Y. (2002). *River Mechanics*. New York: Editorial Cambridge University Press. Primera Edición. p.50-79.
- LNH. (2014). *Espigones Fabricados con Troncos de Árboles: Una Alternativa Contra la Erosión en Ríos Meándricos*. Lima: Editorial UNI. p.2-18.
- MAHMOUD MOSTAFA, M., AHMED, H., ABD EL-RAHEEM, G., ALI, N., & TOMINAGA, A. (2012). *Flow analysis around groyne groyne with different permeability in compound channel floodplains*. Qena: Editorial Journal of Engineering Sciences. p. 302-320.
- MARTÍNEZ MARÍN, E. (2001). *Hidráulica Fluvial: Principios y Práctica*. Madrid: Editorial Bellisco. Primera Edición. p.10-25.
- MAZA ÁLVAREZ, J. A., & GARCÍA FLORES, M. (2015). *Estabilización y Rectificación de Ríos*. México DC: Editorial UNAM. Primera Edición. p. 25-87.
- MOHAMED F. M., Y., & HUIB J., D. (2010). *Sediment Exchange between a River and its Groyne Fields: Mobile-Bed Experiment*. Delft. *Journal of Hydraulic Engineering*. p.1-10.
- MOHAMEN, F., & YOSSEF, M. (2002). *The Effect of Groynes on Rivers*. Delft: Delft University of Tecnology. p.25-135.
- MOHAMMAD GHANEEZAD, S., BENNETT, S., GALLISDORFER, M., DONGHUA CAI, ATKINSON, J., ANDREW SIMON, & LANGENDOEN, E. (2015). *Flow, turbulence, and drag associated with engineered log jams in a fixed-bed experimental channel*. Delft: ELSEVIER. p.172 - 184.
- MUSTE, M., LYN, D., ADMIRAAL, D., ETTEMA, R., NIKORA, V., & GARCIA, M. (2017). *Experimental Hydraulics: Methods, Instrumentation, Data Processing and Management. Volume I: Fundamentals and Methods*. Netherlands: Editorial CRC Press/Balkema. Primera Edición. p.14-39.
- PRZEDWOJSKI, B. (1995). *Bed topography and local scour in rivers with banks protected by groynes*. Moscú: Journal of Hydraulic Research. p. 257-273.
- RODRÍGUEZ, R. P. (2008). *Hidráulica II. Hidráulica de canales*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- ROCHA FELICES, A. (1998). *Introducción a la Hidráulica Fluvial*. Lima: Editorial UNI. Primera Edición. p.50-135.
- ROCHA FELICES, A. (2013). *Introducción a la Hidráulica de Obras Viales*. Lima: Editorial ICG. Primera Edición. p.50-138.
- RUPPRECHT, R. (2004). *Modelling of the Morphological Interaction Between a River and its Groyne Fields*. Delft : Editorial Delft University of Tecnology. p.20-145.

SHIELDS, F., & MORIN , N. (2001). *Design of large woody debris structures for channel rehabilitations*. USA: Journal of Hydraulic Engineering.p.1-15.

SOTELO, G. (2009). *Hidráulica de canales*. Facultad de Ingeniería: Universidad Nacional Autónoma de México.

VAN RIJN, L. C. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Amsterdam: Editorial Aqua Publications.Primer Edición.p.50-138.

VENEGAS, E. Z. (2011). *Socavación al pie de estribos de puentes en lechos no cohesivos*. Lima: Editorial UNI. p.20-98.

VILLÓN, B. M. (2007). *Hidráulica de canales*. Lima: Editorial Villón

YALIN, M. S. (1972). *Mechanics of Sediment Transport*. New York: Editorial Pergamon Press.Primer Edición.p.20-148.

Apuntes de clase:

CABRERA CABRERA, J. W. (2016). *Flujo en superficie libre* (Apuntes de clase). Facultad de Ingeniería Civil-Escuela de Posgrado-UNI

ANEXOS

FIGURAS ILUSTRATIVAS DE EQUIPOS Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL



Figura 70: Vista panorámica de los equipos de la Carpintería del Laboratorio Nacional de Hidráulica
“Alfonso Alcedán La Cruz”



Figura 71: Vista panorámica del canal experimental utilizado, después de un ensayo típico

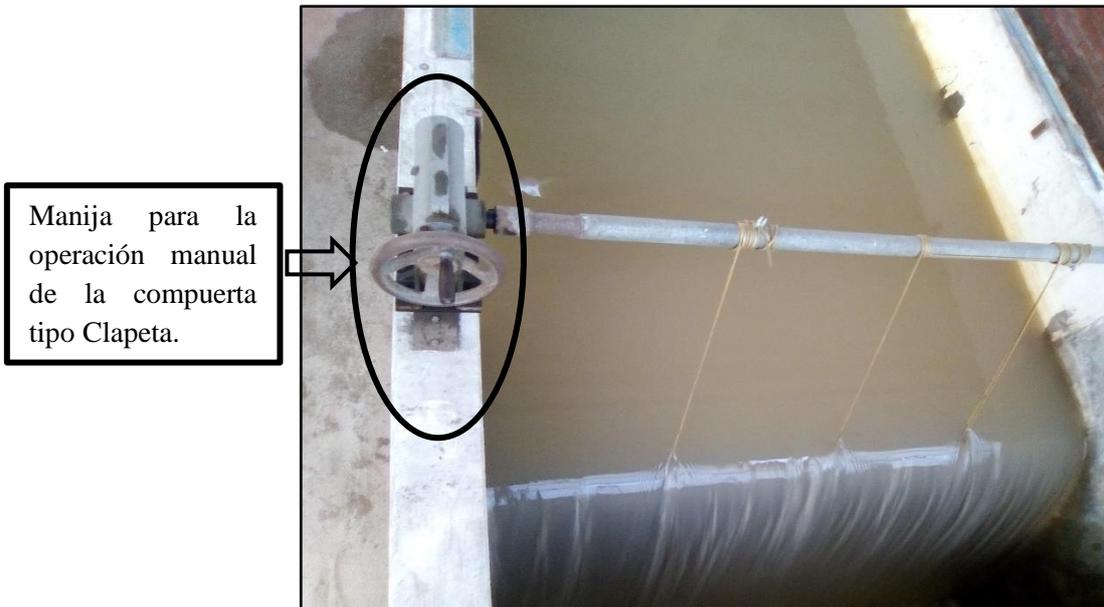


Figura 72: Visualización de la compuerta tipo Clapeta, instalada a la salida del canal experimental para regular los tirantes.



Figura 73: Vista panorámica del tanque elevado, tuberías de alimentación y rebose y válvulas tipo compuerta instaladas en la tubería de alimentación al modelo físico



Figura 74: Vista panorámica de la tubería de alimentación de caudal al modelo experimental

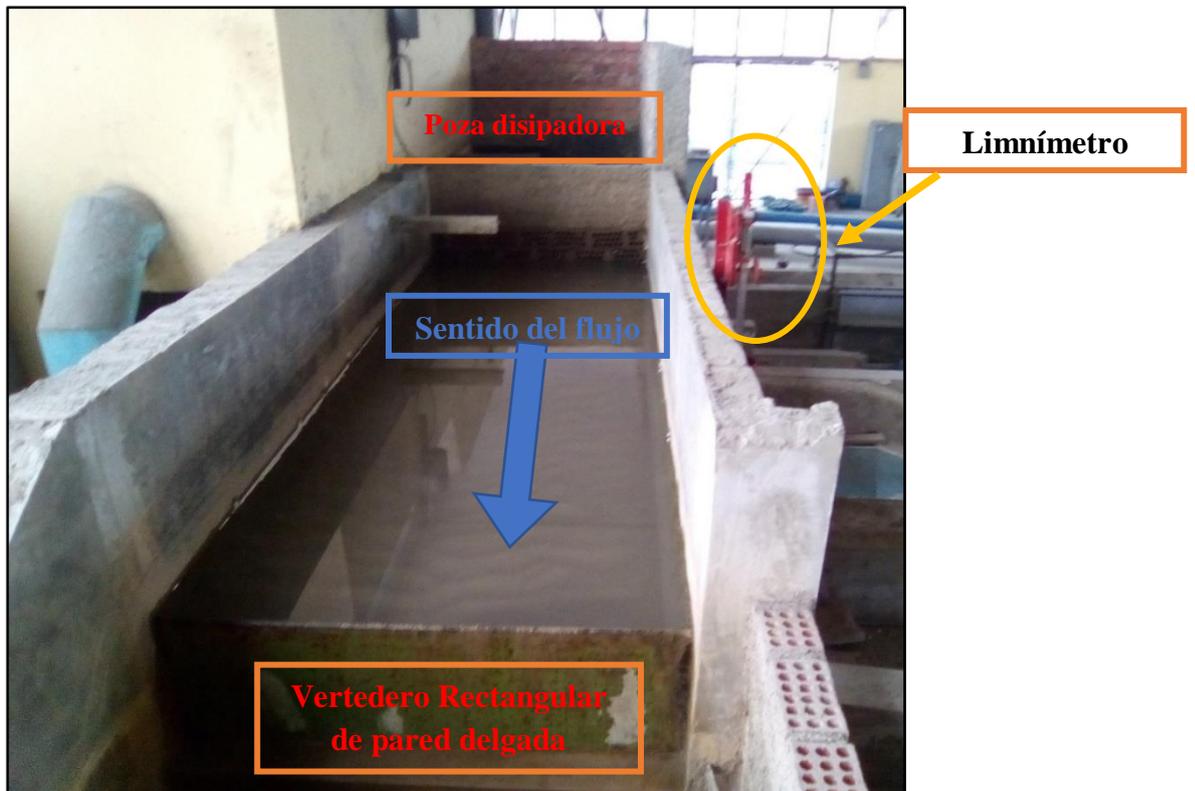


Figura 75: Vista panorámica del Vertedero rectangular de pared delgada



Figura 76: Disipadores de energía de malla tipo gallinero



Figura 77: Funcionamiento de los disipadores de energía en la entrada del canal, durante los ensayos experimentales.

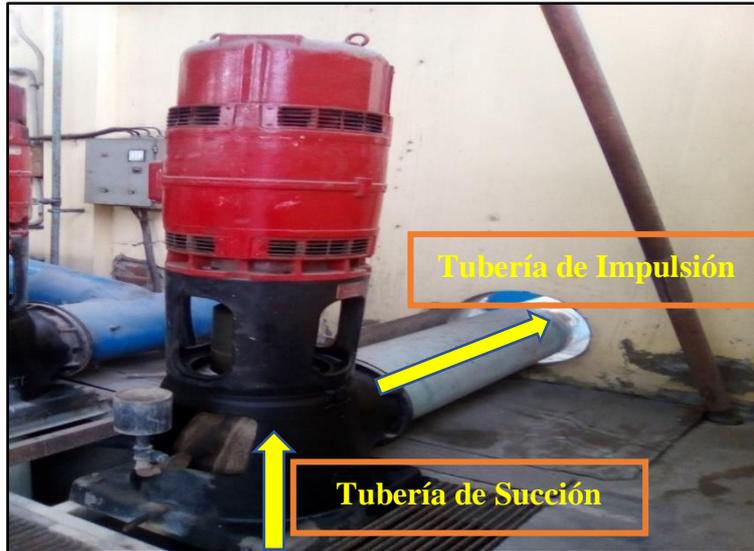


Figura 78: Bomba hidráulica usada durante los ensayos experimentales, ubicada en la División Didáctica del LNH



Figura 79: Escaneo del lecho, después de haber realizado los ensayos experimentales



Figura 80: Nivelación del lecho de arena, a través de un regleado cada 0.5 m



Figura 83: Sistema de evacuación de muestra de sedimentos en suspensión.



Figura 82: Mangueras de 3/8" de diámetro ubicadas cada 5 cm verticalmente.



Figura 84: Muestras de sedimentos en suspensión de diversos puntos y secciones del canal experimental.



Figura 81: Almacenamiento de la muestra de sedimentos en suspensión en una botella debidamente codificada.



Figura 85: probeta, vasos de pírax y balanza electrónica de precisión utilizados para obtener la concentración de sedimentos en suspensión



Figura 86: probeta, vasos de pírax y balanza electrónica de precisión utilizados para obtener la concentración de sedimentos en suspensión



Figura 87: Medición de un volumen de 100 ml de muestra de sedimentos en suspensión



Figura 88: Medición de un volumen de 100 ml de muestra de sedimentos en suspensión



Figura 89: Instalación de los espigones en la margen derecha del canal experimental



Figura 90: Análisis granulométrico del material de fondo a utilizar durante la etapa experimental