

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ESCUELA DE POSTGRADO



MAESTRÍA EN CIENCIAS

MENCIÓN: RECURSOS NATURALES

LÍNEA: RECURSOS HÍDRICOS

TESIS

**INFLUENCIA DE LA CONTRACCIÓN DEL CAUCE EN LA PROFUNDIDAD DE
SOCAVACIÓN EN LA DESCARGA DE LA ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN DE AGUA
HUAYRAPONGO EN EL RÍO CAJAMARQUINO**

Presentado por:

LUIS VÁSQUEZ RAMIREZ

Asesor

MCs. FRANCISCO HUAMÁN VIDAURRE

Cajamarca, Perú

2016

COPYRIGHT © 2016 by
LUIS VÁSQUEZ RAMIREZ
Todos los derechos reservados

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ESCUELA DE POSTGRADO



MAESTRÍA EN CIENCIAS

MENCIÓN: RECURSOS NATURALES

LÍNEA: RECURSOS HÍDRICOS

TESIS

**INFLUENCIA DE LA CONTRACCIÓN DEL CAUCE EN LA PROFUNDIDAD DE
SOCAVACIÓN EN LA DESCARGA DE LA ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN DE AGUA
HUAYRAPONGO EN EL RÍO CAJAMARQUINO**

Presentado por:
LUIS VÁSQUEZ RAMIREZ

Comité Científico

M.Cs. Francisco Huamán Vidaurre
Asesor

Dr. Valentín Paredes Oliva
Miembro de Comité Científico

Dra. Rosa A. LLique Mondragón
Miembro de Comité Científico

Dr. Nilton Deza Arroyo
Miembro de Comité Científico

Cajamarca, Perú
2016

A:

Mi esposa, madre e hijos, por el amor explícito e implícito que se ha convertido en el ingrediente que impulsa mi vida en lo personal e intelectual.

AGRADECIMIENTO

A todas y cada una de las personas que han contribuido para poder terminar la presente investigación, en especial a los miembros del Comité Científico quienes me han orientado para plasmar y mejorar aspectos importantes en este documento.

INDICE

Ítem	Página
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
INDICE	iii
LISTA DE ILUSTRACIONES	iv
LISTA DE TABLAS	vii
RESUMEN.....	viii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
Transporte y propiedades del sedimento en lechos De ríos.	3
Contracción del cauce del río.	7
Socavación en la descarga de la estructura de cap- tación.	9
Modelamiento Hidráulico.	12
CAPÍTULO III. DISEÑO DE CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS	20
Primera Etapa: Recopilación de Información.	20
Segunda Etapa: Modelamiento Hidráulico.	21
Tercera Etapa: Compatibilización y Confiabilidad.	22
Cuarta Etapa: Aplicación al Prototipo.	23
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
Primera Etapa: Recopilación de Información.	24
Segunda Etapa: Modelamiento Hidráulico.	30
Tercera Etapa: Compatibilización y Confiabilidad.	39
Cuarta Etapa: Aplicación al Prototipo.	42
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

APÉNDICES	54
ANEXOS	65

LISTA DE ILUSTRACIONES

Figuras	Página
1. Diagrama de Shields	6
2. Diagrama de Shields con formas de lecho	6
3. Diagrama de Shields modificado por Yalin y Karahan	7
4. Contracción del cauce por presencia de estructura.	8
5. Contracción del cauce del río por presencia de estructura de captación...	8
6. Descarga de estructura para modelamiento físico.	10
7. Socavación en estructura de puente Xert sobre la Rambla Cervera (Castellón).....	11
8. Modelamiento Hidráulico – medición y calibración.	13
9. Modelamiento Hidráulico de laboratorio – erosión y socavación en estructura	13
10. Modelo Prototipo – Estructura de captación	14
11. Elementos intervinientes en la descarga de una estructura de captación..	18
12. Proceso para análisis de confiabilidad de datos	19
13. Ubicación de la zona de Estudio	20
14. Etapas del proceso de investigación	20
15. Sección transversal de ubicación de Captación Huayrapongo	24
16. Levantamiento topográfico de lugar de emplazamiento de captación Huayrapongo	25
17. Perfil longitudinal del río agua debajo de captación Huayrapongo.....	25
18. Geología Regional del área de investigación	26
19. Perfil estratigráfico para la sección transversal del río	27
20. Representación de la distribución granulométrica de la calicata del centro	27
21. Profundidad, longitud de socavación y nivel de sedimentación en estructura de captación Huayrapongo	28
22. Perfiles geológicos del cauce del río en área de investigación.....	29
23. Curva granulométrica para arena graduada	29

24. Curvas granulométricas para 70% de arena graduada y 30% de gravilla	
Graduada	30
25. Curvas granulométricas para 50% de arena graduada y 50% de gravilla	
Graduada	30
26. Dimensiones del perfil longitudinal del modelo de la estructura de captación Huayrapongo a escala 1:20	31
27. Dimensiones del perfil longitudinal del modelo físico de la estructura de captación Huayrapongo a escala 1:40	33
28. % Gravilla vs. D50 (sedimento para modelo en laboratorio).....	34
29. Modelamiento en laboratorio	35
30. Proceso de socavación en laboratorio en la descarga de captación	35
31. Curva de ajuste de la carga y el caudal sobre vertedero del modelo en laboratorio	36
32. Curva de ajuste de la carga con el coeficiente de descarga para el modelo en laboratorio	37
33. Perfiles longitudinales de erosión aguas en la descarga de captación	39
34. Antidunas generadas en prueba de laboratorio – canal de pendiente Variable	41
35. Correlación lineal por mitades de datos de laboratorio	42
36. Ancho del cauce versus profundidad máxima de socavación en la descarga de la estructura de captación	43
37. Variación de la profundidad de socavación para diferentes porcentajes de contracción del cauce	45
38. Variación de la Longitud máxima de socavación para diferentes porcentajes de contracción del cauce	46
39. Variación del tiempo de socavación para diferentes porcentajes de contracción del cauce	47
40. Contracción del cauce versus profundidad de socavación	47
41. Cauce del río con niveles de agua para caudal de prueba.	58
42. Perfil longitudinal del cauce en zona circundante a la estructura de captación.	58
43. Sección transversal n° 0+340 aguas abajo de la estructura de captación..	59
44. Sección transversal n° 0+320 aguas abajo de la estructura de captación..	59

45. Sección transversal n° 0+300 aguas abajo de la estructura de captación..	59
46. Trabajo topográfico de precisión con estación total.	60
47. Toma de datos topográficos en entorno de estructura de captación.	60
48. Trabajos de movimiento de tierras con maquinaria.	61
49. Trabajos de encofrado de barraje tipo cimacio.	61
50. Vaciado y pulido de concreto para barraje tipo cimacio.	62
51. Desencofrado y curado de barraje tipo cimacio.	62
52. Replanteo del cauce y estructura de captación.	63
53. Replanteo del muros de encausamiento de estructura de captación.....	63
54. Ensamblaje de estructura en lecho del río para el modelo físico.....	64
55. Modelo físico reducido en funcionamiento para toma de datos.....	64
56. Plano de Detalles Estructurales - Hidráulica.	66
57. Plano de secciones transversales del lecho del río (aguas abajo).	66
58. Plano de secciones transversales del lecho del río (zona de la estructura).	67
59. Perfil longitudinal del lecho del río (zona de la estructura).....	67

LISTA DE TABLAS

Tablas	Página
1. Formas básicas de lecho en canales aluviales (clasificación por aumento de las velocidades de flujo)	3
2. Interpretación del coeficiente de confiabilidad	18
3. Escalas de traslación modelo prototipo y viceversa	31
4. Caudales de prueba en prototipo y modelo.	31
5. Tirantes del prototipo modelados matemáticamente	32
6. Profundidad de socavación en modelo de campo	34
7. Anchos de estructura de captación	37
8. Longitud, Profundidad y Tiempos de la socavación máxima en modelo de laboratorio de captación	38
9. Cortante adimensional de Froude para prototipo y modelo	40
10. Número de Reynolds de la partícula del sedimento para prototipo y Modelo	40
11. Separación de datos en dos mitades	42
12. Profundidad máxima de socavación en prototipo	43
13. Influencia de la contracción del cauce en la profundidad de socavación .	44
14. Influencia de la contracción del cauce en la longitud máxima de Socavación	45
15. Influencia de la contracción del cauce en el tiempo de socavación	47
16. Valores para prueba de contrastación de Hipótesis	48
17. Valores para Caudal máximo y Tirante máximo para modelo Hidráulico, para caudal en prototipo de $67,76 \text{ m}^3/\text{s}$	56
18. Valores para Caudal máximo y Tirante máximo para modelo Hidráulico, para caudal en prototipo de $49,62 \text{ m}^3/\text{s}$	57

RESUMEN

La investigación es aplicada, cuantitativa de campo y laboratorio, y se centra fundamentalmente en determinar de qué manera influye la contracción del cauce en la profundidad de socavación en la descarga de una estructura de captación de agua, caso específico Huayrapongo en el río Cajamarquino. Para ello, se aplica el conocimiento que los cambios de rigidez entre el dissipador de energía y el lecho del río constituye el efecto natural de socavación en la descarga de la estructura, pero es el incremento de la energía cinética de las aguas que descargan en el lecho del río agua abajo de la estructura, lo que incrementa las condiciones de la socavación, ya que a mayor contracción del cauce, se incrementan las velocidades de flujo y por lo tanto se incrementa también la longitud de la poza de erosión y el tiempo para que los sedimentos alcancen su estabilidad en el fondo que conllevan al incremento obligado de la profundidad de socavación; al no poder manipular la contracción del cauce en la estructura real (prototipo), el modelamiento físico y matemático se convierte en la herramienta obligada para desarrollar esta investigación, para así determinar la influencia de la contracción del cauce en la profundidad de socavación para la descarga de la estructura de captación, fundamentándola con la determinación de la profundidad máxima de socavación, su variación longitudinal y temporal para varios porcentajes de contracción del cauce y el máximo caudal posible de prueba; luego aplicando la teoría de similitud entre modelo de laboratorio y prototipo sobre lechos móviles, regido por los parámetros característicos índices de Froude e índice de Reynolds del sedimento, se transportan los resultados del modelo al prototipo, concluyendo que el grado de influencia de la contracción del cauce del río ($\Delta\%$) en la profundidad de socavación (P_s) para la descarga de la estructura de captación Huayrapongo es muy elevado, incrementando la profundidad en una forma polinómica, según la relación:

$$P_s = 0,0003(\Delta\%)^2 + 0,0096(\Delta\%) - 2,1488$$

Palabras clave: Erosión, socavación, modelo, prototipo

ABSTRACT

The research is applied, quantitative field and laboratory, and focuses primarily on determining how influences the contraction of the runway at scour depth in the discharge structure water catchment case specific Huayrapongo in the Cajamarquino river. For this, the knowledge that changes in stiffness between the sink energy and the riverbed is the natural effect of undermining the discharge structure, but the increase in kinetic energy of the water discharged into the bed of river downstream of the structure, increasing the conditions of the scour, since the higher contraction of the channel, the flow rates are increased and therefore also increases the length of the pool of erosion and time for sediments achieve stability in the background that lead to forced increasing depth of scour; unable to manipulate the contraction of the channel in the actual structure (prototype), the physical and mathematical modeling becomes the must-have tool to develop this research, to determine the influence of the contraction of the runway at scour depth for download of the intake structure, basing it with the determination of the maximum scour depth, longitudinal and temporal variation for various percentages of shrinkage of the channel and the maximum flow rate test; then applying the theory of similarity between laboratory model and prototype on moving beds, governed by the characteristic parameters indices Froude and Reynolds number of sediment, the model results to prototype transported, concluding that the degree of influence of contraction riverbed ($\Delta\%$) in the depth of scour (P_s) for discharging the intake structure Huayrapongo is very high, increasing the depth in a polynomial form, according to the relationship: $P_s = 0,0003(\Delta\%)^2 + 0,0096(\Delta\%) - 2,1488$

Keywords: erosion, scour, model, prototype.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En el mundo, el hombre en su afán de aprovechar los recursos hídricos, muchas veces sin la previsión necesaria de los efectos sobre la naturaleza, ha construido estructuras de captación de agua, emplazándolos en los cauces de ríos; las cuales han modificado las condiciones naturales de flujo, generando alteraciones en el funcionamiento hidráulico del río, si a esto se le suma el estrechamiento del cauce al construir dichas estructuras, surgen incrementos en las velocidades de flujo los cuales desestabilizan a las partículas sólidas que conforman el lecho ocasionando incrementos no esperados en la profundidad de socavación, en especial aguas abajo de las Estructura (descarga). Ettmer, B. (2009) en su investigación, concluye que el conocimiento del proceso de erosión y máxima profundidad de socavación cerca de estructuras hidráulicas es de fundamental importancia para la aplicación de criterios de diseño para aliviaderos, puentes, pilares, etc; de igual forma Farhoudi, J. (2014) coincide en el sentido de que la erosión en las proximidades de estructuras hidráulicas es un fenómeno importante que puede poner en peligro su estabilidad, indicando además que la prevención de las precauciones tiene que ser considerado en el diseño de los cuencos amortiguadores con el fin de garantizar su estabilidad bajo la evolución de la socavación.

El estrechamiento del cauce en canales naturales es común, muchas veces por condiciones naturales y otras por efectos de la construcción de estructuras como captaciones de agua, emplazadas sobre el lecho natural de los cauces. Para estrechamientos en condiciones naturales, Nácher (2012), al igual que (Straub 1940, Laursen 1963, Komura 1966 y Gill 1981), dedujeron algunas expresiones matemáticas que permiten determinar los niveles de socavación aguas abajo de dicho estrechamiento; mientras que los estrechamientos por efectos de la construcción de estructuras, al depender del emplazamiento, forma, tamaño y capacidad hidráulica de éstas, por lo que se pueden considerar casos particulares.

El proceso de erosión del lecho de un río bajo la acción de chorros libres es muy complejo. Whittaker (1984) refiere que socavación resultante depende de La interacción de factores hidráulicos y factores hidrológico morfológicos; es así que

Hjulstrom (1939) concluye que la velocidad mínima de transporte para partículas de tamaño de arena o mayor parece ser aproximadamente 30 por ciento menor que la velocidad necesaria para eliminar las partículas de la parte inferior; pero para partículas progresivamente más pequeños, la velocidad mínima de transporte se vuelve cada vez menos en proporción a la velocidad requerida para hacer que las partículas entran en suspensión, lo que genera fenómenos complejos de concepción en el diseño que el Ingeniero tiene que enfrentar como afirman Maza y Springall (1968), quienes afirman que para encontrar la respuesta aproximada a esos problemas, se requiere en la mayoría de los casos de la ayuda de un modelo hidráulico de fondo móvil; igualmente Rocha (2003) indica que los fenómenos hidráulicos como expresión del mundo natural son tan complejos que no es posible analizarlos y describirlos totalmente por lo que sólo podemos hacerlo parcialmente. Y menciona que uno de los instrumentos más poderosos de que se dispone para tratar de conocer y comprender el comportamiento del agua en la naturaleza y su interacción con las estructuras se encuentra en la investigación mediante los modelos matemáticos y los modelos físicos ya que ambos se complementan. En la investigación, a la pregunta ¿de qué manera influye la contracción del cauce en la profundidad de socavación en la descarga de la estructura de captación de agua Huayrapongo en el río Cajamarquino? Se plantea la hipótesis que la contracción del cauce tiene una relación directa con la profundidad de socavación en la descarga de la estructura de captación de agua. Utilizando el modelamiento físico y matemático se pretende cumplir con el objetivo principal de la investigación, determinar el grado de influencia de la contracción del cauce en la profundidad de socavación en la descarga de la estructura de captación, fundamentando su ocurrencia con la determinación de la profundidad máxima de socavación, su variación longitudinal y su ocurrencia en el tiempo, para la descarga de la estructura de captación para varios porcentajes de contracción del cauce y el máximo caudal posible de prueba.

La investigación es aplicada – cuantitativa - de campo y laboratorio, donde la información de campo se obtuvo de registros técnicos de proyectos generados en los últimos años, y la determinada in situ en el desarrollo de la investigación; la aleatoriedad de las descargas máximas y la falta de registros no limita la investigación en el sentido de que se utilizó como caudal de prueba el máximo probable que pueda soportar la estructura con el mayor estrechamiento.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

Marco Conceptual

Transporte y propiedades del sedimento en lechos de ríos

Formación del lecho

Según Chanson (2004) la mayoría de las situaciones prácticas, los sedimentos se comportan como un material no cohesivo (por ejemplo, arena, grava) y el flujo del fluido puede distorsionar el lecho en diferentes formas como resultado de las fuerzas de arrastre que se ejercen sobre el flujo al igual que el movimiento del sedimentos inducido por él sobre los granos de sedimento. Este proceso interactivo es bastante complejo. En una aproximación simple, los parámetros predominantes que afectan la forma del lecho son la pendiente del lecho, la profundidad y velocidad de flujo, el tamaño del sedimento y la velocidad de asentamiento de la partícula. A bajas velocidades el lecho no se mueve. A medida que se incrementan las velocidades, se logra el arranque del movimiento del lecho y el sedimento de este empieza a moverse. Las formas básicas del lecho que pueden encontrarse son los rizos, las dunas, el lecho plano, las ondas estacionarias y las antidunas.

Tabla N° 1. Formas básicas de lecho en canales aluviales (clasificación por aumento de las velocidades de flujo).

Forma del lecho	Flujo	Movimiento de la forma del lecho	Comentarios
Lecho plano	Sin flujo ($0 \leq Fr \leq 1$)	NO	Sin movimiento de sedimentos.
Rizos	$Fr \ll 1$	D/S	Formas tridimensionales. Observados también con flujos de aire.

Dunas	$Fr < 1$	D/S	Formas tridimensionales. Pueden ser causadas también por vientos.
Lecho plano	$Fr \leq 1$	NO	Observadas también con flujo de viento.
Ondas estacionarias	$Fr = 1$	NO	Condiciones de flujo crítico. Ondas estacionarias del lecho en fase con ondas estacionarias de superficie libre.
Antidunas	$Fr > 1$	NO	Flujo supercrítico con flujo en caída y resalto hidráulico aguas arriba de las crestas de las antidunas.
Rápidas	$Fr > 1$	U/S	Antidunas muy activas.
Cuencos	$Fr > 1$	--	Cascadas o escalones causados por el lecho rocoso.

Fuente: Chanson (2004).

Análisis Dimensional del movimiento de sedimentos en el lecho

Chanson (2004), menciona que los parámetros relevantes para el análisis del umbral de transporte de sedimentos (condiciones de flujo y de frontera para las cuales el transporte de sedimento empieza a ocurrir), son: el esfuerzo cortante del lecho τ_o , la densidad del sedimento ρ_s , la densidad del fluido ρ , el diámetro del grano d_s , la aceleración de la gravedad g , la viscosidad del fluido μ .

$$f_1(\tau_o, \rho, \rho_s, \mu, g, d_s) = 0 \quad \dots\dots\dots (01)$$

En términos adimensionales, se obtiene:

$$f_2\left(\frac{\tau_o}{\rho g d_s}; \frac{\rho_s}{\rho}; \frac{d_s \sqrt{\rho \tau_o}}{\mu}\right) = 0 \quad \dots\dots\dots (02)$$

Además indica que experimentalmente, el movimiento de partículas ocurre cuando los momentos de fuerzas desestabilizantes (es decir arrastre, sustentación, flotación), con respecto al punto de contacto, se vuelven mayores que el momento estabilizante de la fuerza del peso. La condición resultante es una función del ángulo de reposo.

Observaciones experimentales destacan la importancia del parámetro de estabilidad F_s , definido como:

$$F_s = \frac{\tau}{\rho(S-1)gD_s} \dots\dots\dots (03)$$

Se puede definir como el valor crítico del parámetro de estabilidad en el umbral de movimiento del lecho. Shields (1936) demostró que F_s es ante todo una función del número de Reynolds de corte de la partícula del sedimento R^* .

Según Martínez. E (2001), Shields presenta sus resultados obtenidos experimentalmente y es Hunter Ruse quien propone la línea de separación entre la zona de movimiento y la de lecho fijo. El diagrama de Shields (figura N° 1), limita la zona del inicio de la erosión en función de los parámetros:

$$R^* = \frac{U^* \cdot D_s}{\nu} \dots\dots\dots (04)$$

- Dónde: R^* : Número de Reynolds de la partícula del sedimento.
 U^* : Velocidad al cortante (cm/s).
 D_s : Diámetro medio de las partículas del sedimento (cm).
 ν : Viscosidad cinemática del fluido (cm²/s).

$$F_s = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)D_s} \dots\dots\dots (05)$$

Siendo: $\tau = \rho U^2 *$ \wedge $U^* = \sqrt{g \cdot R \cdot S}$ $\dots\dots\dots (06)$

- Dónde: F_s : Cortante adimensional.
 γ_s, γ : Pesos específicos de la partícula y del agua (gr/cm³).
 S : Pendiente hidráulica (cm/cm).
 τ : Esfuerzo cortante crítico (gr/cm²).
 R : Tirante normal (Y_n) pada canales anchos (cm).

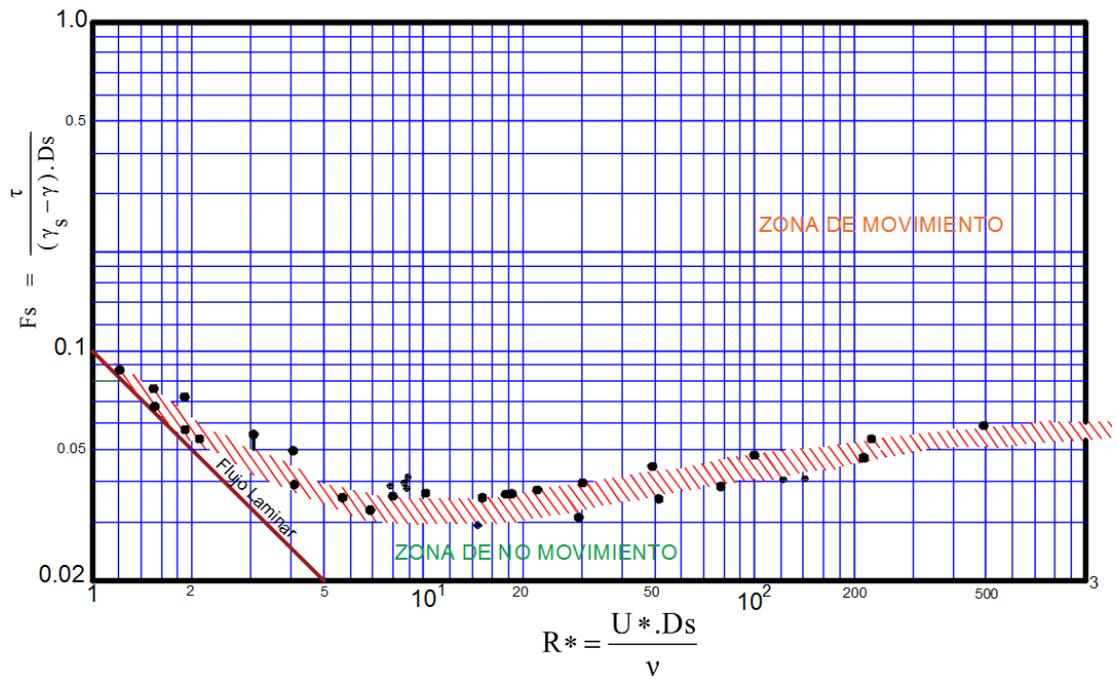


Figura N° 1. Diagrama de Shields. Fuente: Shields (1936)

Maza y Alvarez (1968), presentan el diagrama de Shields, separando las formas del lecho.

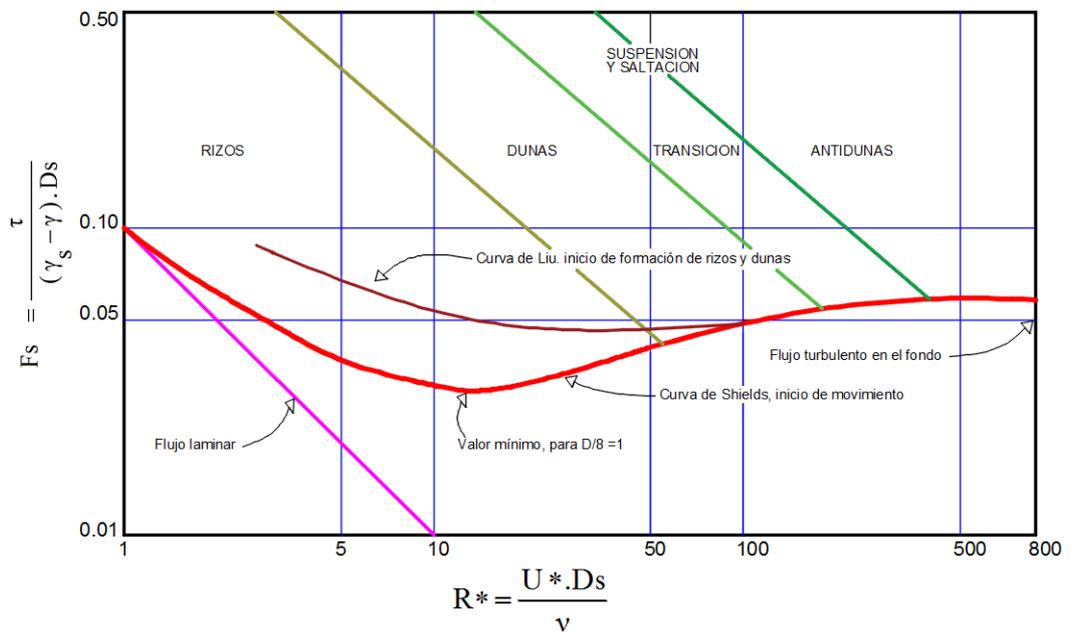


Figura N° 2. Diagrama de Shields con formas de lecho. Fuente: Maza (1968)

Martinez (2001), menciona que Yalin y Karahan (1979), ensayan la zona baja del diagrama de Shields, recogen gran número de ensayos y publican una propuesta de

diagrama de Shields modificado figura N° 3 En dicho diagrama se observa que en la curva de separación del movimiento más baja el valor asintótico pasa a valores de 0.45 (Fr) alcanzándose dicho valor para $R^* > 70$. En donde el número de Reynolds ya no tiene incidencia en el movimiento.

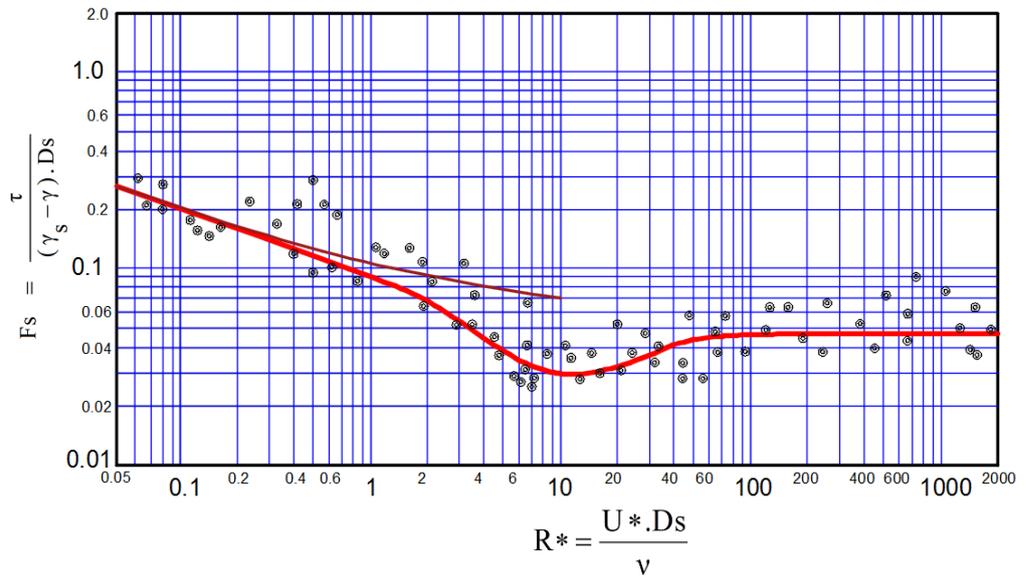


Figura N° 3. Diagrama de Shields modificado por Yalin y Karahan. Fuente: Martínez, E (2001)

Contracción del cauce del Río

Contracción del cauce del río

Rocha (1998) Indica que muchas veces, por diversas circunstancias, se presenta el estrechamiento del ancho de un tramo fluvial. Esto ocurre cuando se ha dejado un encauzamiento del río en el que se ha exagerado la disminución del ancho del río. Otras veces los estrechamientos excesivos tienen que ver con la construcción de puentes. Cualquiera que sea el origen del estrechamiento siempre determina una disminución del ancho de la sección transversal, lo que implica aumento de la velocidad y de la capacidad de transporte de la corriente.

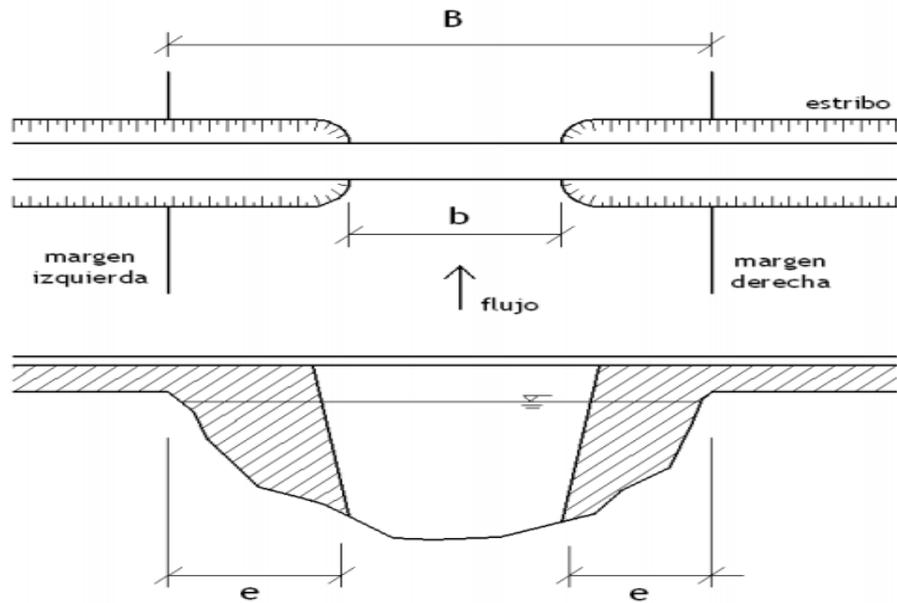


Figura N° 4. Contracción del cauce por presencia de estructura. Fuente: Nácher (2012).

La construcción de estructuras de captación en ríos formados sobre material granular, con lecho móvil con laderas de topografía plana u ondulada, puede generar un doble problema si ésta no ha sido diseñada y emplazada correctamente, ya que tanto el ahorro económico en la etapa de construcción así como el aparente genera en muchos de los casos (Rocha 1998)

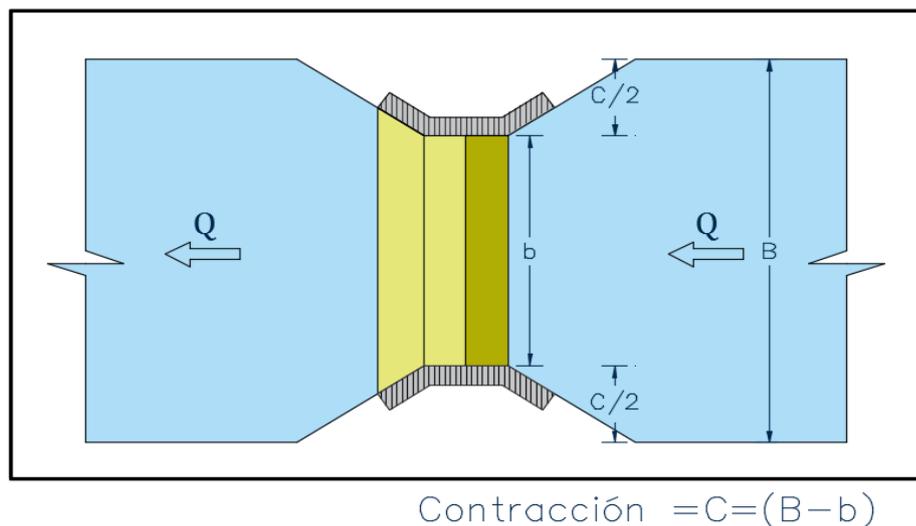


Figura N° 5. Contracción del cauce del río por presencia de estructura de captación. Fuente: Adaptado de Nácher (2012).

Porcentaje de contracción del cauce del río

Está determinado por la relación de estrechamiento que se genera al invadir el lecho del río con la estructura de captación, disminuyendo el ancho natural de flujo. Se determina dividiendo el ancho natural del río menos el ancho de la estructura de captación entre el ancho natural del río por 100.

$$(\Delta\%) = \left(\frac{B-b}{B}\right) * 100 \dots\dots\dots (07)$$

Donde: $(\Delta\%)$: Porcentaje de contracción del cauce.

B : Ancho natural del río (m).

b : Ancho de la estructura de captación (m).

Capacidad de descarga en vertedero de rebose

El caudal por encima de un vertedero de rebose, puede calcularse mediante una ecuación similar a la de vertederos de pared delgada. Para vertederos diseñados de las formas WES, esta ecuación es: $Q = C_b H_e^{3/2} \dots\dots\dots (08)$

Donde H_e es la altura de energía total sobre la cresta, incluida la altura de velocidad en el canal de aproximación. Pruebas en modelos sobre vertederos han demostrado que el efecto de la velocidad de aproximación es insignificante cuando h del vertedero es mayor que $1,33 H_d$, donde H_d es la altura de diseño excluida la altura de velocidad. (Chow 1994).

Socavación en la Descarga de la estructura de captación

Descarga de la estructura de Captación

Nácher (2012), sobre la zona de salida del agua que al entrar a la estructura no es captada, indica que la práctica general para la protección de las estructuras frente a procesos erosivos consiste en la colocación de materiales capaces de resistir la acción del flujo, tales como recubrimientos de escollera o losa de hormigón, en muchos casos estos elementos el entorno local de los elementos sub estructurales y se extienden a todo el lecho y se extienden a todo el lecho por debajo de la estructura.

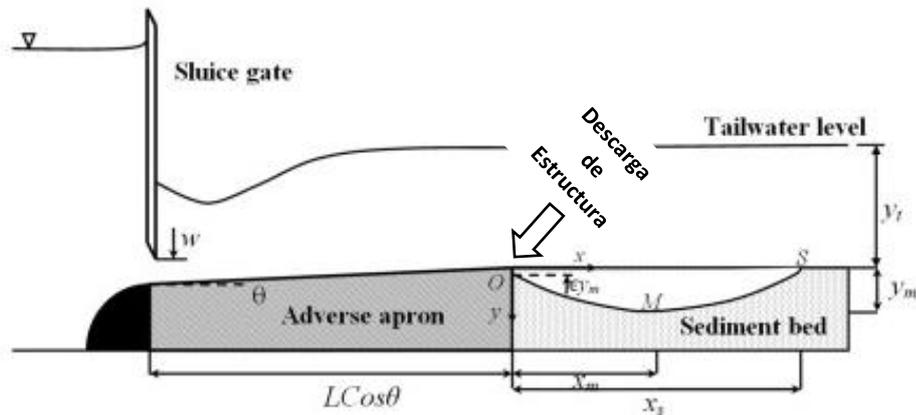


Figura N° 6. Descarga de estructura para modelamiento físico. Fuente: Farhodi, & Shayan, (2014).

Erosión en el cauce por la corriente

Consiste en la pérdida del suelo de las márgenes o en el transporte a lo largo del canal. La erosión del cauce se registra en los tramos más bajos de los tributarios, aguas arriba y en las corrientes que tienen casi siempre flujo continuo y pendientes mínimas, mientras que el otro tipo se ajusta a corrientes intermitentes cercanas a los tributarios, aguas arriba. Las márgenes de las corrientes se desgastan, ya sea por el escurrimiento que fluye sobre las orillas o, bien, por la acción abrasiva del agua y la socavación de la misma. La erosión de las orillas es menos severa que la abrasión del agua, pero se aumenta con frecuencia si se elimina la vegetación por el pastoreo excesivo o por labrar la tierra demasiado cerca de los bordes. La acción abrasiva del agua está afectada por la velocidad y la dirección de la corriente, la profundidad y la anchura del canal, y por la textura del suelo. La formación de meandros aumenta por la alineación inadecuada y por la presencia de obstrucciones, como los bancos de arena, y es la causa principal de la erosión de las márgenes.

Las variables que afectan el movimiento de los sedimentos son la velocidad del flujo; la turbulencia; la distribución de tamaños, el diámetro, la cohesión y el peso específico de los materiales transportados; la rugosidad del canal; las obstrucciones de la corriente y la capacidad de los materiales para moverse. (Glenn 1990).

Socavación

La socavación propiamente dicha, está circunscrita a un lugar determinado, y a veces también está limitada a una cierta duración, y se debe a una perturbación del flujo. Socavar significa “excavar por debajo de alguna cosa, dejándola en falso”. (Rocha 1998).



Figura N° 7. Socavación en estructura de puente Xert sobre la Rambla Cervera (Castellón). Fuente: Nácher (2012).

El proceso de socavación para estructuras de captación en ríos de alta montaña con pendiente suaves y lechos con materiales granulares no cohesivos está influenciado por la magnitud de las descargas naturales generadas por las precipitaciones, las cuales por naturaleza son de baja intensidad al inicio, aumentando dicha intensidad con el tiempo de duración de éstas. En tal sentido el proceso de socavación se da en el tiempo para gastos elevados que generan un flujo turbulento (resalto hidráulico), el cuál muchas veces disipadora de energía en su condición de resalto retirado, llegando éste hasta el lecho del río en la descarga de la estructura generando una socavación local profunda.

Socavación por contracción

Existen muchas investigaciones orientadas a la determinación de la profundidad de socavación en cauces de ríos, pero la gran mayoría para condiciones naturales de estrechamiento de cauce, otras por presencia de estructuras de puentes emplazados dentro del cauce natural. (Nácher 2012) La erosión por contracción puede producirse tanto en condiciones de aguas claras como en condiciones de lecho vivo, y está directamente relacionada con el grado de estrechamiento o relación de contracción en la sección transversal del cauce. Mientras que la socavación se presenta en el entorno

del elemento inserto en el cauce, la erosión por contracción se produce a lo largo de toda la sección transversal, presentándose diferentes profundidades de socavación en el sentido longitudinal del flujo. Además puede extenderse una mayor distancia aguas abajo de la estructura, provocando una afección a la cimentación de la misma de igual o mayor entidad que la erosión local.

Cuando la erosión por contracción se produce en condiciones de lecho vivo pueden producirse sucesivas extracciones y rellenos de material dentro de la fosa de socavación, fluctuando en torno a una profundidad de equilibrio. Este valor de profundidad de socavación es similar a la que se alcanzaría en condiciones de aguas claras, aunque es, en general, menor. Cuando existe transporte de sedimentos en los cauces, durante la etapa final del paso de la avenida (recesión) la fosa de socavación puede rellenarse con el material que empieza a depositarse, lo que puede disimular la profundidad realmente alcanzada.

Modelamiento Hidráulico

Modelación en hidráulica

Para los ingenieros de diseño es esencial predecir en forma exacta el comportamiento de las estructuras hidráulicas bajo las condiciones de diseño (por ejemplo, la capacidad máxima de descarga), las condiciones de operación y las situaciones de emergencia (por ejemplo, la creciente máxima para un vertedero). Durante las etapas de diseño, los ingenieros necesitan una “herramienta” de predicción confiable para comparar los comportamientos de diferentes opciones de diseño.

En mecánica de fluidos e hidráulica, muchos problemas no pueden resolverse mediante la teoría o la referencia a datos empíricos. En la práctica, un diseño apropiado de estructuras hidráulicas se deduce utilizando un modelo bien definido como un sistema que opera en forma similar a otros sistemas y el cual suministra una predicción acertada de las características de estos.

En Hidráulica, se utilizan muy a menudo dos tipos de modelos: modelos computacionales y modelos físicos. Los modelos numéricos son programas de computador que resuelven las ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos: por ejemplo, la integración numérica de la ecuación de remanso para predecir el perfil longitudinal de la superficie libre de un flujo gradualmente variado en un canal abierto.

Sin embargo, su aplicación está restringida a situaciones de flujo y condiciones de frontera simples para las cuales las ecuaciones básicas puedan integrarse de forma numérica y tengan significado. La calibración y la validación de modelos computacionales es en extremo difícil, y la mayoría de los modelos de computador es aplicable solo en rango muy específico de condiciones de flujo y condiciones de frontera. Con mayor frecuencia, se debe utilizar los modelos físicos, incluyendo casos para la validación de modelos computacionales. (Chanson 2004).

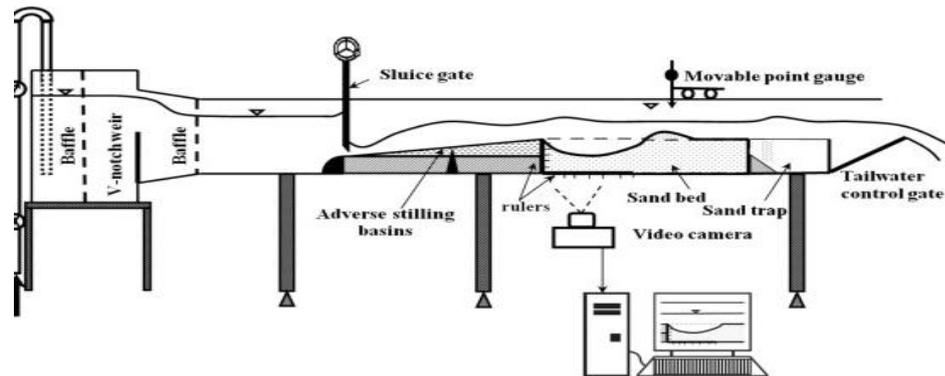


Figura N° 8. Modelamiento Hidráulico – medición y calibración. Fuente: Farhoudi, & Shayan, (2014).

El proceso de erosión se torna variable en el tiempo y espacio, por lo que se hace difícil identificar y medir la variación y secuencia del fenómeno de socavación en el entorno de la estructura, por ello la manipulación de variables es recomendable hacerlo en laboratorio.

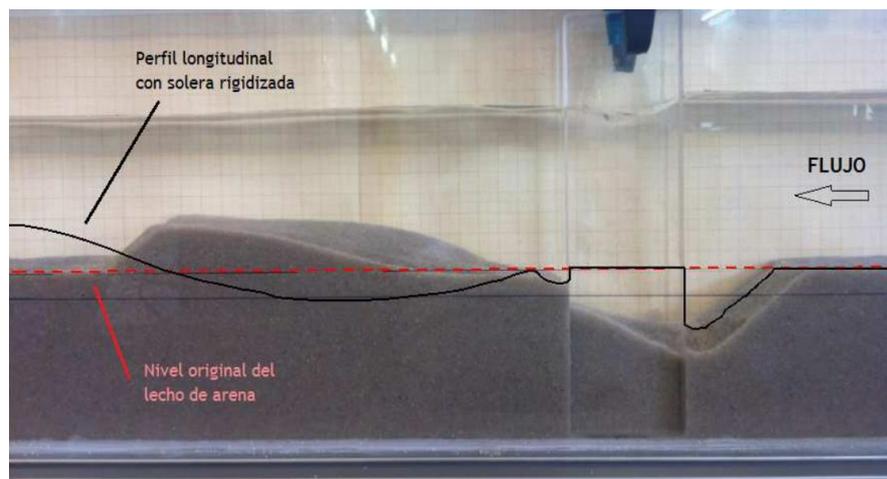


Figura N° 9. Modelamiento Hidráulico de laboratorio – erosión y socavación en estructura. Fuente: Náchter (2012).

Modelos Físicos Reducidos

El uso de modelos físicos a escala reducida, llamados simplemente modelos hidráulicos, implica que estos deben ser semejantes al prototipo, para lo cual debe satisfacerse las leyes de similitud Geométrica, Cinemática y dinámica, que en conjunto relacionan las magnitudes físicas homólogas definidas entre ambos sistemas, el prototipo A_p y el modelo A_m .

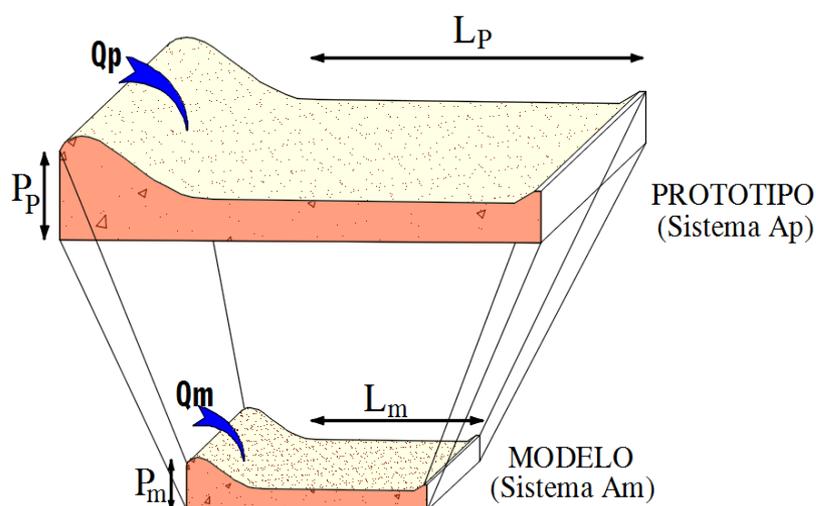


Figura N° 10. Modelo Prototipo – Estructura de captación. Fuente: Adaptado de Vergara (1995).

...Cuando la comparación de los sistemas A_p y A_m es con respecto a un movimiento, se establece entonces la similitud cinemática, y que se cumple cuando la forma de los patrones de flujo homólogos son iguales en cualquier tiempo, es decir, hay similitud de movimiento de los dos sistemas; por lo que la relación de velocidades de puntos homólogos deben ser constante..... El movimiento del fluído en el modelo y el prototipo, para que sea similar en forma completa, no es suficiente que cumpla con las similitudes, geométrica y cinemática, también es necesario tomar en consideración la acción de fuerzas sobre las partículas del fluído, tales como fricción (F_t), tensión superficial (F_σ), de gravedad o peso (F_g), de inercia (F_i), de coriolis (F_c), etc. Lo anterior implica que el polígono de fuerzas actúa sobre puntos homólogos debe ser

geométricamente similar, lo que a su vez manifiesta que la relación de fuerzas homólogas sea un factor constante en todo el sistema. (Vergara 1995).

Según Ettema (2000), para que se cumpla la completa similitud entre modelo y prototipo se requiere la satisfacción de las siguientes condiciones:

1. Similitud geométrica, por lo que la relación de todos homóloga (geométricamente equivalentes) dimensiones de longitud son iguales y donde sólo similitud en forma está involucrada.

El parámetro principal de semejanza geométrica es la relación de longitud

$$Lr = \frac{Lp}{Lm} \dots\dots\dots (09)$$

Donde: Lr: Relación de longitudes, que debe ser constante para todas las partes del modelo y prototipo.

Como consecuencia de semejanza geométrica, debe cumplirse:

$$Ar = Lr^2 \dots\dots\dots (10)$$

$$Vr = Lr^3 \dots\dots\dots (11)$$

Donde: Ar: Relación de áreas.

Vr: Relación de volúmenes.

2. Similitud cinemática, con lo cual en los puntos geométricamente homólogas en el modelo y el prototipo, velocidades y aceleraciones están en una constante proporción.

Para semejanza cinemática, la relación de velocidad, v_r , y la relación de aceleraciones, a_r debe ser constante en todos los puntos homólogos del modelo y del prototipo:

$$v_r = \frac{Lr}{Tr} \dots\dots\dots (12)$$

$$a_r = \frac{vr}{Tr} = \frac{Lr}{Tr^2} \dots\dots\dots (13)$$

En el que la relación de tiempo, Tr , es:

$$Tr = \frac{Tp}{Tm} = Lr^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (14)$$

3. Semejanza dinámica, con lo cual, además de la similitud cinemática, los polígonos de fuerza son similares en los puntos geoméricamente equivalentes para modelo y prototipo.

La similitud dinámica consiste en la relación de fuerzas **Fr** que surgen en el modelado debido a una variedad de fenómenos físicos:

La segunda ley de Newton relaciona la fuerza de inercia de masa, **M**, y la aceleración, **a**, expresado en forma de relación:

$$Fr = Mr.ar \dots\dots\dots (15)$$

La relación se puede escribir de la siguiente forma:

$$Fr = \rho r.Lr^2.vr^2 \dots\dots\dots (16)$$

4. Semejanza Sedimentológica, fundamentada básicamente las condiciones de flujo de las aguas en el cauce y su interrelación con los sedimentos del lecho móvil, específicamente en la investigación para cauces no cohesivos, no se considera efecto de vegetación u otros obstáculos que genere resistencia al flujo. La similitud, se fundamenta en el equilibrio de una partícula en el lecho, la cual debe ser semejante a la que será utilizada en laboratorio.

Yalin y Karahan (1979) citado en Martínez (2001), son quienes ensayan la zona baja del diagrama de Shields, en el que se observa que en la curva de separación del movimiento baja más el valor asintótico pasa a valores de 0.45 (Fr_s) alcanzándose dicho valor para $R^* > 70$. En donde el número de Reynolds ya no tiene incidencia en el movimiento.

Para Fuentes, R (2002). El número de Reynolds pierde su influencia si sus valores son muy grandes. En este caso, esto ocurre para un valor $R^* \approx 70$ (Yalin, 1971), Por lo que se obviaría la similitud de Reynolds; a este tipo de modelos se los conoce con el nombre de modelos Eulerianos a gran número de Reynolds.

Segùn French (1988), los investigadores {Bogardi, 1959, o (Henderson, 1966) y Raudkivi, 1976} han aseverado que el requisito de que F_s y R^* tengan exactamente el mismo valor en el modelo y prototipo puede y debe relajarse un poco, cuando $R^* \geq 100$ ya que el flujo alrededor de los granos es totalmente turbulento por tanto no es necesario que se cumpla $R^*_m = R^*_p$.

Maza y Alvarez (1968) indican que para que exista similitud entre modelo y prototipo, en cuanto al número de Reynolds no se puede conseguir la similitud numérica, por lo que para la similitud debería cumplirse que ambos puntos caigan en el mismo tipo de fondo para el diagrama de Shields.

Selección de escalas

En la selección de escalas es recomendable tomar en consideración que, durante la operación del modelo, el efecto de escala sea lo más reducido posible.

El efecto de escala se puede definir como la diferencia resultante entre las condiciones del modelo y del prototipo causadas por la imposibilidad práctica de lograr que actúen simultáneamente todas las fuerzas en el prototipo. Por ejemplo cuando un modelo se trabaja con el mismo fluido del prototipo, no es posible con las condiciones de Froude y Reynolds. Otro ejemplo cuando por razones de escalas, la rugosidad de un cauce de un río o canal de un modelo de fondo fijo, resulta ser mayor que la del prototipo, estableciéndose muchas veces, de proporcionar una rugosidad adicional (rugosidad artificial), misma que generará otros fenómenos parásitos que no ocurren en el prototipo. Es así que Vergara (1995) recomienda un rango para las escalas lineales comunes en modelos hidráulicos reducidos para EROSION LOCAL POR CORRIENTES las cuales están entre los rangos de 1:20 a 1:60 y además recomienda un modelamiento de Fondo móvil sin distorsión.

Elementos Hidráulicos en Estructura de captación

En una estructura de captación, al realizar la contracción del cauce natural, los elementos hidráulicos que intervienen son: la carga hidráulica “H”, los tirantes conjugados menor y mayor “ Y_1 ” y “ Y_2 ”, tirante normal “ Y_n ”, La longitud de posa de socavación “ L_s ” y la profundidad de socavación “ P_s ”.

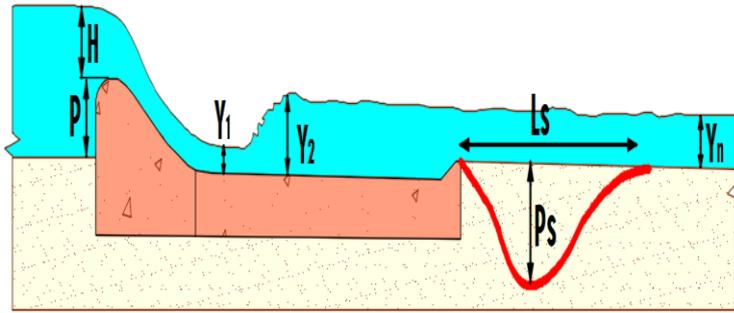


Figura N° 11. Elementos intervinientes en la descarga de una estructura de captación.
 Fuente: Adaptado de Martínez (2001).

Confiabilidad

Gamarra, G. (2008), indica que la confiabilidad de un instrumento de medición se refiere al grado de precisión o exactitud de la medida..., Existen diversos procedimientos para calcular la confiabilidad de un instrumento de medición. Todos utilizan fórmulas que producen coeficientes de confiabilidad. Estos coeficientes pueden oscilar entre 0 y 1. Donde un coeficiente 0 significa nula confiabilidad y 1 representa un máximo de confiabilidad. Entre más se acerque el coeficiente a cero (0), hay mayor error en la medición.

Tabla N° 2. Interpretación del coeficiente de confiabilidad.

INTERPRETACION DE UN COEFICIENTE DE CONFIABILIDAD				
Muy baja	Baja	Regular	Aceptable	Elevada
0	0,01 a 0,49	0,50 a 0,59	0,60 a 0,89	0,90 a 1,00
0% de confiabilidad en la medición (la medición está contaminada de error)				100% de confiabilidad en la medición (no hay error)

Fuente: Gamarra, G. (2008).

Método de mitades partidas (Split.halves). La mayoría de procedimientos requiere cuando menos dos administraciones de la medición en el mismo grupo de individuos. En cambio, el método de mitades partidas requiere solo una aplicación de la medición. Si el instrumento es confiable, las puntuaciones de ambas mitades deben estar fuertemente correlacionadas (Gamarra 2008).

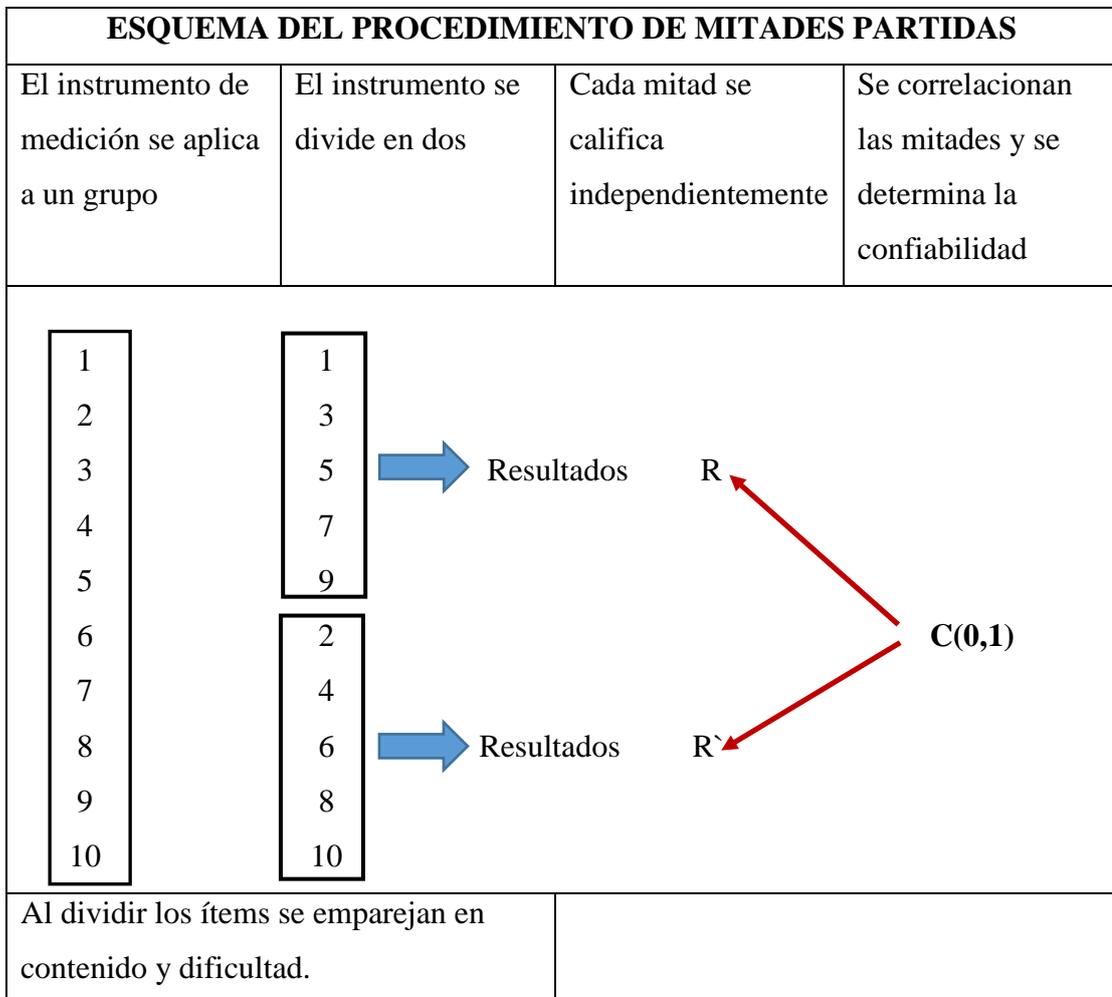


Figura N° 12. Proceso para análisis de confiabilidad de datos. Fuente: Gamarra, G. (2008).

Confiabilidad división de dos mitades (Spearman - Brown). Este coeficiente de confiabilidad está expresado en función del coeficiente de correlación de las dos partes y se expresa como:

$$r_{tt} = \frac{2r_{hh}}{1 + r_{hh}} \dots\dots\dots (17)$$

Donde: r_{tt} : Coeficiente de confiabilidad de las mitades.

r_{hh} : Coeficiente de correlación entre las dos mitades.

PRIMERA ETAPA (RECOPIACION DE INFORMACION):

Esta primera etapa estuvo orientada a la recopilación de la información disponible, tanto de campo así como en los archivos sobre la concepción en el diseño, y construcción de estructura de captación:

Recopilación de Información en existente:

Información cartográfica, Hidrogeológica regional existente, básicamente se la tomaron de las cartas topográficas y geológicas levantadas por el Instituto Geográfico Militar y el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.

Información topográfica del lecho del cauce y laderas adyacentes, en condiciones iniciales, antes de la construcción de la estructura de captación actual, información obtenida del expediente técnico de ejecución de obra (Anexo N° 1).

Estudios de mecánica de suelos del material en el lecho del río existente.

Levantamiento de Información de campo:

Se registró medidas sobre el dimensionamiento existente en cuanto a su geometría, orientación, emplazamiento en el lecho del río de la estructura de captación Huayrapongo, utilizando libretas de campo para toma de datos, y la respectiva documentación fotográfica.

Para las condiciones actuales de funcionamiento de la estructura se realizó el levantamiento topográfico de la zona de socavación, con estación total para identificar los niveles de los puntos críticos de la socavación de la estructura en la descarga y los valores para la calibración de los modelos físicos a construir.

Se realizó el muestreo en el lecho del río y en el área de influencia en la descarga de la estructura de captación.

SEGUNDA ETAPA (MODELAMIENTO HIDRÁULICO):

Con la información existente y la obtenida en campo, se precedió a modelar hidráulicamente dicha captación para poder representar en laboratorio los eventos que en la realidad no pueden ser medidos o visualizados. Se planteó el modelamiento físico de campo y laboratorio y el modelamiento matemático en gabinete, los cuales se complementan:

Modelamiento Hidráulico:

El modelo físico de la estructura de captación fue planteado en tres escenarios:

- Modelamiento Físico para determinar las condiciones de flujo, tanto aguas arriba como aguas abajo de la estructura de captación. Se plantearon dos modelos físicos en campo con escalas (1:20 y 1:40): el primero para determinar condiciones de flujo (tirantes y pendiente de fondo) en el cauce del río para dos caudales de prueba con una longitud suficiente para llegar a un flujo normal y el segundo para determinar el tipo de lecho (granulometría) del material que cumpla con los criterios de similitud con el material no cohesivo existente en el cauce real. El tercer modelo físico fue ensayado en laboratorio, para las condiciones hidráulicas encontradas en los dos anteriores.
- **El modelamiento en campo** (escala geométrica 1:20), se lo desarrolló para determinar las condiciones de flujo tanto aguas arriba como aguas abajo del punto donde se emplaza la estructura de captación en condiciones de flujo libre, para ello se construyó un modelo (cauce del río) que representa una longitud de 160m aguas arriba y 340 m aguas abajo en una longitud de terreno aproximada de 15m de largo y 2m de ancho, se contó con un vertedero tipo cipoleti para aforar los caudales a la entrada (aguas arriba).
- Modelamiento **Matemático**, nos permitió reproducir el escenario generado por el escurrimiento en el cauce en condiciones naturales, se lo desarrolló con el software de modelamiento hidráulico HEC-RAS de uso libre; dicho software HEC-RAS (Hydrological Engineering Center - River Analysis System) es uno de los programas de referencia en su campo, fue desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers, sirve para modelación fluvial en ríos para flujo permanente y no permanente.
- Modelamiento en **Laboratorio**, planteado para la manipulación de las variables independientes y obtención de resultados sobre la variable dependiente, se lo desarrolló en un canal de pendiente variable con una sección de 23cm de ancho una altura de 25 cm. y un largo de 6 m. con paredes de vidrio transparente para poder visualizar y escalar las magnitudes intervinientes.

TERCERA ETAPA (COMPATIBILIZACION Y CONFIABILIDAD):

Compatibilización:

Parte de la investigación donde se plantea la similitud entre el prototipo y el modelo de laboratorio generado utilizando la información recopilada en campo y archivos (del prototipo) y los resultados simulados en los modelos físicos de campo y el matemático.

Los escenarios distintos implicaron la influencia de condiciones de flujo diferentes, la base teórica para modelos físicos de lecho móvil condiciona la similitud a los parámetros característicos como son los Índices de Froude y Reynolds del sedimento, los cuales están ampliamente estudiados en el diagrama de Shield.

Para la primera calibración con el fin de definir la pendiente en modelo, se procedió con dos grados de libertad como son el tirante normal aguas abajo, y el lecho y muros fijos, para lo que se plantearon descargas que generen velocidades de prueba bajas que no erosionen el lecho del modelo físico a escala 1:20.

La calibración para el tercer grado de libertad (material de lecho) se lo desarrolló en un modelo en campo a escala de 1:40, debido que el modelamiento final se lo desarrollará en laboratorio en el canal de pendiente variable y escalas mayores no son posibles.

Una vez verificada la similitud entre modelo (en laboratorio) y prototipo (captación Huayrapongo) se procedió a aplicar diferentes gastos aleatoriamente generar las diferentes cargas de agua con lo que se generan los anchos diferentes para un mismo caudal de prueba; dicha información se lo recaba en fichas de toma de datos en laboratorio que se presenta en Apéndice N° 2, para proceder al procesamiento de la información según requerimiento.

Confiabilidad:

El grado de precisión o exactitud de las medidas tomadas en laboratorio se midió aplicando el método de las mitades partidas (Split-halves), ya que solamente se tiene una sola aplicación de la medición.

Para el desarrollo del método de mitades partidas se utilizó el software Microsoft Excel en la parte de tratamiento estadísticos, correlación de dos variables.

CUARTA ETAPA (APLICACIÓN AL PROTOTIPO):

Una vez compatibilizados los datos obtenidos en campo con los de laboratorio y analizada su confiabilidad se procedió a pasar los resultados de laboratorio (modelo físico reducido) al prototipo (Captación de agua Huayrapongo), aplicando las relaciones de escala planteados para la existencia de la similitud, geométrica, cinemática y dinámica, para proceder luego a analizar el cumplimiento de los objetivos planteados y por ende la contrastación de la Hipótesis planteada; para realizar la prueba de contrastación de hipótesis se aplicó el software Microsoft Excel.

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PRIMERA ETAPA (RECOPIACION DE INFORMACION):

Recopilación de Información existente:

- Información geográfica y cartográfica:
Geográficamente el lugar de investigación (bocatoma Huayrapongo) se ubica en la zona 17M y tiene como coordenadas UTM 781078,00 m y 9204900,00 m; con una altitud aproximada de 2622 m.s.n.m.
- Información topográfica del lecho del cauce y laderas adyacentes, en condiciones iniciales, antes de la construcción de la estructura de captación actual, información obtenida del Expediente Técnico de ejecución de obra (Anexo N° 1).

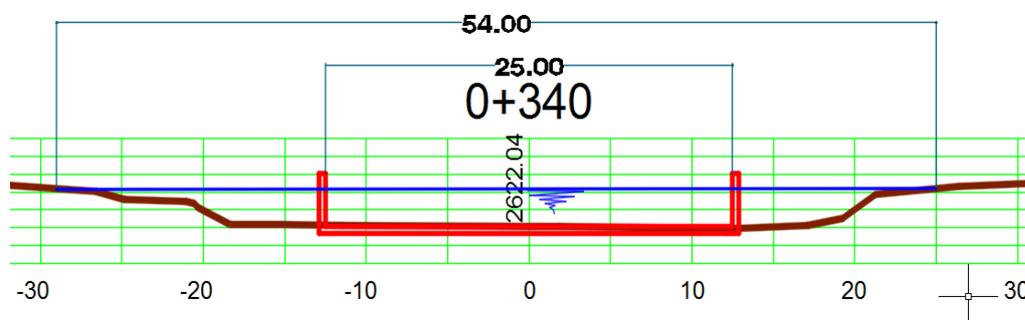


Figura N° 15. Sección transversal de ubicación de Captación Huayrapongo
Fuente: Expediente técnico – Municipalidad Distrital de Baños del Inca (2010).

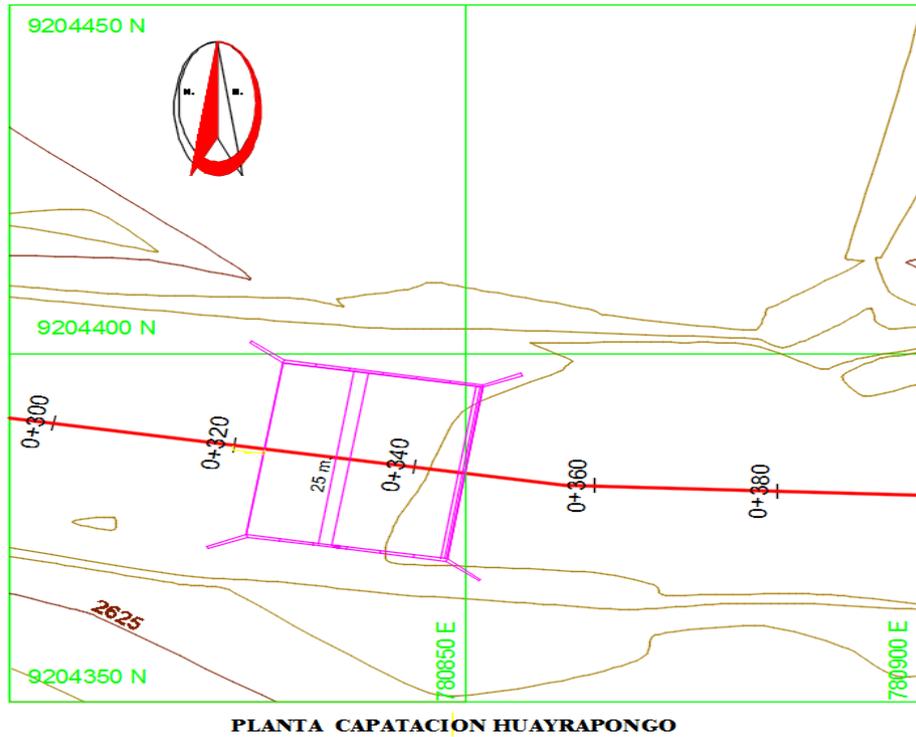


Figura N° 16. Levantamiento topográfico de lugar de emplazamiento de captación Huayrapongo. Fuente: Expediente técnico – Municipalidad Distrital de Baños del Inca (2010).

- De la información topográfica y las mediciones obtenidas en campo se determinó que en la sección donde se emplazó la estructura de captación Huayrapongo, el ancho natural del río fue de 54 m, en condiciones iniciales del cauce del río, con un lecho natural promedio de 54 m y un ancho efectivo de la estructura de 25 m.

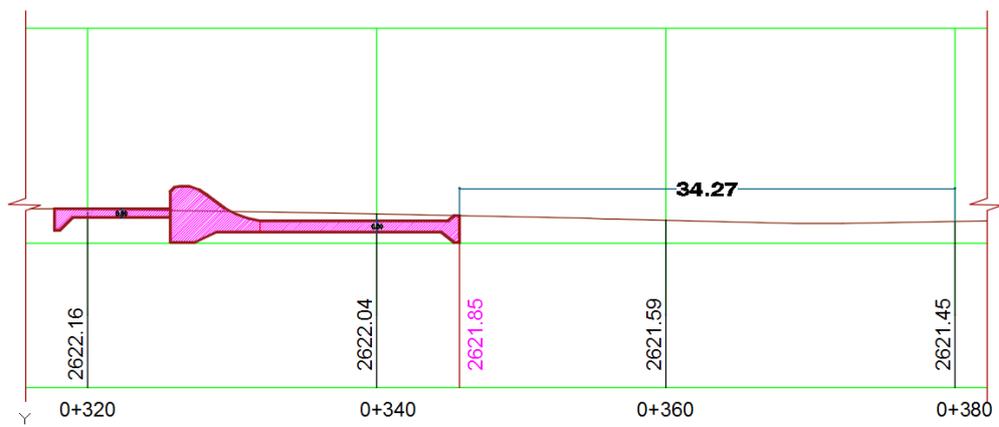


Figura N° 17. Perfil longitudinal del río agua debajo de captación Huayrapongo. Fuente: Expediente técnico – Municipalidad Distrital de Baños del Inca (2010).

La pendiente en la descarga de la estructura de captación, se lo obtuvo con el desnivel entre la cota del final de la estructura de captación y la progresiva 0+380 cuyos valores son 2621,85 y 2621,45 respectivamente en una distancia de 34,27 m. siendo ésta de 1,67%.

Para la Hidrogeología regional existente, básicamente se la tomaron de las cartas geológicas el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.

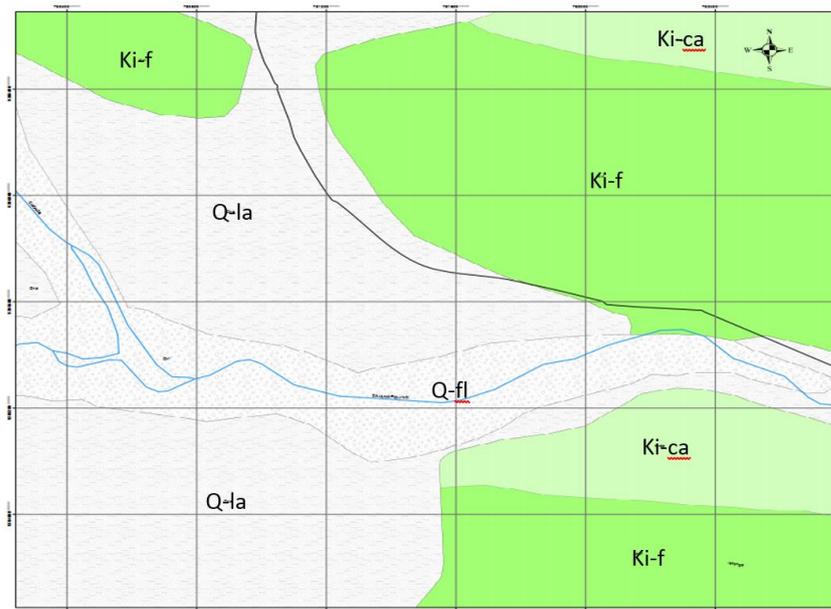


Figura N° 18. Geología Regional del área de investigación. Fuente: Ingemmet (1999).

Estratigráficamente la captación se encuentra en el Cuaternario, dentro los cuaternarios recientes FLUVIALES (Q- fl) que están representados por la acumulación de materiales transportados por cursos fluviales, depositados en el fondo y riberas de los ríos.

Estudios de mecánica de suelos del material en el lecho del río existente, se lo tomó del estudio de suelos del trabajo proyecto profesional titulado “Construcción del Viaducto del Servicio de Transitabilidad en el tramo Huayrapongo - Santa Victoria - Iscoconga, Distrito de Los Baños del Inca, Cajamarca - Cajamarca” Gutiérrez, A (2013).

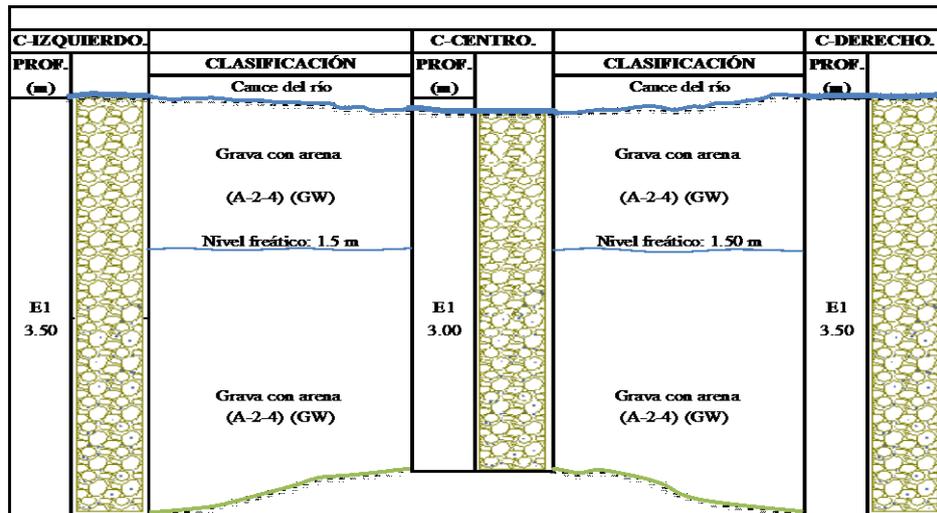


Figura N° 19. Perfil estratigráfico para la sección transversal del río.

Fuente: Gutiérrez, A (2013).

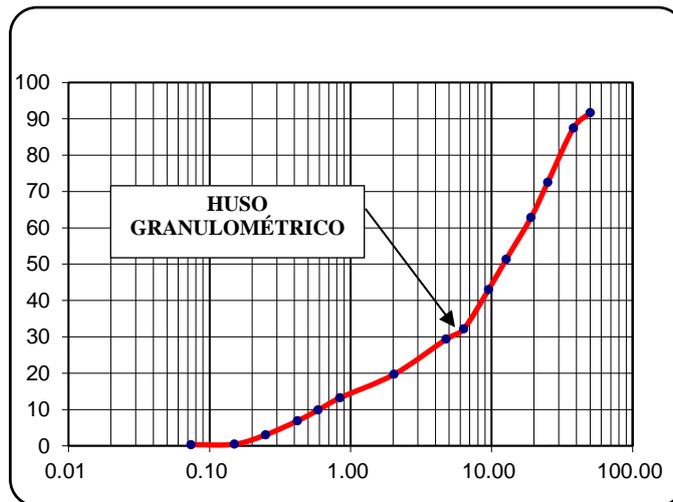


Figura N° 20. Representación de la distribución granulométrica de la calicata del centro. Fuente: Gutiérrez, A (2013).

Levantamiento de Información de campo:

Para las condiciones actuales de funcionamiento de la estructura se realizó el levantamiento topográfico de la zona de socavación, para identificar puntos críticos de la socavación de la estructura en la descarga y los valores para la calibración del Modelo físico a construir.

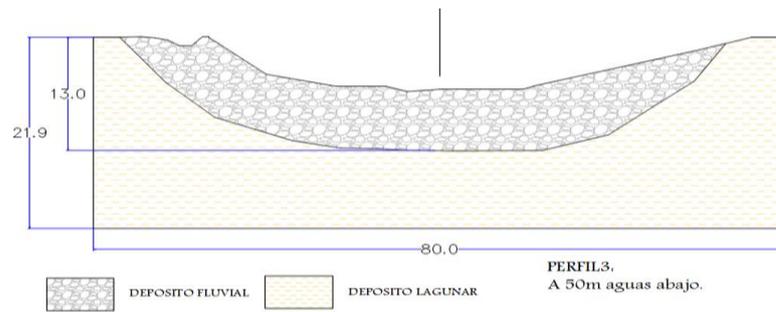


Figura N° 22. Perfiles geológicos del cauce del río en área de investigación.

Para el sedimento utilizado en el modelamiento se realizó el análisis granulométrico; se desarrollaron tres pruebas; una con arena fina graduada y dos con porcentajes de 30% y 50% de gravilla (granos de arena gruesa graduada de 4 mm de diámetro), con los resultados siguientes

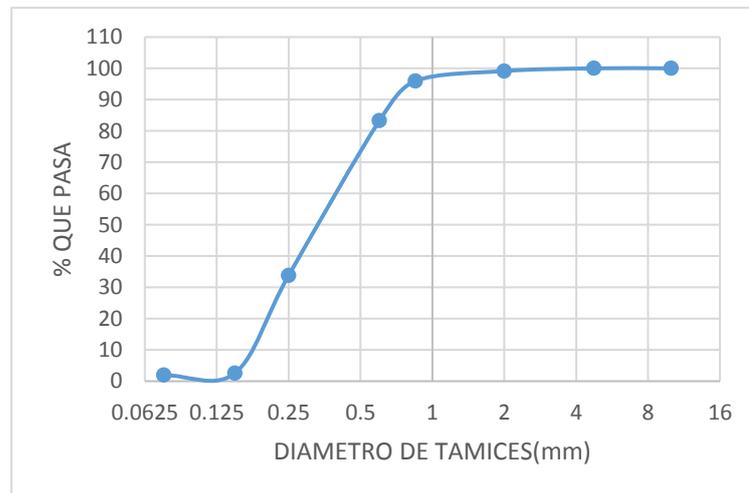


Figura N°23. Curva granulométrica para arena graduada.

La curva de ascenso presenta uniformidad, debido a la uniformidad del sedimento utilizado, por lo que el diámetro medio tiende a un valor bajo.

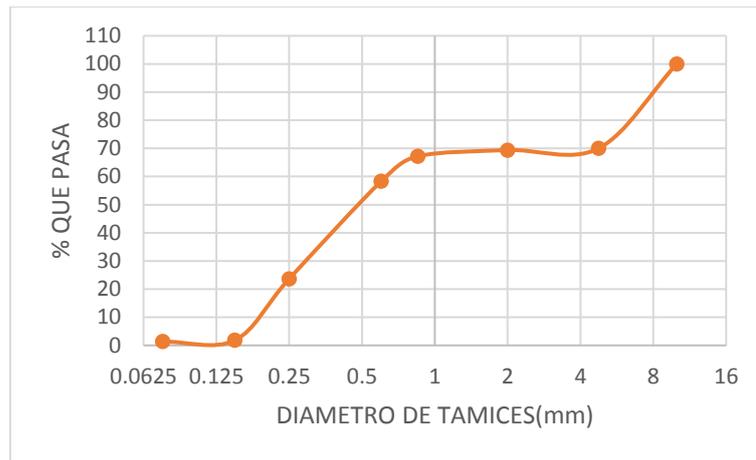


Figura N° 24. Curva granulométricas para 70% de arena fina graduada y 30% de gravilla graduada.

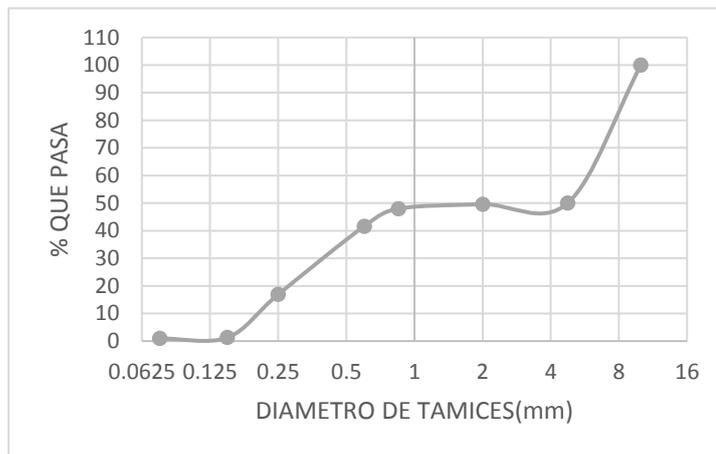


Figura N° 25. Curva granulométricas para 50% de arena fina graduada y 50% de gravilla graduada.

Para las curvas granulométricas de arenas uniformes con porcentajes de gravilla en 30% y 50% el diámetro medio tiende a aumentar y el ascenso de la curva está segmentada.

SEGUNDA ETAPA (MODELAMIENTO HIDRÁULICO):

Modelamiento Físico:

Según la ley de semejanza, las escalas de traslación de los valores del modelo a los valores del prototipo y viceversa se muestran en la tabla siguiente:

Tabla N° 03. Escalas de traslación modelo prototipo y viceversa.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	ESCALA: 1:40	ESCALA: 1:20
Longitud. Ancho, altura	L,B,H	$L_r=1/40=0,025$	$L_r=1/20=0,050$
Área	A	$L_r^2=0,000625$	$L_r^2=0,002500$
Volumen	V	$L_r^3=0,0000156$	$L_r^3=0,000125$
Tiempo	T	$L_r^{1/2}=0,1581139$	$L_r^{1/2}=0,223607$
Velocidad	V	$L_r^{1/2}=0,1581139$	$L_r^{1/2}=0,223607$
Caudal	Q	$L_r^{2,5}=0,0000988$	$L_r^{2,5}=0,000559$
Coefficiente de rugosidad	n	$L_r^{1/6}=0,5407419$	$L_r^{1/6}=0,606922$
Número de Reynolds	Re	$L_r^{3/2}=0,0039528$	$L_r^{3/2}=0,011180$

Para el modelamiento físico y matemático se trabajaron tres escenarios, dos en campo complementados con un modelamiento matemático y uno en laboratorio, con las siguientes características:

Primero: Modelo auxiliar de campo a escala 1:20 y modelo matemático a escala real, los cuales se trabajaron con dos grados de libertad, donde las paredes del canal se mantienen constantes y se va a calibrar los tirantes aguas abajo del punto de emplazamiento de la estructura para dos caudales de prueba en campo que fueron de 28 L/s. y 38 L/s.

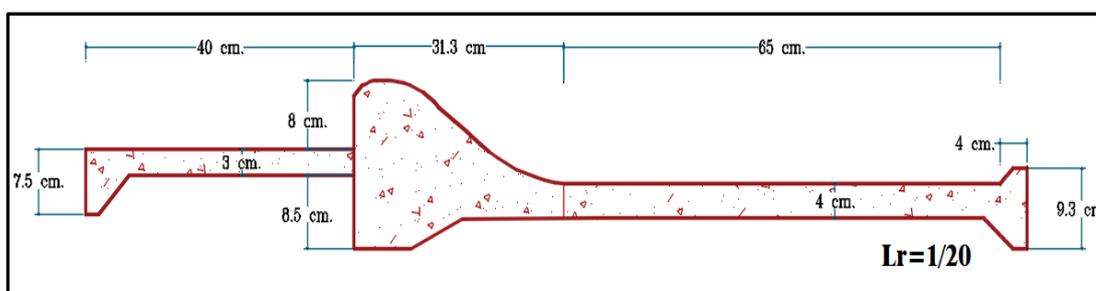


Figura N° 26. Dimensiones del perfil longitudinal del modelo de la estructura de captación Huayrapongo a escala 1:20.

Caudales de prueba para el prototipo obtenidos por similitud cinemática:

Tabla N° 4. Caudales de prueba en prototipo y modelo

Número prueba	Modelo Q(m³/s)	Prototipo Q(m³/s)	Caudales (m³/s)
01	0,028	49,62	49,62
02	0,038	67,76	67,76

Con los caudales calculados para el prototipo, utilizando modelamiento matemático con software Hec-Ras se determinaron los tirantes en el prototipo, con los que se procedió a calibrar la pendiente del modelo.

Tabla N° 5. Tirantes del prototipo modelados matemáticamente.

PARA CAUDAL DE PROTOTIPO $Q=67,76 \text{ m}^3/\text{s}$.						
	PROTOTIPO (HECRAS)				MODELO(E: 1:20)	
Progresiva sección	Cuadal Q_p (m^3/s)	min. Elev. (m)	lamina agua (m)	Tirante máx. (m)	Tirante máx. (cm)	Cuadal Q_m (L/s)
360	67,76	2621,57	2622,84	1,27	3,17	38
340	67,76	2621,45	2622,77	1,32	3,30	38
320	67,76	2621,37	2622,60	1,23	3,08	38
300	67,76	2621,19	2622,57	1,38	3,45	38
280	67,76	2621,20	2622,48	1,28	3,20	38
Pendiente aproximada en modelo físico para conseguir estos caudales = 3%						

PARA CAUDAL DE PROTOTIPO $Q=49,62 \text{ m}^3/\text{s}$						
	PROTOTIPO (HECRAS)				MODELO(E: 1:20)	
Progresiva sección	Cuadal Q_p (m^3/s)	min. Elev. (m)	lamina agua (m)	Tirante máx. (m)	Tirante máx. (cm)	Cuadal Q_m (L/s.)
360	49,62	2621,57	2622,66	1,09	2,7	28
340	49,62	2621,45	2622,60	1,15	2,9	28
320	49,62	2621,37	2622,44	1,07	2,7	28
300	49,62	2621,19	2622,41	1,22	3,0	28
280	49,62	2621,20	2622,33	1,13	2,8	28
Pendiente aproximada en modelo físico para conseguir estos caudales = 3%						

En la primera calibración se determinó la pendiente a ser utilizada en el modelo, para dos grados de libertad (el tirante normal aguas abajo y la pendiente de dicho cauce).

La pendiente del cauce para el modelamiento obtenida por tanteos, luego de tres ensayos por caudal de prueba es del 3%.

Segundo: Modelamiento en campo para el tercer grado de libertad (material de lecho) el cuál se desarrolló en un modelo en campo a escala de 1:40, debido que el modelamiento final en laboratorio en el canal de pendiente variable tiene la misma escala.

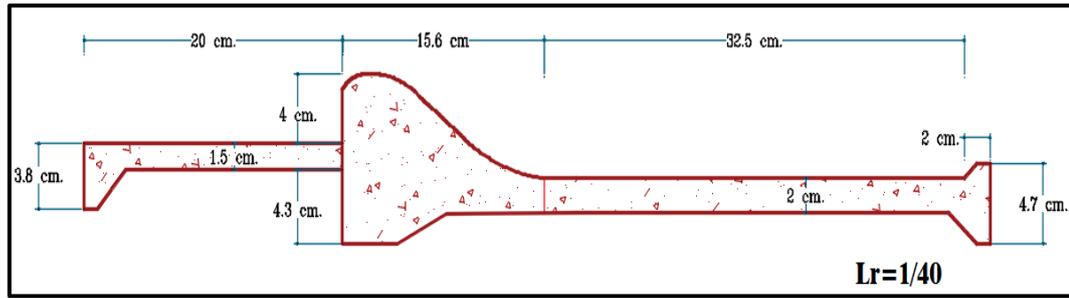


Figura N° 27. Dimensiones del perfil longitudinal del modelo físico de la estructura de captación Huayrapongo a escala 1:40.

Primero se calculó en el canal de pendiente variable, el caudal máximo de prueba, asumiendo uniformidad en la carga sobre el vertedero (H), se tienen que para conseguir la carga máxima posible del prototipo de 2,10 m. (5,25 cm. en modelo E:1:40) en el canal de pendiente variable de 23 cm de ancho de solera $q=6,36$ L/s; dicha carga en el modelo físico para el ancho actual del prototipo de 30 m. (75 cm en modelo E: 1:40) $Q_m=(75/23)*6,36$ L/s = 20,75 L/s.

Dicho caudal de prueba en el prototipo representará:

$$Q_p = (L_r)^{5/2} * Q_m = \left(\frac{40}{1}\right)^{5/2} * 0,02075 = 210 \frac{m^3}{s}.$$

Este caudal calculado es inferior al de diseño 250 m³/s. Según expediente técnico.

Los datos del prototipo se obtienen del análisis granulométrico del material del lecho del río presentado en la figura N° 20, se tiene que el D50=13 mm. y de la información de campo la profundidad máxima de socavación para el caudal máximo de prueba (210 m³/s) es de 3,22 m.

En el modelo físico a escala 1:40 con el caudal máximo de prueba resultante es de 20,75 L/s. y una pendiente de fondo de 3% conseguido en la calibración anterior, se determinó que la similitud con el prototipo se cumplirá para una profundidad de socavación de 8,05 cm en el modelo, para lo que se ensayaron con los tres tipos de material analizados en las figuras N° 23, 24 y 25, obteniéndose los resultados siguientes:

Tabla N° 6. Profundidad de socavación en modelo de campo:

Material	D50	Prof. de socavación
ARENA	0,35 mm.	12,4 cm.
70% Arena + 30% Gavilla	0,50 mm.	8,3 cm.
50% Arena + 50% Gavilla	1,50 mm.	5,6 cm.

Se interpola el porcentaje de para conseguir una profundidad de socavación 8,05 cm. encontrándose que dicho porcentaje de gravilla es 32%.

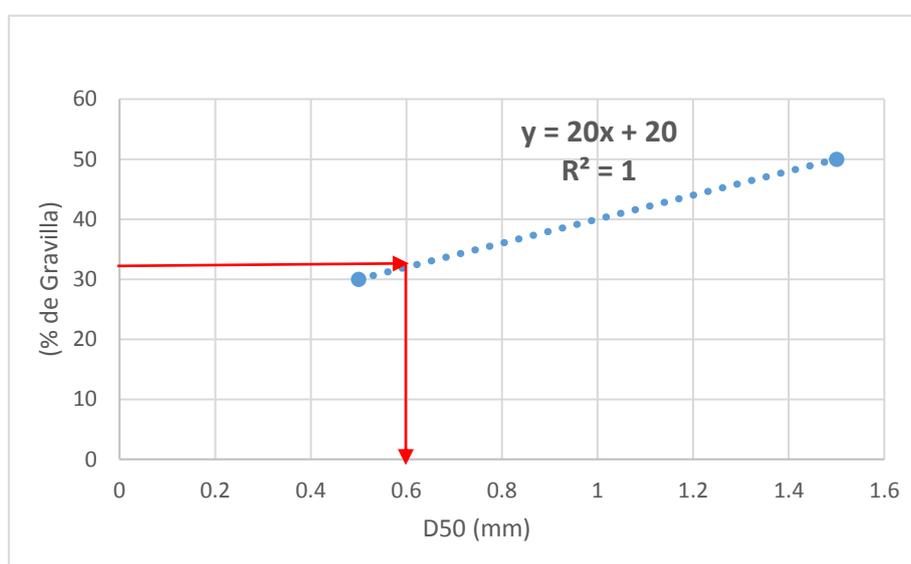


Figura N° 28. % Gravilla vs. D50 (sedimento para modelo en laboratorio).

Por lo que el material a utilizado en el modelo para laboratorio tuvo una concentración del 32% de gravilla graduada y 68% de arena fina, con un D50 = 0.6 mm.

Tercero: Modelamiento en Laboratorio utilizando un canal de pendiente variable, para la información de los dos escenarios anteriores.

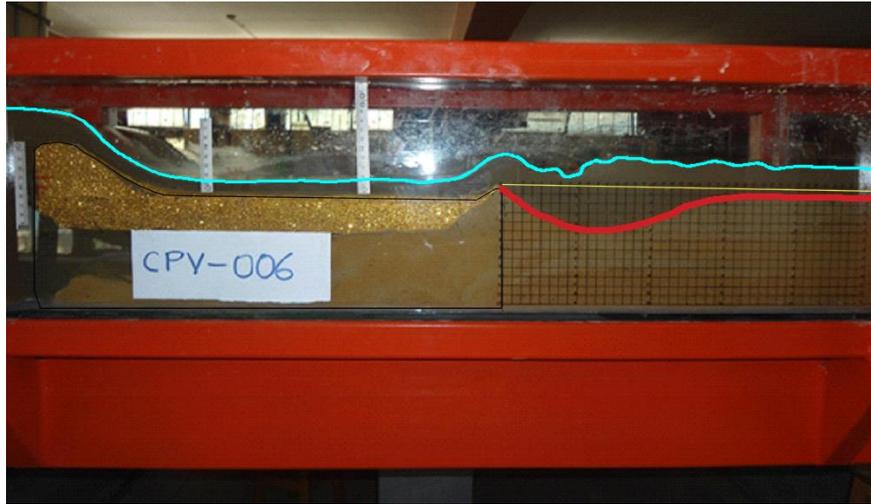


Figura N° 29. Modelamiento en laboratorio.

El proceso de erosión y socavación en el modelo hidráulico en laboratorio, se representa en las cuatro etapas según la variación temporal de la prueba.

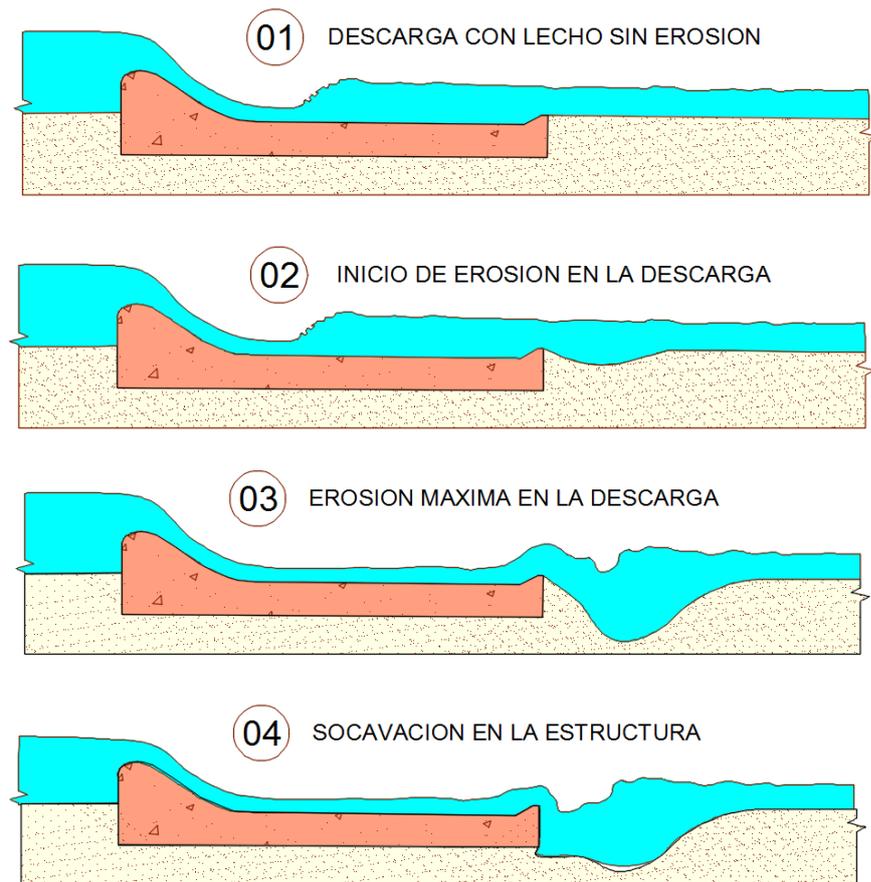


Figura N° 30. Proceso de socavación en laboratorio en la descarga de captación.

En primer lugar se calibró el canal de pendiente variable con una ancho de solera de 23 cm, para la estructura de captación a escala 1:40 para las condiciones de similitud

obtenidas anteriormente, se procedió a realizar las pruebas de laboratorio, en el canal de pendiente variable, para 20 caudales diferentes tomados aleatoriamente, según la capacidad de las electrobombas conectadas en el sistema de alimentación, obteniéndose los resultados siguientes:

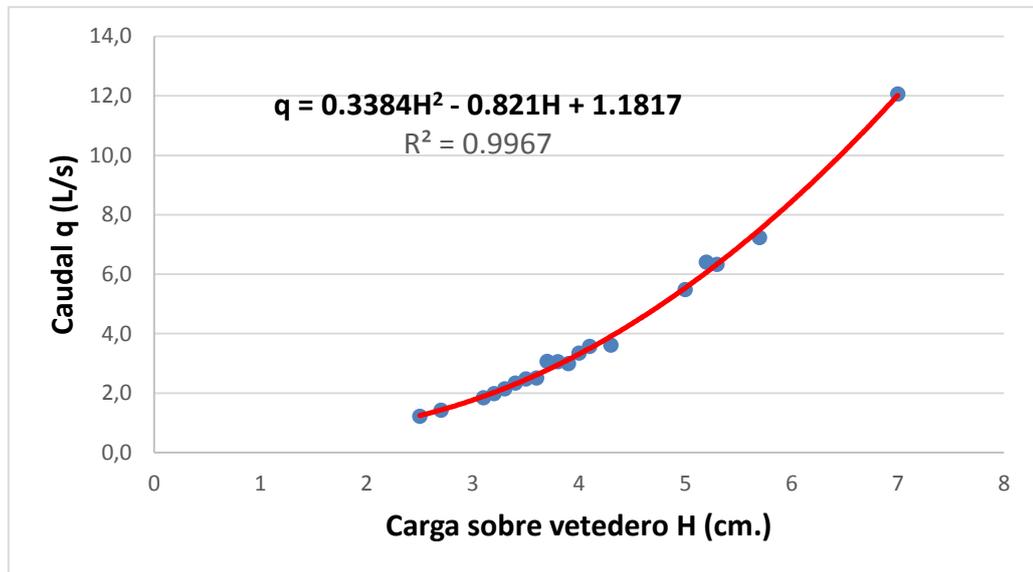


Figura N° 31. Curva de ajuste de la carga y el caudal sobre vertedero del modelo en laboratorio.

La tendencia polinómica del caudal está influenciada por el efecto natural de la curva de remanso que se forma aguas arriba de la estructura de captación; para los caudales modelados, se puede visualizar que los tirantes se encuentran sobre y por debajo del tirante 5,25 cm. que fue encontrado para el caudal de prueba.

Para encontrar los anchos en de la estructura conocidos las cargas antes del vertedero y el caudal que lo genera en el canal de pendiente variable, es necesario conocer el coeficiente de descarga de la fórmula general de vertederos de pared gruesa, se presentan los siguientes resultados:

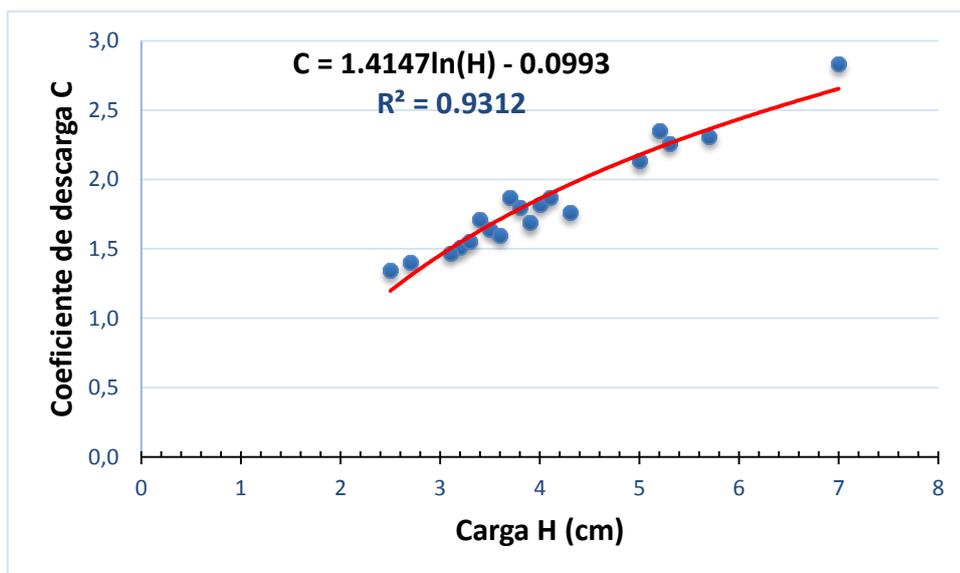


Figura N° 32. Curva de ajuste de la carga con el coeficiente de descarga para el modelo en laboratorio.

El gráfico nos muestra que el coeficiente de descarga en el vertedero de pared gruesa es variable y no constante como es asumido generalmente en diseño.

Para los 20 caudales de prueba, medimos las cargas hidráulicas “H” en el vertedero se determina los coeficientes de descarga; con dichos coeficientes de descarga se procede a determinar los anchos “B” de la estructura de captación para el caudal de prueba de 20,75 L/s.

$$Q = C \cdot H^{3/2} \cdot B, \text{ entonces: } B = \frac{Q}{C \cdot H^{3/2}}$$

Tabla N° 7. Anchos de estructura de captación.

N de prueba	Coeficiente C	Tprom. tp (s)	Volumen V (L)	Caudal Q (L/s)	Carga H (cm)	Ancho B (cm)
1	1,91	5,24	22	4,20	4,5	113,6
2	1,34	18,02	22	1,22	2,5	390,9
3	1,51	11,09	22	1,98	3,2	240,5
4	1,87	6,52	20	3,07	3,7	155,6
5	1,56	9,32	20	2,15	3,3	222,3
6	1,82	5,97	20	3,35	4,0	142,5
7	2,35	3,12	20	6,41	5,2	74,5
8	2,83	1,66	20	12,07	7,0	39,6
9	1,40	15,39	22	1,43	2,7	333,7
10	1,47	11,93	22	1,84	3,1	258,7
						Va.....

Viene.....						
11	1,71	8,91	22	2,47	3,4	193,3
12	1,76	6,09	22	3,61	4,3	132,1
13	2,31	3,04	22	7,23	5,7	66,0
14	1,64	8,89	22	2,48	3,5	192,8
15	1,60	13,85	22	1,59	3,6	189,8
16	1,69	11,97	22	1,84	3,9	159,6
17	1,80	7,19	22	3,06	3,8	155,9
18	1,87	6,15	22	3,58	4,1	133,4
19	2,13	4,01	22	5,49	5,0	87,0
20	2,26	3,47	22	6,34	5,3	75,3

Al tener diferentes anchos “B” de la estructura de captación en el modelo, se tienen diferentes características en la socavación, como se indica en la tabla N° 8.

Tabla N° 8. Longitud, Profundidad y Tiempos de la socavación máxima en modelo de laboratorio de captación.

N de prueba	Caudal Q (L/s)	Carga H (cm)	Ancho B (cm)	Tirante Yn (cm)	Prof. Max. Ps (cm)	Long. Max. Ls (cm)	Tiempo. Max. T (min)
1	4,20	4,5	113,6	3,0	5,8	42,0	12,0
2	1,22	2,5	390,9	1,5	2,1	10,5	7,0
3	1,98	3,2	240,5	2,3	3,5	14,0	8,0
4	3,07	3,7	155,6	1,9	5,0	26,0	10,0
5	2,15	3,3	222,3	2,4	4,0	16,4	9,0
6	3,35	4,0	142,5	2,4	5,5	35,5	11,0
7	6,41	5,2	74,5	4,6	7,5	49,0	14,0
8	12,07	7,0	39,6	5,8	12,3	70,0	18,0
9	1,43	2,7	333,7	3,0	2,8	12,4	7,0
10	1,84	3,1	258,7	2,2	3,2	14,0	9,0
11	2,47	3,4	193,3	2,2	4,9	20,0	10,0
12	3,61	4,3	132,1	3,0	5,8	42,1	11,0
13	7,23	5,7	66,0	4,9	8,1	55,4	15,0
14	2,48	3,5	192,8	3,0	4,1	21,2	10,0
15	1,59	3,6	189,8	3,0	4,4	21,5	11,0
16	1,84	3,9	159,6	3,0	5,0	27,5	11,0
17	3,06	3,8	155,9	2,3	4,8	28,0	11,0
18	3,58	4,1	133,4	2,9	5,1	42,0	12,0
19	5,49	5,0	87,0	4,6	7,3	47,0	13,0
20	6,34	5,3	75,3	4,8	8,1	51,0	14,0

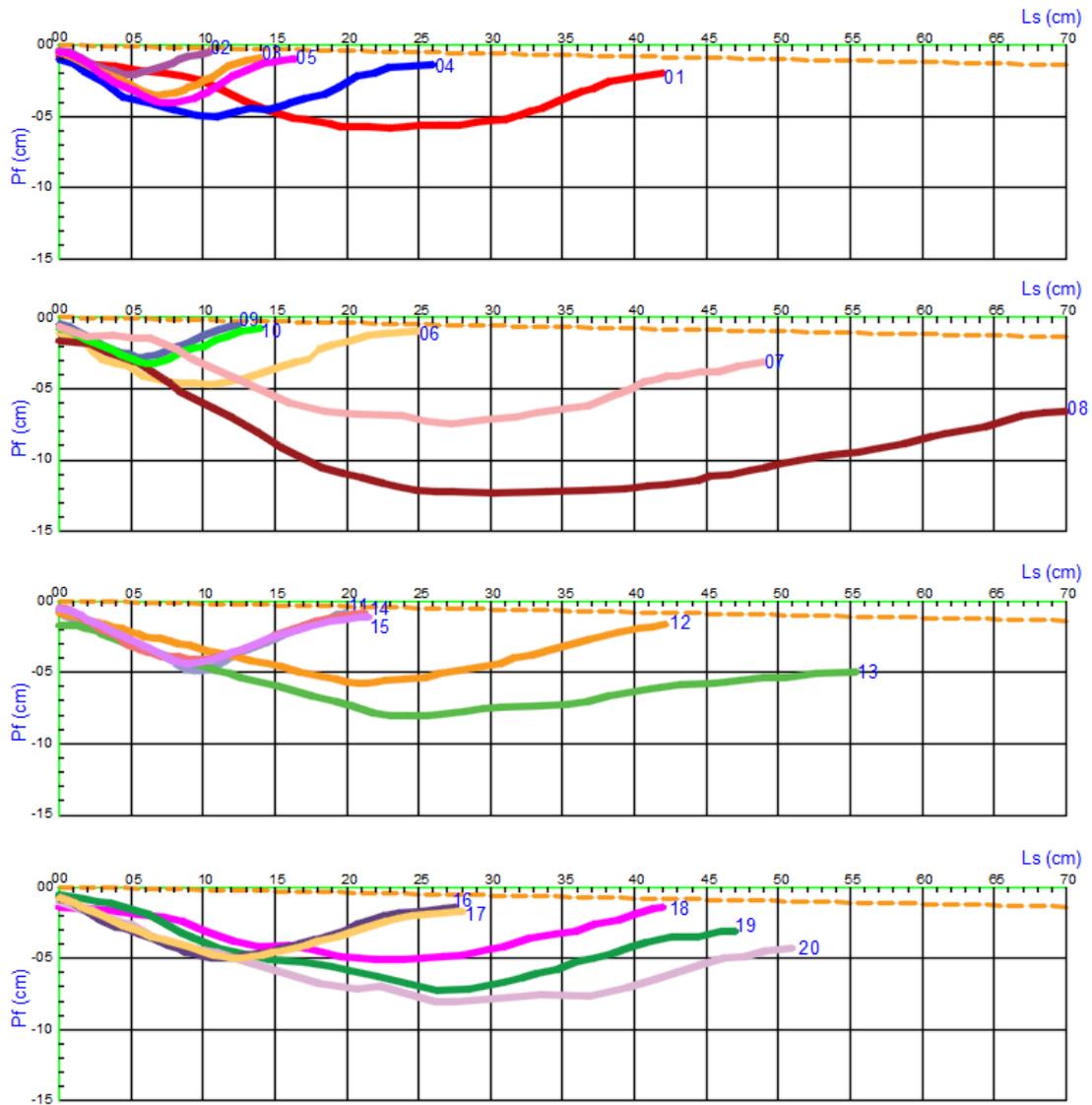


Figura N° 33. Perfiles longitudinales de erosión en la descarga de captación.

Los perfiles de erosión involucran la erosión local y la general, con una forma parabólica, hasta alcanzar la máxima profundidad de erosión, incrementando la erosión general en el cauce mientras el caudal aumenta como se puede notar entre los valores extremos de los perfiles para las pruebas 2 y el 8.

TERCERA ETAPA (COMPATIBILIZACION Y CONFIABILIDAD):

Compatibilización:

- Paredes de canal en laboratorio son de vidrio, por lo que es compatible dicho material ya que cumplió con la similitud en la obtención de la carga de agua en vertedero tipo cimacio; coeficiente de rugosidad de Manning en el modelo

$\eta_m = 0,009$ (en laboratorio para vidrio), corresponde a un equivalente en prototipo de $\eta_p = 0,017$ (para muros de concreto encofrado).

- Luego se procedió a verificar la similitud entre Modelo de laboratorio y Prototipo para LECHOS MOVILES, para lo que se encuentran los parámetros característicos como son los índices de Froude y de Reynolds del sedimento. Para las condiciones siguientes:
- El modelamiento se lo realizó para condiciones de aguas claras.
- La similitud se la verifica para las condiciones del caudal de prueba y de calibración final modelo – prototipo.

Obteniéndose los resultados siguientes:

Tabla N° 9. Cortante adimensional de Froude para prototipo y modelo.

ESTRUCTURA	CORTANTE ADIMENSIONAL (INDICE DE DENSIDAD DE FROUDE)							
	Temperatura (°C)	γ (gr/cm ³)	Yn (cm)	Ds (cm)	τ (gr/cm ²)	S (cm/cm)	γ_s (gr/cm ³)	Fs*
PROTOTIPO	20	1	199	1,3	3,184	0,016	2,65	1,4844
MODELO	20	1	4,9	0,06	0,147	0,03	2,65	1,4848

Tabla N° 10. Número de Reynolds de la partícula del sedimento para prototipo y modelo.

ESTRUCTURA	NUMERO DE REYNOLDS DE LA PARTICULA DEL SEDIMENTO						
	Temperatura (°C)	v (cm ² /s)	Yn (cm)	Ds (cm)	S (cm/cm)	U*(cm/s)	R*
PROTOTIPO	20	0,01007	196	1,3	0,018	58,8300	7594,7359
MODELO	20	0,01007	4,9	0,06	0,03	12,0086	71,5509

- 1) Según Maza y Alvarez (1968), se verifica la similitud sedimentológica entre modelo y prototipo puesto que el índice de densidad de Froude para modelo y Prototipo tienen el mismo valor y ambos puntos caen en el mismo tipo de fondo (antidunas) según la figura N° 2.

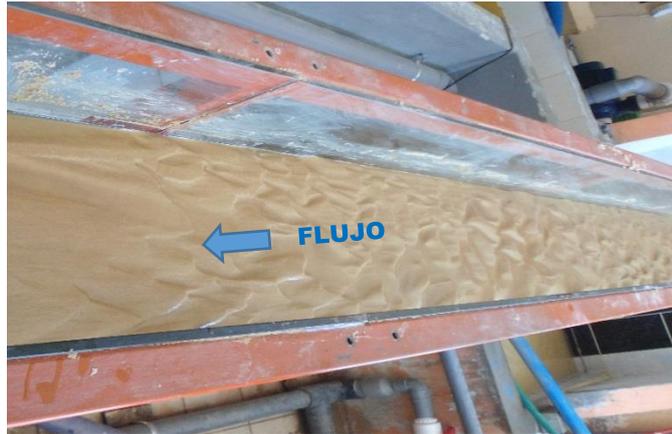


Figura N° 34. Antidunas generadas en prueba de laboratorio – canal de pendiente variable.

- 2) Según Yalin y Karahan (1979), en diagrama de Shields modificado figura N° 3, R^* para modelo y prototipo son superiores a 70, por lo que la similitud se verifica con la igualdad del índice de Froude.

Por lo tanto el modelo cumplió con las condiciones mínimas de similitud, lo que nos permite asegurar que los resultados obtenidos en el modelamiento son compatibles con los obtenidos en campo y con los proyectados para la investigación:

Confiabilidad:

Se aplicó el método de mitades partidas (Split-halves), ya que los datos obtenidos son resultado de solo una aplicación de la medición.

Se procede separar los datos de profundidad de socavación (en cm), obtenidos de en modelo físico reducido de campo, en dos mitades: datos impares y datos pares, para luego ordenarlos y así encontrar la correlación entre ellos:

Tabla N 11. Separación de datos en dos mitades.

SIN ORDENAR		ORDENADO	
impar	par	impar	par
5,8	2,1	2,8	2,1
3,5	5,0	3,5	3,2
4,0	5,5	4,0	4,1
7,5	12,3	4,4	5,0
2,8	3,2	4,8	5,0
4,9	5,8	4,9	5,1
8,1	4,1	5,8	5,5
4,4	5,0	7,3	5,8
4,8	5,1	7,5	8,1
7,3	8,1	8,1	12,3

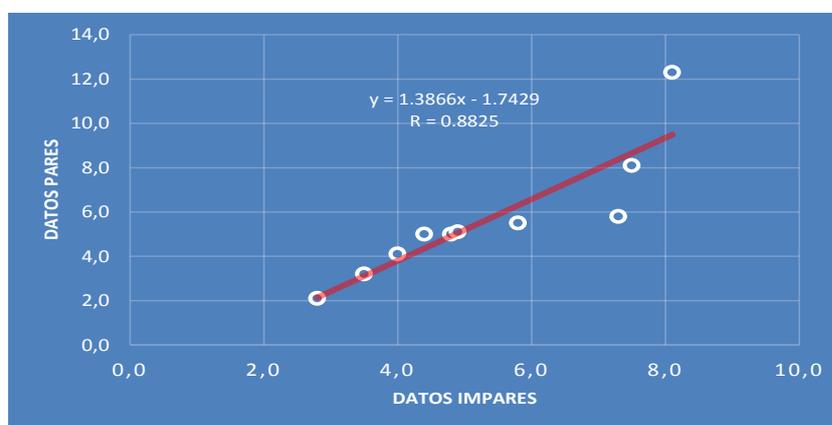


Figura N° 35. Correlación lineal por mitades de datos de laboratorio.

Observamos que los pares ordenados de valores bajos tienen una tendencia lineal muy marcada, mientras que los pares ordenados de valores altos tienen un comportamiento variado, predominando el ajuste lineal con un coeficiente de correlación es: $r_{hh}=0,8825$.

Aplicando la ecuación N° (17), determinamos el coeficiente de Spearman Brow, cuyo valor es: $r_{tt}=0,94$, por lo que se tiene que la confiabilidad de los datos medidos es del 94%, según la Interpretación en la tabla N° 2, se tiene un coeficiente de confiabilidad Elevado.

CUARTA ETAPA (APLICACIÓN AL PROTOTIPO):

Compatibilizados los datos obtenidos en laboratorio y analizada su confiabilidad se procedió a llevar esta información al Prototipo (Captación de agua Huyrapongo):

Tabla N° 12. Profundidad máxima de socavación en prototipo.

N de prueba	Caudal Q (m³/s)	Carga H (m)	Ancho B (m)	Prof. Max. Ps (m)
1	210,0	1,80	45,43	2,32
2	210,0	1,00	156,34	0,84
3	210,0	1,28	96,19	1,40
4	210,0	1,48	62,23	2,00
5	210,0	1,32	88,94	1,60
6	210,0	1,60	56,98	2,20
7	210,0	2,08	29,78	3,00
8	210,0	2,80	15,82	4,92
9	210,0	1,08	133,50	1,12
10	210,0	1,24	103,50	1,28
11	210,0	1,36	77,34	1,96
12	210,0	1,72	52,82	2,32
13	210,0	2,28	26,40	3,24
14	210,0	1,40	77,12	1,64
15	210,0	1,44	75,93	1,76
16	210,0	1,56	63,84	2,00
17	210,0	1,52	62,37	1,92
18	210,0	1,64	53,37	2,04
19	210,0	2,00	34,80	2,92
20	210,0	2,12	30,13	3,24

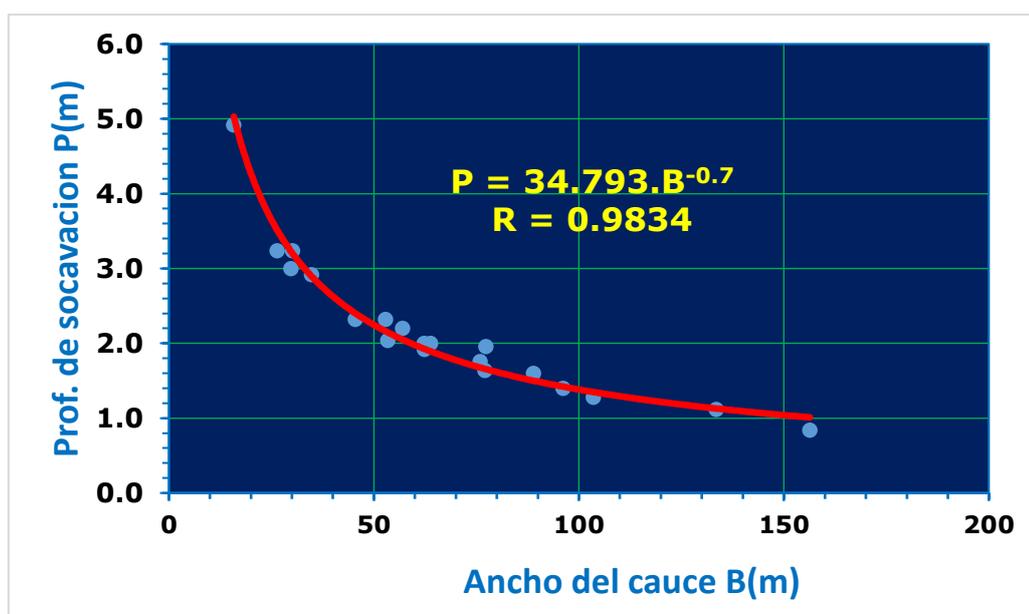


Figura N° 36. Ancho del cauce versus profundidad máxima de socavación en la descarga de la estructura de captación.

Se visualiza que la profundidad de socavación disminuye al incrementar el ancho de la estructura de captación, puesto que el poder erosivo de las aguas es reducido al disminuir la energía cinética del agua, en la salida de la estructura.

Constructivamente los anchos de las estructuras de captación variaría de 5m en 5 m., por lo que considerando que en la sección donde se emplaza la captación de agua Huayrapongo el ancho natural es de 54 m., los anchos de la estructura de captación podrían ser 50 m, 45 m, 40 m, 35 m, 30 m. y 25 m. para los que se desarrollaron los análisis siguientes:

- a) Variación de la Profundidad de socavación en la descarga de la captación de agua Huayrapongo por efecto de la contracción del cauce:

Tabla N° 13. Influencia de la contracción del cauce en la profundidad de socavación.

PROTOTIPO (Captación Huayrapongo)				
Ancho de la estructura (B)	Contracción del cauce ($\Delta\%$)	Profundidad máxima de socavación (Ps)	Incremento de la Prof. de socavación	
			(m)	(%)
54 m	0,0 %	-2,13 m	0,00	0,0
50 m	7,4 %	-2,25 m	0,12	5,5
45 m	16,7 %	-2,42 m	0,29	13,6
40 m	25,9 %	-2,63 m	0,50	23,4
35 m	35,2 %	-2,89 m	0,76	35,5
30 m	44,4 %	-3,22 m	1,09	50,9
25 m	53,7 %	-3,66 m	1,52	71,4



Figura N° 37. Variación de la profundidad de socavación para diferentes porcentajes de contracción del cauce.

Del gráfico se visualiza que la profundidad de erosión para condiciones normales, considerando solamente el efecto de cambio de rigidez de los materiales de la estructura y el lecho del río sin considerar la contracción del cauce es incrementada en forma proporcional a la contracción del cauce.

- b) Variación de la longitud máxima de socavación en la descarga de la captación de agua Huayrapongo por efecto de la contracción del cauce:

Tabla N° 14. Influencia de la contracción del cauce en la longitud máxima de socavación.

PROTOTIPO (Captación Huayrapongo)				
Ancho de la Estructura (B)	Contracción del cauce (Δ%)	Longitud máxima de poza de socav. (L)	Incremento de la longitud máx. de Socavación	
			(m)	(%)
54 m	0,0 %	14,0 m	0,0	0,0
50 m	7,4 %	15,1 m	1,1	7,7
45 m	16,7 %	16,5 m	2,5	17,9
40 m	25,9 %	18,0 m	4,0	28,7
35 m	35,2 %	19,6 m	5,6	40,1
30 m	44,4 %	21,3 m	7,3	52,1
25 m	53,7 %	23,1 m	9,1	64,8



Figura N° 38. Variación de la longitud máxima de socavación para diferentes porcentajes de contracción del cauce.

El efecto de ángulo de reposo del tipo de material que compone el lecho (material no cohesivo) sumado a la erosión general del cauce por la naturaleza del río, genera también un incremento proporcional en la longitud de la poza de erosión aguas abajo de la estructura, lo que conlleva a incrementar la profundidad de erosión y por tanto la socavación de la estructura.

- c) Variación del tiempo que demora en generarse la máxima de socavación en la descarga de la captación de agua Huayrapongo por efecto de la contracción del cauce:

Tabla N° 15. Influencia de la contracción del cauce en el tiempo de socavación.

PROTOTIPO (Captación Huayrapongo)				
Ancho de la Estructura (B)	Contracción del cauce ($\Delta\%$)	Tiempo de socavación (T)	Incremento del tiempo de Socavación	
			(min)	(%)
54 m	0,0 %	70,7 min	0,0	0,0
50 m	7,4 %	73,0 min	2,3	3,2
45 m	16,7 %	76,3 min	5,5	7,8
40 m	25,9 %	80,0 min	9,3	13,2
35 m	35,2 %	84,6 min	13,8	19,6
30 m	44,4 %	90,1 min	19,4	27,4
25 m	53,7 %	97,2 min	26,4	37,3



Figura N° 39. Variación del tiempo de socavación para diferentes porcentajes de contracción del cauce.

De la representación gráfica se concluye que el tiempo que demora en estabilizar el lecho está relacionado con la contracción del cauce, a mayor contracción de cauce mayor será el tiempo en estabilizar el lecho ya que mayor será el volumen de material a mover que está a mayor profundidad.

- d) Relación entre la contracción del cauce en porcentaje con la profundidad de socavación en metros, con respecto al ancho natural del río (54 m.) en la sección donde se emplaza la captación de agua Huayrapongo:

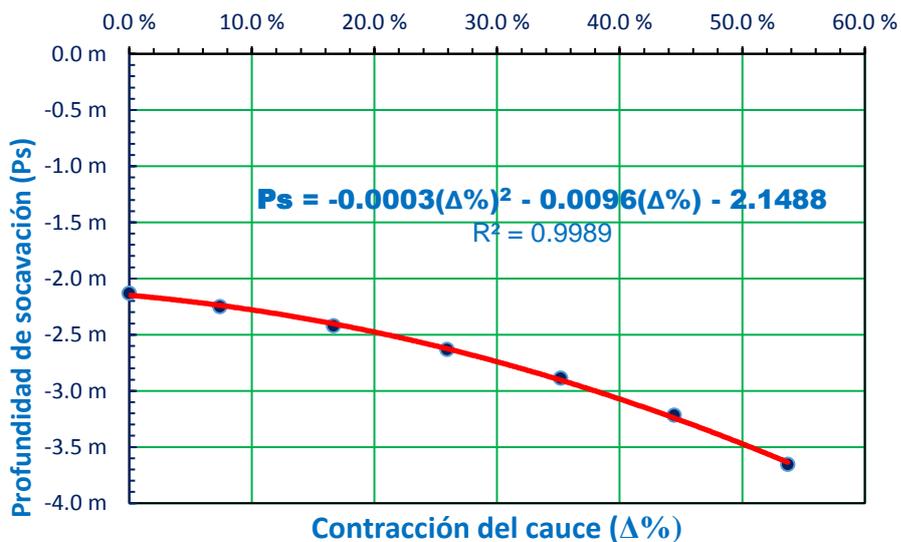


Figura N° 40. Contracción del cauce versus profundidad de socavación.

DISCUSION DE RESULTADOS:

Los cambios de rigidez entre la poza disipadora de energía y el material del lecho del río constituye el efecto natural de socavación en la descarga de la estructura, pero es el incremento de la energía cinética de las aguas que descargan en el lecho del río lo que incrementa las condiciones de formación de la fosa de socavación aguas abajo de la estructura, ya que a mayor contracción del cauce, se incrementan las velocidades de flujo y por lo tanto se incrementa también la longitud de la poza de erosión y el tiempo para que los sedimentos alcancen su estabilidad en el fondo que conllevan al incremento obligado de la profundidad de socavación. Nácher (2012) en su investigación de efectos de contracción para puentes sobre cauces de ríos, obtiene ajustes lineales con un valor muy alto del coeficiente de regresión, a diferencia de la presente investigación donde el ajuste polinomial de segundo orden es el que tiene un mayor coeficiente de regresión.

CONTRASTACION DE HIPOTESIS

Hipótesis planteada: $R \neq 0$. Existe correlación.

Hipótesis alterna: $R = 0$. No existe correlación.

Tabla N° 16. Valores para prueba de contrastación de Hipótesis.

Número de datos	n =	7,000
Coef. - correl.	R =	0,990
T - calculado.	Tc =	15,693
T - tabular.	Tt =	2,571
HP		SI

Como el $T_c \gg T_t$, se acepta la hipótesis PLANTEADA, la información se ajusta a la curva Polinómica. Lo que quiere decir que a mayor contracción del cauce (menor ancho de la estructura) mayor será la profundidad de socavación. Por lo que se puede concluir que para la captación de agua Huayrapongo en el río Cajamarquino, la contracción del cauce afecta directamente a la profundidad de socavación en la descarga de la estructura.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

1. La profundidad máxima de socavación en la descarga de la captación Huayrapongo en el río Cajamarquino, se incrementa desde 5,5% hasta 71,4% para contracciones del cauce natural de 7,4% al 53,7%.
2. Longitudinalmente la profundidad de socavación en la descarga de la estructura de captación Huayrapongo varía en forma parabólica, incrementando las longitudes de la poza de socavación de 7,7% hasta 64,8% para contracciones del cauce natural de 7,4% hasta 53,7%.
3. El tiempo necesario para alcanzar la socavación máxima en la descarga de la estructura de captación, es variable para diferentes porcentajes de contracción; incrementándose desde 3,2% hasta 37,3% para contracciones del cauce natural de 7,4% al 53,7%.
4. El grado de influencia de la contracción del cauce del río en la profundidad de socavación en la descarga de la estructura de captación Huayrapongo es muy elevado, incrementándose en una forma polinómica, mediante la ecuación:

$$P_s = 0,0003(\Delta\%)^2 + 0,0096(\Delta\%) - 2,1488$$

Recomendaciones:

1. La profundidad de socavación en un cauce de río por cambios de rigidez por presencia de estructuras hidráulicas, adicionado a la contracción del cauce natural, es muy compleja puesto que al hacer variar un elemento interviniente como pendiente del río y/o composición del material no cohesivo del lecho del río en el mismo punto u otros puntos de análisis la profundidad de socavación variará notablemente por lo que es importante que se generen otras investigaciones que incluyan estas y otras variables para incrementar el fundamento de diseño de estructuras de captación.
2. Se debe aplicar esta investigación a otras estructuras de captación y así tener una base de datos que en adelante podría servir para generalizar la influencia de la contracción del cauce de un río en la profundidad de socavación en estructuras de captación.
3. Una de las limitaciones de la presente investigación fue el trabajo con aguas claras debido a que no se tiene información de transporte de sedimentos en ríos, por lo que se recomienda desarrollar estudios de transporte de sedimentos en ríos con lecho no cohesivos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelhaleem, FS. 2013. Effect of semi-circular baffle blocks on local scour downstream clear-overfall weirs. *Ain Shams Engineering Journal* 4(4):675-684.
- Barbosa Gil, S. 2013. Metodología para calcular la profundidad de socavación general en ríos de montaña (lecho de gravas). Tesis Mag. Ing. Medellin Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 126 p.
- Chanson, H. 2004. Hidráulica del flujo en canales abiertos. Traducción Juan G. Saldarriaga. Bogotá, Colombia, McGraw-Hill. 560 p.
- Chow, VT. 1994. Hidráulica de canales abiertos. Traducción Juan G. Saldarriaga. Santafé de Bogotá, Colombia, McGraw-Hill. 664 p.
- Dal Ré Tenreiro, R. 2003. Pequeños embalses de uso agrícola. España, Mundi Prensa. 389 p.
- Ettema, R. 2000. Hydraulic modeling: Concepts and practice. United States of America. American Society of Civil Engineers. 390 p (II Series ASCE Manual and Reports on Engineering Practice N° 97).
- Ettmer, B., Ancieta, C. A. A., & Bernini, P. R. 2009. Erosión cerca de estructuras hidráulicas – predicción y leyes de similitud en modelos hidráulicos. *México, Ingeniería Hidráulica en México* 24(4):23-36.
- Farhoudi, J., & Shayan, H. K. 2014. Investigation on local scour downstream of adverse stilling basins. *Ain Shams Engineering Journal* 5(2):361-375.
- French, R. H. 1993. Hidráulica de canales abiertos. Traducción M.I. Ariel Friedman. Mexico, McGraw-Hill. 724 p.
- Fuentes Aguilar, R. 2002. Modelos Hidráulicos: Teoría y diseño. Santiago, Chile, Dolmen. 274 p.
- Gamarra, G. 2008. Estadística e Investigación. Lima, Perú, San Marcos. 205 p.
- Gutiérrez Peregrino, A. 2013. Creación del Servicio de Transitabilidad en el tramo Huayrapongo - Santa Victoria - Isoconga, Distrito de Los Baños del Inca, Cajamarca - Cajamarca. Tesis Ing. Civil Cajamarca, UNC. 230 p.

Hjulstrom, F. 1939. Transportation of detritus by moving water: Part 1. Transportation: 5-31. Extraído de: <https://scholar.google.com.pe/Hjulstrom-1939-archives.datapages.com>.

Ingemmet, 1999. Carta Geológica Nacional del Perú (en línea). Lima, P, INGEMMET. Consultado 10 dic. 2015. Disponible en <https://www.google.com.pe/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#q=cartas%20geologicas%20ingemmet>

Jaramillo Acuña, VM. 2013. Estudio de socavación en el tercer puente sobre el río Cautín en Temuco. Tesis de grado. Valdivia Chile, Universidad Austral de Chile. 126 p.

Jiménez Castañeda, AA. 2005. Estudio de Socavación en la Descarga de un canal. México DF, Instituto de Ingeniería UNAM. 51 p. (Serie del Instituto de ingeniería no. CI-27).

Martinez Marín, M. 2001. Hidráulica Fluvial: Principios y Práctica. 1ª Edición. Madrid, España, Bellisco. 382 p.

Maza Álvarez, J.A y Springall, R. 1968. Modelos fluviales de fondo móvil y su calibración. México, DF, Instituto de Ingeniería, 20 p.

Nácher Rodríguez, B. 2012. Influencia de la contracción y de los cambios de rigidez del lecho en las condiciones críticas de inicio del movimiento aguas debajo de puentes sobre cauces. Tesis Fin de Máster. Valencia España, Universidad de Valencia. 121 p.

Osornio Alegre, E. 2008. Socavación en pilas y estribos del puente Cuate II nueva Italia – Arteaga Km. 160.312. Tesis de Maestría. Morelia México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 134 p.

Rocha Felices, A. 1998. Introducción a la Hidráulica Fluvial. Lima, Perú, Ingeniería. 270 p.

Rosel Calderón, CA. 1998. Irrigación. Lima, Perú, Ingeniería. 309 p. (Serie Ingeniero Civil no. 5).

Shields, A. 1936. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenz Forschung auf die Geschiebebewegung. Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau. Berlin, Germany. 26 p.

Vergara Sánchez, MA. 1995. Técnicas de Modelación en Hidráulica. México, DF, Alfaomega. 294 p.

Whittaker, J. G. (1984). Scour Related to Energy Dissipaters for High Head Stmctures. Ziirich. 73 p. Extraído de: http://people.ee.ethz.ch/~vawweb/vaw_mitteilungen/073/073_g.pdf

Yalin, M.S. 1971. Theory of hydraulic models (Vol. 1). London, Macmillan 266 p. Disponible en: <http://library.wur.nl/WebQuery/groenekennis/976193>.

APENDICES

APENDICE N° 1

Ficha de recolección de datos de pruebas en laboratorio.

FICHA DE DATOS (Canal de Pendiente Variable)					CODIGO:																		
MODELO HIDRAULICO E: 1:40					CPV-004																		
Prueba:	SOCAVACION EN LA DESCARGA DE ESTRUCTURA DE CAPTACION																						
Caudal: METODO VOLUMETRICO	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 15%;">1ª prueba</td> <td style="width: 15%;">2ª prueba</td> <td style="width: 15%;">3ª prueba</td> <td style="width: 15%;">4ª prueba</td> <td style="width: 10%;">Promedio</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">T (seg.)</td> <td style="text-align: center;">6.52</td> <td style="text-align: center;">6.57</td> <td style="text-align: center;">6.46</td> <td style="text-align: center;">6.53</td> <td style="text-align: center;">6.52</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Vol (lts)</td> <td colspan="4" style="text-align: center;">20</td> <td></td> </tr> </table>		1ª prueba	2ª prueba	3ª prueba	4ª prueba	Promedio	T (seg.)	6.52	6.57	6.46	6.53	6.52	Vol (lts)	20								
		1ª prueba	2ª prueba	3ª prueba	4ª prueba	Promedio																	
	T (seg.)	6.52	6.57	6.46	6.53	6.52																	
Vol (lts)	20																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 60%;">CAUDAL (lts/seg)</td> <td style="text-align: center;">3.07</td> </tr> </table>		CAUDAL (lts/seg)	3.07																				
CAUDAL (lts/seg)	3.07																						
Información Hidráulica:																							
Sección: RECTANGULAR Material de lecho: ARENA GRADUADA 68% + GRAVILLA 32%																							
Datos:	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <th>Unid.</th> <th>P</th> <th>H</th> <th>Y1</th> <th>Y2</th> <th>Ls</th> <th>Ps</th> <th>Y0</th> </tr> <tr> <td>cm.</td> <td>3.0</td> <td>3.7</td> <td>1.1</td> <td>4.7</td> <td>26</td> <td>5.0</td> <td>1.9</td> </tr> </table>				Unid.	P	H	Y1	Y2	Ls	Ps	Y0	cm.	3.0	3.7	1.1	4.7	26	5.0	1.9	Fotografía:		
Unid.	P	H	Y1	Y2	Ls	Ps	Y0																
cm.	3.0	3.7	1.1	4.7	26	5.0	1.9																
Tiempo max. Socavación: 10 min.																							
Tipo de Flujo:	SUPERCRITICO (Fr = 1.627 >> 1)																						
Observación:	El tipo de flujo se lo determina para la corriente aguas debajo de la estructura antes de iniciar la erosión.																						

APENDICE N° 2

Resultados del modelamiento matemático con Hec-Ras.

Tabla N° 17. Valores para Caudal máximo y Tirante máximo para modelo Hidráulico, para caudal en prototipo de 67,76 m³/s.

Progresiva sección	PROTOTIPO (HECRAS)				MODELO(E: 1:20)	
	Cuadal Qp (m ³ /s)	min. Elev. (m)	lamina agua (m)	Tirante máx. (m)	Tirante máx. (cm)	Cuadal Qm (L/s)
720	67,76	2624,71	2625,72	1,01	2,5	38
700	67,76	2624,5	2625,55	1,05	2,6	38
680	67,76	2624,18	2625,38	1,20	3,0	38
660	67,76	2623,78	2625,19	1,41	3,5	38
640	67,76	2623,34	2625,09	1,75	4,4	38
620	67,76	2623,25	2624,88	1,63	4,1	38
600	67,76	2623,25	2624,72	1,47	3,7	38
580	67,76	2623,24	2624,52	1,28	3,2	38
560	67,76	2623,16	2624,31	1,15	2,9	38
540	67,76	2622,96	2624,16	1,20	3,0	38
520	67,76	2622,79	2624,07	1,28	3,2	38
500	67,76	2622,81	2623,94	1,13	2,8	38
480	67,76	2622,56	2623,70	1,14	2,8	38
460	67,76	2622,14	2623,57	1,43	3,6	38
440	67,76	2622,1	2623,42	1,32	3,3	38
420	67,76	2622,03	2623,31	1,28	3,2	38
400	67,76	2622,13	2623,12	0,99	2,5	38
380	67,76	2621,96	2622,85	0,89	2,2	38
360	67,76	2621,57	2622,84	1,27	3,17	38
340	67,76	2621,45	2622,77	1,32	3,30	38
320	67,76	2621,37	2622,60	1,23	3,08	38
300	67,76	2621,19	2622,57	1,38	3,45	38
280	67,76	2621,20	2622,48	1,28	3,20	38
260	67,76	2621,2	2622,13	0,93	2,3	38
240	67,76	2620,42	2621,70	1,28	3,2	38
220	67,76	2620,31	2621,53	1,22	3,1	38
200	67,76	2620,17	2621,40	1,23	3,1	38
180	67,76	2620,04	2621,29	1,25	3,1	38
160	67,76	2619,96	2621,21	1,25	3,1	38
140	67,76	2619,88	2621,10	1,22	3,0	38
120	67,76	2619,62	2620,98	1,36	3,4	38
100	67,76	2619,31	2620,86	1,55	3,9	38
80	67,76	2618,82	2620,85	2,03	5,1	38
60	67,76	2619,23	2620,69	1,46	3,7	38
40	67,76	2619,2	2620,59	1,39	3,5	38
20	67,76	2619,07	2620,53	1,46	3,7	38
0	67,76	2619,01	2620,09	1,08	2,7	38
Pendiente aproximada en modelo físico para conseguir estos caudales = 3%						

Tabla N° 18. Valores para Caudal máximo y Tirante máximo para modelo Hidráulico, para caudal en prototipo de 49,62 m³/s.

Progresiva sección	PROTOTIPO (HECRAS)				MODELO(E: 1:20)	
	Cuadal Qp (m ³ /s)	min. Elev. (m)	lamina agua (m)	Tirante máx. (m)	Tirante máx. (cm)	Cuadal Qm (L/s.)
720	49,62	2624,71	2625,61	0,90	2,3	28
700	49,62	2624,5	2625,42	0,92	2,3	28
680	49,62	2624,18	2625,23	1,05	2,6	28
660	49,62	2623,78	2624,99	1,21	3,0	28
640	49,62	2623,34	2624,88	1,54	3,8	28
620	49,62	2623,25	2624,69	1,44	3,6	28
600	49,62	2623,25	2624,54	1,29	3,2	28
580	49,62	2623,24	2624,34	1,10	2,8	28
560	49,62	2623,16	2624,14	0,98	2,5	28
540	49,62	2622,96	2624	1,04	2,6	28
520	49,62	2622,79	2623,9	1,11	2,8	28
500	49,62	2622,81	2623,78	0,97	2,4	28
480	49,62	2622,56	2623,55	0,99	2,5	28
460	49,62	2622,14	2623,4	1,26	3,2	28
440	49,62	2622,1	2623,26	1,16	2,9	28
420	49,62	2622,03	2623,15	1,12	2,8	28
400	49,62	2622,13	2622,98	0,85	2,1	28
380	49,62	2621,96	2622,69	0,73	1,8	28
360	49,62	2621,57	2622,66	1,09	2,7	28
340	49,62	2621,45	2622,60	1,15	2,9	28
320	49,62	2621,37	2622,44	1,07	2,7	28
300	49,62	2621,19	2622,41	1,22	3,0	28
280	49,62	2621,20	2622,33	1,13	2,8	28
260	49,62	2621,2	2622,01	0,81	2,0	28
240	49,62	2620,42	2621,53	1,11	2,8	28
220	49,62	2620,31	2621,36	1,05	2,6	28
200	49,62	2620,17	2621,22	1,05	2,6	28
180	49,62	2620,04	2621,13	1,09	2,7	28
160	49,62	2619,96	2621,06	1,10	2,7	28
140	49,62	2619,88	2620,96	1,08	2,7	28
120	49,62	2619,62	2620,84	1,22	3,1	28
100	49,62	2619,31	2620,63	1,32	3,3	28
80	49,62	2618,82	2620,62	1,80	4,5	28
60	49,62	2619,23	2620,46	1,23	3,1	28
40	49,62	2619,2	2620,37	1,17	2,9	28
20	49,62	2619,07	2620,3	1,23	3,1	28
0	49,62	2619,01	2619,93	0,92	2,3	28
Pendiente aproximada en modelo físico para conseguir estos caudales = 3%						

Resultados gráficos de modelamiento con Hec-Ras.

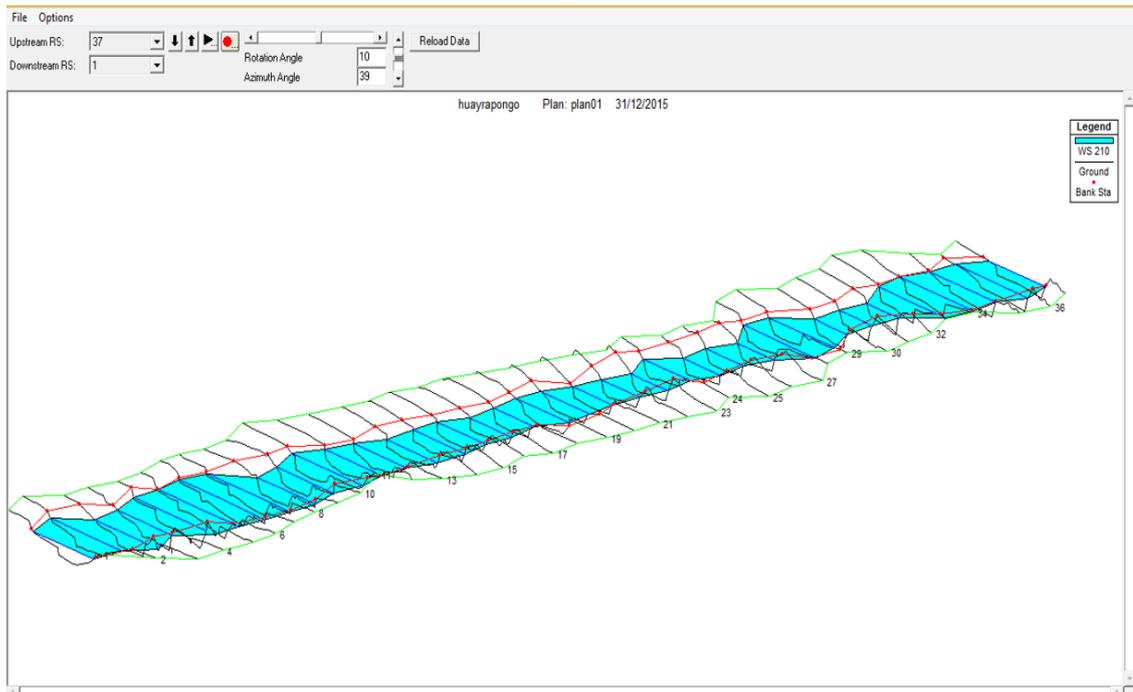


Figura N° 41. Cauce del río con niveles de agua para caudal de prueba.

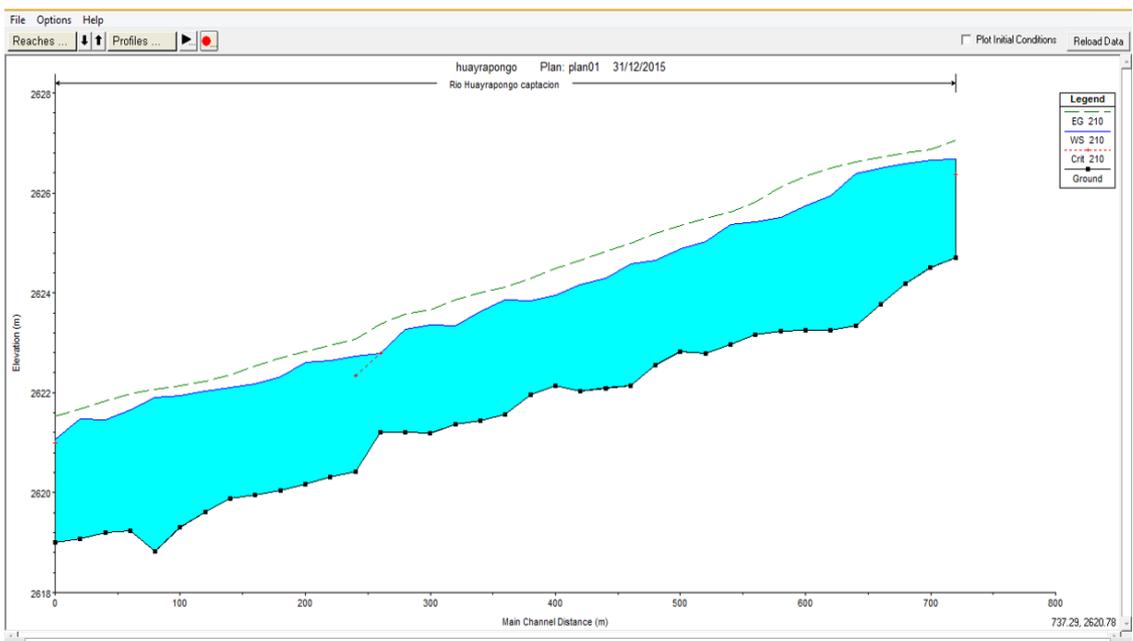


Figura N° 42. Perfil longitudinal del cauce en zona circundante a la estructura de captación.

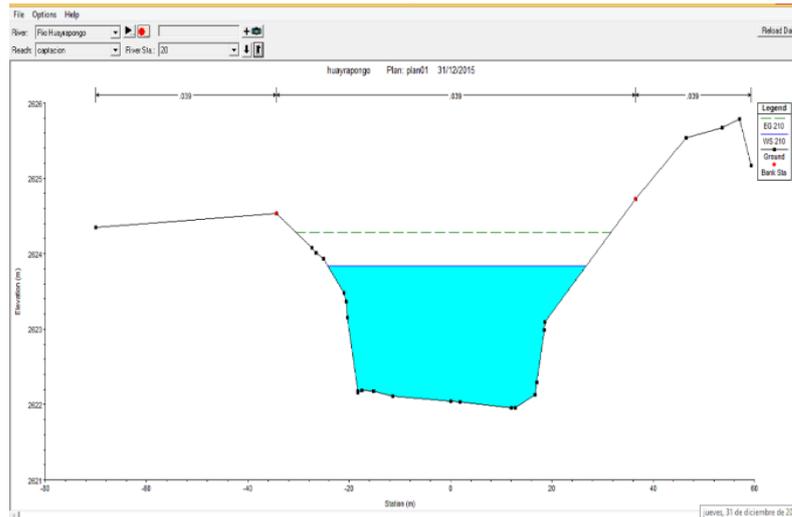


Figura N° 43. Sección transversal n° 0+340 aguas abajo de la estructura de captación.

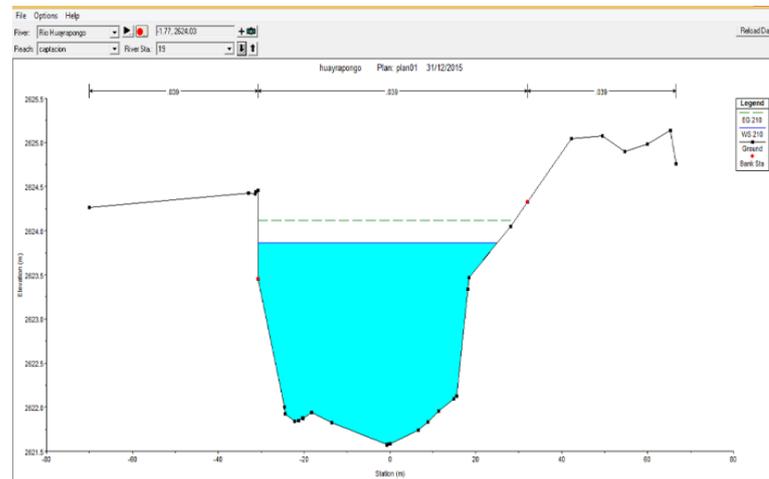


Figura N° 44. Sección transversal n° 0+320 aguas abajo de la estructura de captación.

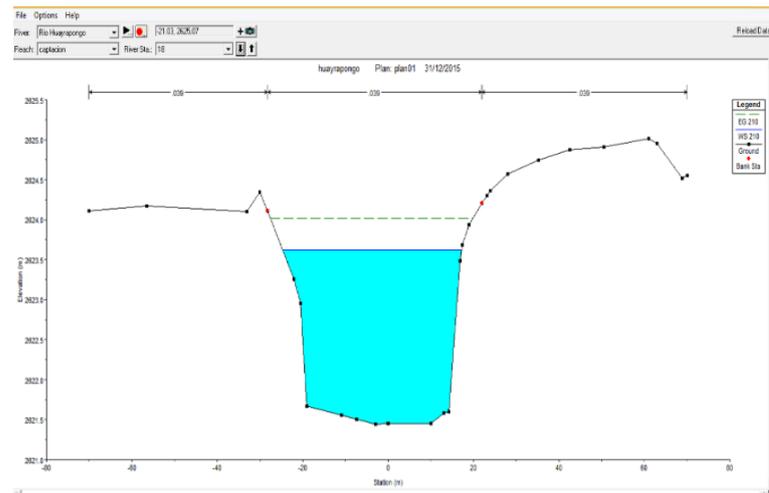


Figura N° 45. Sección transversal n° 0+300 aguas abajo de la estructura de captación.

APENDICE N° 3

PROCESO CONSTRUCTIVO Y FUNCIONAMIENTO DE MODELO FÍSICO



Para comprobar los resultados obtenidos después del modelar físicamente la estructura, es necesario tener la nueva morfología del río realizando un levantamiento topográfico.

En este caso se utiliza una estación total la cual nos ayuda a tener los resultados más exactos.

Figura N° 46. Trabajo topográfico de precisión con estación total.



Figura N° 47. Toma de datos topográficos en entorno de estructura de captación.



Figura N° 48. Trabajos de movimiento de tierras con maquinaria.



Figura N° 49. Trabajos de encofrado de barraje tipo cimacio.



Figura N° 50. Vaciado y pulido de concreto para barraje tipo cimacio.



Figura N° 51. Desencofrado y curado de barraje tipo cimacio.

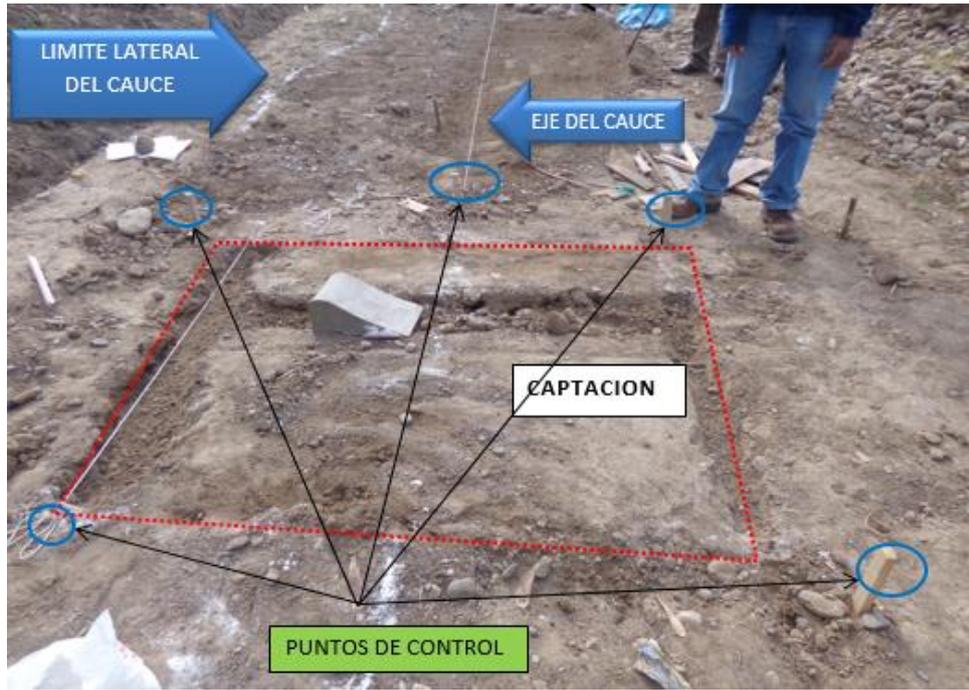


Figura N° 52. Replanteo del cauce y estructura de captación.



Figura N° 53. Replanteo del muros de encausamiento de estructura de captación.



Figura N° 54. Ensamblaje de estructura en lecho del río para el modelo físico.



Figura N° 55. Modelo físico reducido en funcionamiento para toma de datos.

ANEXOS

ANEXO N° 1

Información tomada del Expediente Técnico inicial del proyecto “Mejoramiento del canal de regadío Llacanora – La Succha, Noviembre (2010).

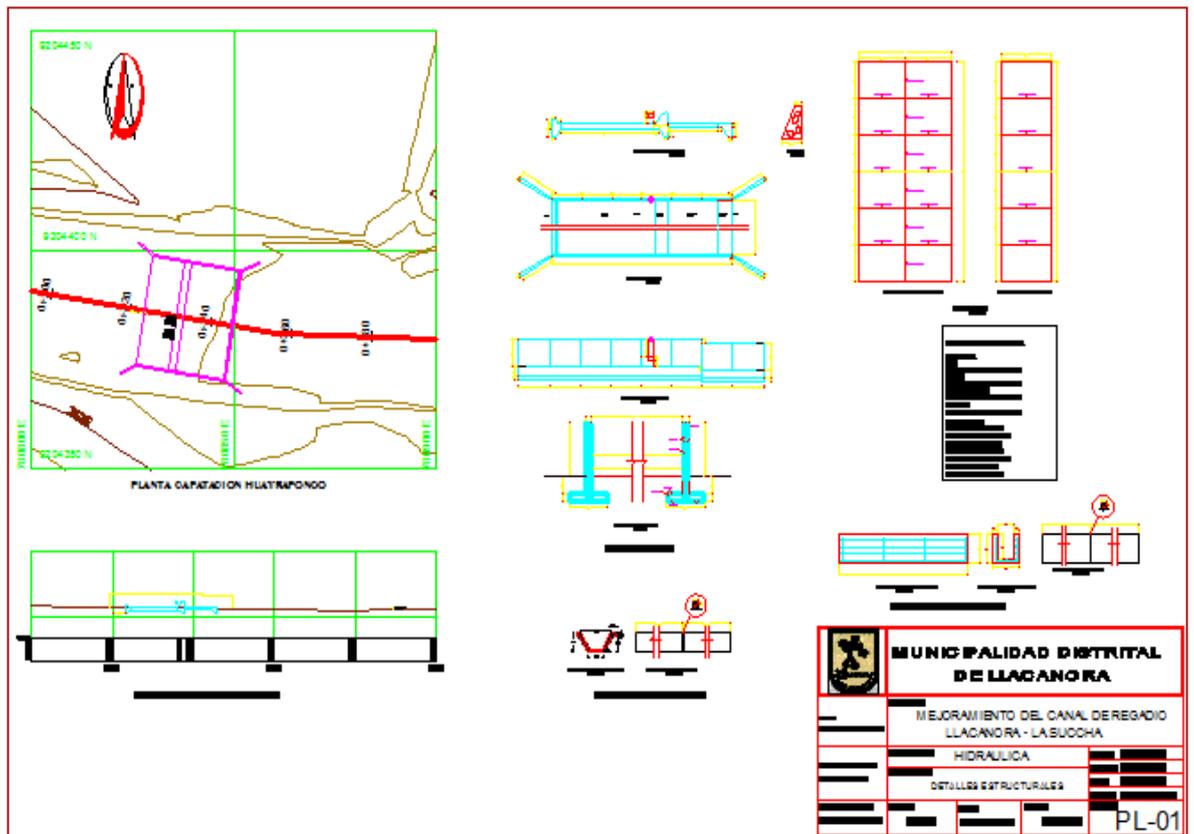


Figura N° 56. Plano de Detalles Estructurales - Hidráulica. Fuente: Expediente Técnico de Proyecto Mejoramiento del canal de regadío Llacanora – La Succha. (2010).

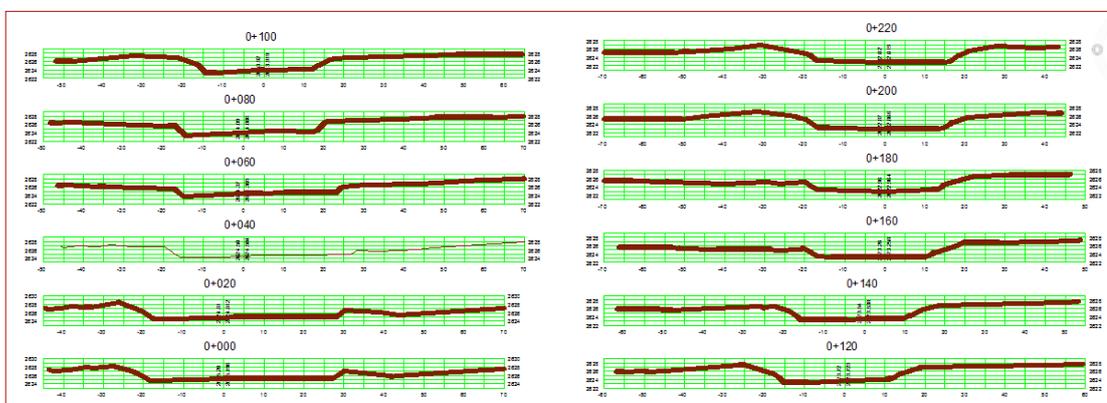


Figura N° 57. Plano de secciones transversales del lecho del río (aguas abajo). Fuente: Expediente Técnico de Proyecto Mejoramiento del canal de regadío Llacanora – La Succha. (2010).

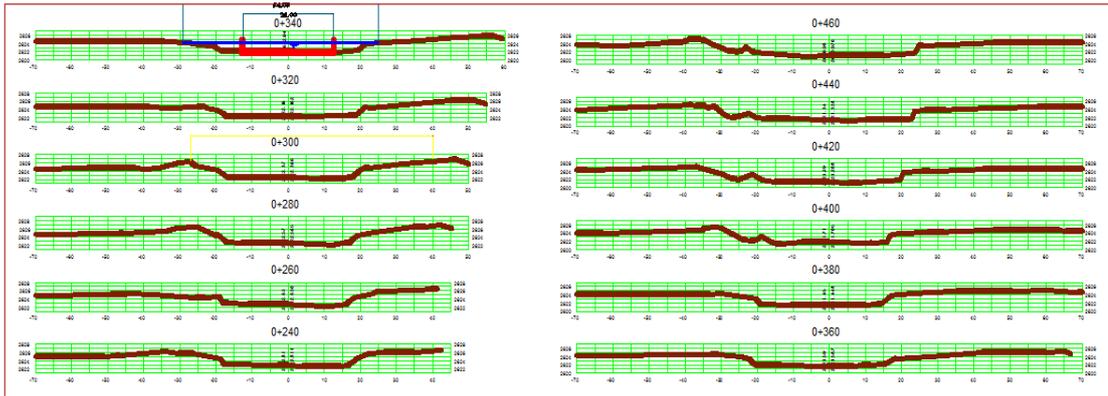


Figura N° 58. Plano de secciones transversales del lecho del río (zona de la estructura). Fuente: Expediente Técnico de Proyecto Mejoramiento del canal de regadío Llacanora – La Succha. (2010).

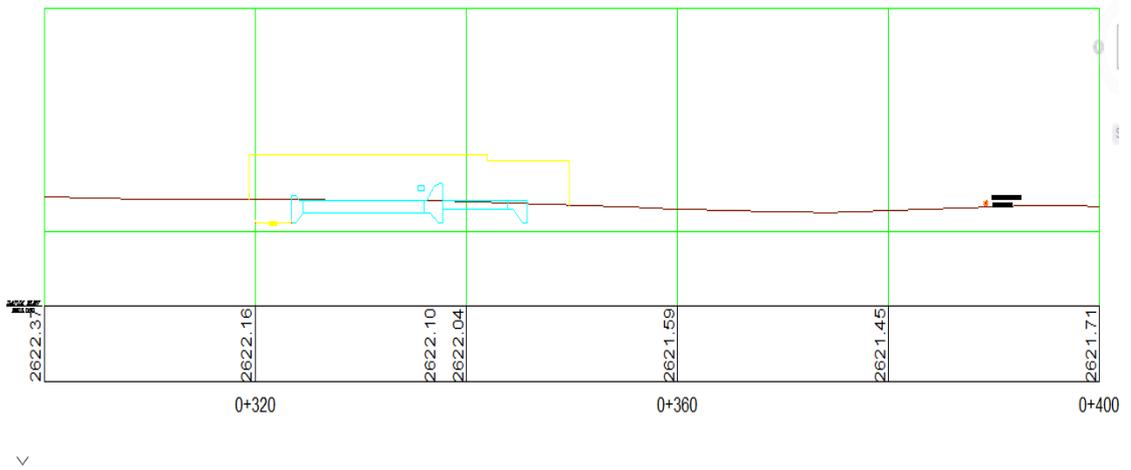


Figura N° 59. Perfil longitudinal del lecho del río (zona de la estructura). Fuente: Expediente Técnico de Proyecto Mejoramiento del canal de regadío Llacanora – La Succha. (2010).

ANEXO N° 2

Estudio de suelos del material del lecho del río para Proyecto profesional: Construcción del Viaducto del Proyecto “Creación del Servicio de Transitabilidad en el tramo Huayrapongo - Sta. Victoria - Iscoconga, Distrito de Los Baños del Inca, Cajamarca - Cajamarca” realizado por el Bach. En Ingeniería Civil Gutierrez Peregrino, Angel Homero (2013) – Universidad Nacional de Cajamarca.



ANEXO 4.2

ESTUDIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y CANTERAS



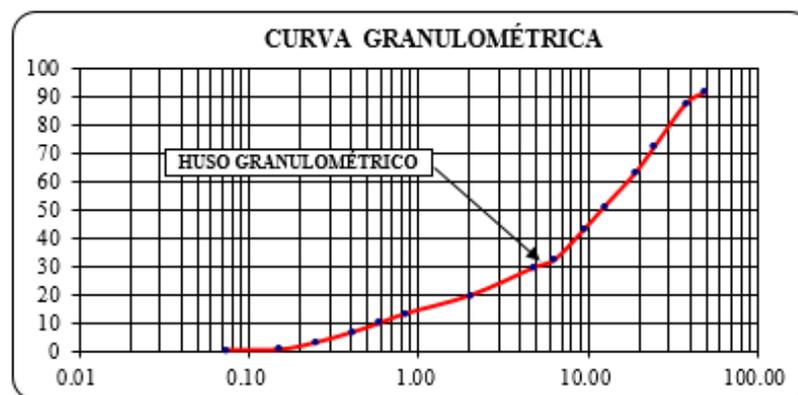
4.3.2. ENSAYOS DE LABORATORIO

CALICATA I, ESTRATO I, Muestra: Lado Izquierdo y Prof.: 3.50 m.

Análisis granulométrico Cl. El.

Muestra = 6000.00 gr.					
Tamiz		PRP	%RP	%RA	% Que Pasa
Nº	ABER.(mm)	(gr)			
3"	75.00	0.000			
2 1/2"	63.00	0.000			100.00
2"	50.00	500.000	8.33	8.33	91.67
1 1/2"	38.10	250.000	4.17	12.50	87.50
1"	25.00	899.000	14.98	27.48	72.52
3/4"	19.05	580.000	9.67	37.15	62.85
1/2"	12.70	690.000	11.50	48.65	51.35
3/8"	9.53	500.000	8.33	56.98	43.02
1/4"	6.35	650.000	10.83	67.82	32.18
Nº4	4.76	170.000	2.83	70.65	29.35
Nº 10	2.04	580.000	9.67	80.32	19.68
Nº 20	0.84	390.000	6.50	86.82	13.18
Nº 30	0.59	200.000	3.33	90.15	9.85
Nº 40	0.42	180.000	3.00	93.15	6.85
Nº 60	0.25	230.000	3.83	96.98	3.02
Nº 100	0.15	155.000	2.58	99.57	0.43
Nº 200	0.07	8.000	0.13	99.70	0.30
Cazoleta	-.-	4.000	0.07	99.77	0.23
Total		5986.00	99.77		

Representación de la distribución granulométrica Cl. El.



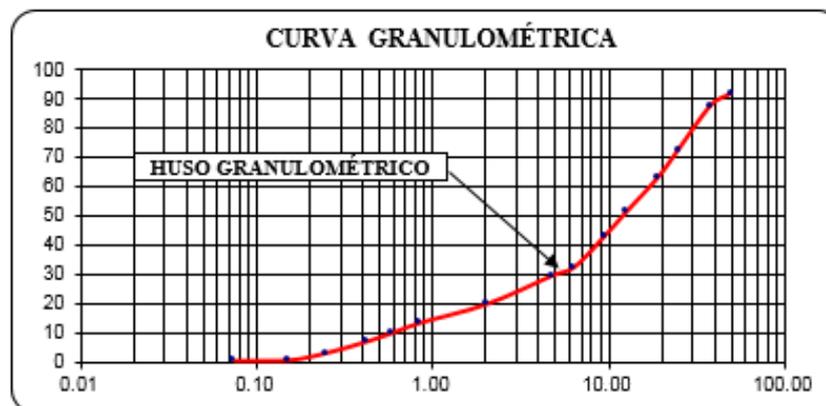


CALICATA 2, ESTRATO 1, Muestra: Centro y Prof.:3.00 m.

Análisis granulométrico C2. E1.

Muestra: 6000.00 gr.		PRP	%RP	%RA	% Que pasa
Nº	Tamiz ABER.(mm)	(gr)			
3"	75.00	0.000			
2 1/2"	63.00	0.000			100.00
2"	50.00	355.000	5.92	5.92	94.08
1 1/2"	38.10	285.000	4.75	10.67	89.33
1"	25.00	935.000	15.58	26.25	73.75
3/4"	19.05	610.000	10.17	36.42	63.58
1/2"	12.70	830.000	13.83	50.25	49.75
3/8"	9.53	495.000	8.25	58.50	41.50
1/4"	6.35	620.000	10.33	68.83	31.17
Nº4	4.76	160.000	2.67	71.50	28.50
Nº 10	2.04	500.000	8.33	79.83	20.17
Nº 20	0.84	400.000	6.67	86.50	13.50
Nº 30	0.59	210.000	3.50	90.00	10.00
Nº 40	0.42	160.000	2.67	92.67	7.33
Nº 60	0.25	245.000	4.08	96.75	3.25
Nº 100	0.15	165.000	2.75	99.50	0.50
Nº 200	0.07	5.000	0.08	99.58	0.42
Cazoleta	-.-	2.100	0.04	99.62	0.38
Total		5977.10	99.62		

Representación de la distribución granulométrica C2. E1





CALICATA 3, ESTRATO 1, Muestra: Lado Derecho y Prof.: 3.50 m.

Análisis granulométrico C3. E1.

Muestra :		6000.00	gr.		
Tamiz		PRP	%RP	%RA	% Que pasa
Nº	ABER.(mm)	(gr)			
3"	75.00	0.000			
2 1/2"	63.00	550.000	9.17	9.17	90.83
2"	50.00	380.000	6.33	15.50	84.50
1 1/2"	38.10	360.000	6.00	21.50	78.50
1"	25.00	850.000	14.17	35.67	64.33
3/4"	19.05	250.000	4.17	39.83	60.17
1/2"	12.70	725.000	12.08	51.92	48.08
3/8"	9.53	390.000	6.50	58.42	41.58
1/4"	6.35	590.000	9.83	68.25	31.75
Nº4	4.76	150.000	2.50	70.75	29.25
Nº 10	2.04	590.000	9.83	80.58	19.42
Nº 20	0.84	350.000	5.83	86.42	13.58
Nº 30	0.59	250.000	4.17	90.58	9.42
Nº 40	0.42	155.000	2.58	93.17	6.83
Nº 60	0.25	230.000	3.83	97.00	3.00
Nº 100	0.15	155.000	2.58	99.58	0.42
Nº 200	0.07	7.000	0.12	99.70	0.30
Cazoleta	--	3.000	0.05	99.75	0.25
Total		5985.00	99.75		

Representación de la distribución granulométrica C3. E1.

