



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

INVESTIGACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL PROYECTO ALTO PIURA

Diego Rios-Varillas

Piura, noviembre de 2014

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

Rios, D. (2014). *Investigación de la disipación de energía en el modelo hidráulico del Proyecto Alto Piura*. Tesis de pregrado no publicado en Ingeniería Civil. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia](#)
[Creative Commons Atribución-](#)
[NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

UNIVERSIDAD DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERÍA



**INVESTIGACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN EL MODELO
HIDRÁULICO DEL PROYECTO ALTO PIURA**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Diego Ignacio Rios Varillas

Asesor: Dr. Ing. Jorge Reyes Salazar

Piura, Noviembre 2014

A mi familia, amigos y todos aquellos que se sienten orgullosos y felices con mi crecimiento profesional.

Prólogo

Al formar parte del equipo de investigación del Modelo Hidráulico Alto Piura, a cargo del IHHS de la Universidad de Piura, pude observar, gracias al modelo, una gran diversidad de fenómenos que ocurren dentro de una presa o estructura hidráulica, entre ellos, grandes erosiones debido a las grandes velocidades con las que vertía el flujo a través del barraje móvil de la presa.

Es por tal motivo que en la presente tesis se evaluaron dichos fenómenos en base al diseño original de la Presa Tronera Sur del Proyecto Alto Piura y al verificar los resultados, se llegó a la conclusión de que dichas estructuras no tenían la suficiente capacidad de disipación energía.

A partir de estos resultados se trabajaron diversas alternativas de disipación, tales como cambio en los enrocados, una poza disipadora, entre otros, que daban mejores resultados pero por temas de procesos constructivos o económicos serían poco probables de llevar a cabo en la realidad. Es así como se llegó a un diseño final que consistía en una rampa junto al alargamiento de muro divisorio del barraje fijo y móvil, además de una modificación en la geometría de enrocado ubicado al final de dicha rampa.

Se realizaron las evaluaciones y mediciones respectivas para este diseño final, resultando que se cumple con los niveles de erosión permisibles para considerar que las estructuras de la presa no se vean afectadas.

Todo este trabajo se realizó en conjunto con el apoyo del equipo del IHHS de la Universidad de Piura, para los cuales muestro mi más profundo agradecimiento, en especial al Dr. Ing. Jorge Reyes – Director del IHHS, por darme la oportunidad de poder pertenecer a este equipo de trabajo.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1: Proyecto Especial de Irrigación e Hidroenergético del Alto Piura.....	3
1.1 Aspectos generales del proyecto.....	3
1.1.1 Objetivos.....	4
1.1.2 Beneficios del proyecto.....	4
1.2 Componentes del proyecto.....	5
1.2.1 Componente I.....	5
1.2.2 Componente II.....	11
1.2.3 Componente III.....	12
1.2.4 Componente IV.....	12
1.3 Datos hidráulicos del proyecto.....	13
1.3.1 Condiciones hidrológicas.....	13
1.3.2 Datos de la Presa Derivadora Tronera Sur.....	13
Capítulo 2: Disipación de energía.....	15
2.1 Introducción.....	15
2.2 Resalto hidráulico.....	15
2.2.1 Número de Froude.....	16
2.2.2 Tipos de resalto hidráulico.....	17
2.2.3 Características del resalto hidráulico.....	18
2.3 Colchón hidráulico.....	21
2.3.1 Diseño de un colchón hidráulico.....	22
2.4 Estanques amortiguadores de la U.S.B.R.....	23
2.4.1 Tipo I: Estanques amortiguadores para canales o aliviaderos con pendiente moderada.....	23
2.4.2 Tipo II: Estanques amortiguadores para presas altas y presas de tierra con canales extensos.....	24
2.4.3 Tipo III: Estanques amortiguadores pequeños para estructuras de canal, pequeñas estructuras de salida y pequeños aliviaderos.....	26
2.4.4 Tipo IV: Estanques amortiguadores y supresor de ondas para estructuras de canal, obras de toma y presas de derivación.....	27
2.4.5 Tipo V: Estanques amortiguadores para pendiente pronunciada.....	28
2.5 Disipación de energía por dispersión (Salto de sky).....	29

Capítulo 3: Modelación hidráulica	31
3.1 Introducción.....	31
3.2 Clasificación general de los modelos hidráulicos.....	32
3.2.1 Modelos físicos.....	32
3.2.2 Modelos analógicos.....	32
3.2.3 Modelos matemáticos.....	32
3.3 Paralelo entre modelos físicos y matemáticos.....	33
3.4 Uso e importancia de modelos físicos en una investigación.....	33
3.5 Leyes de semejanza en diseño de modelos físicos.....	34
3.5.1 Modelos a semejanza de Froude.....	34
3.5.2 Modelos a semejanza de Reynolds.....	35
3.5.3 Modelos a semejanza de Weber.....	35
3.6 Similitud en modelos físicos.....	36
3.6.1 Similitud geométrica.....	36
3.6.2 Similitud cinemática.....	36
3.6.3 Similitud dinámica.....	37
3.6.4 Similitud sedimentológica.....	38
3.7 Efectos de escala.....	39
3.8 Calibración del modelo.....	40
Capítulo 4: Modelo hidráulico del Proyecto Alto Piura.....	41
4.1 Objetivos.....	41
4.2 Ubicación del modelo.....	41
4.3 Componentes del modelo.....	43
4.3.1 Sistema de alimentación y regulación.....	43
4.3.2 Modelo hidráulico.....	44
4.3.3 Canal de retorno.....	44
4.4 Escala del modelo.....	45
4.5 Construcción del modelo.....	45
4.5.1 Tanque de quietamiento y control de caudal.....	45
4.5.2 Muro calado y espigón.....	46
4.5.3 Cauce del modelo.....	46
4.5.4 Estructuras de obra de represamiento.....	48
4.6 Investigación.....	51

4.6.1	Programa de investigación.....	51
4.6.2	Equipos e instrumentos de medición.....	52
4.6.3	Toma de datos.....	55
Capítulo 5: Disipación de energía en el Modelo Hidráulico del Proyecto Alto Piura....		57
5.1	Estudio de la disipación de energía en el diseño original de la presa.....	57
5.1.1	Caudal de 27.2 m ³ /s.....	57
5.1.2	Caudal de 117 m ³ /s.....	60
5.1.3	Caudal de 308.4 m ³ /s.....	62
5.1.4	Caudal de 456.3 m ³ /s.....	64
5.1.5	Caudal de 583.1 m ³ /s.....	67
5.2	Modificaciones realizadas para optimizar la disipación de energía.....	69
5.2.1	Modificación de solera de protección.....	69
5.2.2	Construcción de poza disipadora.....	70
5.2.3	Construcción de una rampa de proyección de muro divisorio entre barraje fijo y barraje móvil.....	71
5.2.4	Construcción de plataforma horizontal y modificación en la solera de enrocado.....	72
5.3	Ensayos de verificación de diseño final.....	74
5.3.1	Ensayo para Q = 583 m ³ /s.....	74
5.3.2	Ensayo para nivel de operación 1537.35 m.s.n.m.....	76
5.4	Ensayos programados con el diseño definitivo.....	80
5.4.1	Ensayos para compuerta N° 1.....	80
5.4.2	Ensayos para compuerta N° 2.....	93
5.4.3	Ensayos para compuerta N° 3.....	105
5.4.4	Ensayos para compuertas N° 1, 2 y 3 simultáneamente.....	117
5.4.5	Ensayo para canal de Limpia.....	126
Capítulo 6: Conclusiones.....		131

Capítulo 1

Proyecto Especial de Irrigación e Hidroenergético de Alto Piura

La información de este capítulo fue obtenida del sitio web del proyecto Alto Piura y del “Programa para las investigaciones en el modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación” otorgado por el cliente.

1.1 Aspectos Generales del proyecto

El Proyecto Especial de Irrigación e Hidroenergético del Alto Piura (PEIHAP), tiene como objetivo mejorar la producción agrícola y la generación de energía mediante la captación y el trasvase hacia la cuenca Pacífica de parte de las aguas del río Huancabamba que desembocan en la cuenca Atlántica.

Tiene un área de influencia de más de 144 mil hectáreas que comprenden zonas agrícolas, obras hidráulicas, entre otras zonas en las que el proyecto puede alcanzar beneficios directos o indirectos. Abarcan las provincias de Huancabamba, desde la naciente de río Huancabamba en la laguna de Shimbe; Ayabaca; Morropón y Piura, en el distrito de Tambogrande.



Figura 1.1. Área de influencia del proyecto Alto Piura.
Fuente: Página web www.peihap.gob.pe.

1.1.1 Objetivos

Los objetivos directos del proyecto son:

- Aumentar la producción, productividad y rentabilidad de 50 000 Ha bajo riego, reintegrando 31 000 Ha a la producción, e incorporar 19 000 Ha. de tierras nuevas, mediante el trasvase de 335 MMC de agua del río Huancabamba al río Piura en una primera etapa, de un total de 96 000 Ha para explotación agropecuaria en su esquema integral.
- Incrementar la producción de energía hidráulica en base a las aguas trasvasadas y las caídas de más de 1 200 metros, mediante la instalación de dos centrales hidroeléctricas de 290 MW en total, en Cashapite y Gramadal.

1.1.2 Beneficios del proyecto

1.1.2.1 Beneficios directos

Son aquellos beneficios para los cuales se tiene previsto la elaboración del proyecto. Entre estos tenemos:

- Ampliación de la frontera agrícola en 19 000 Ha y el mejoramiento de otras 31 000 Ha.
- Reactivación del mercado de tierras para uso agrícola.
- Incremento de la productividad de las tierras y del agua.
- Incremento de la oferta exportable de productos agrícolas.
- Elevación de la capacidad exportadora de energía eléctrica de la región 850GW/h/año.
- Generación de 75 000 puestos de trabajo directos.
- US \$ 400 millones de Valor Bruto de Producción Agrícola.

1.1.2.2 Beneficios indirectos

Son aquellos beneficios que se generarán como consecuencia de la influencia del proyecto. Son beneficios secundarios, entre ellos:

- Mejora del nivel de ingresos de la población del ámbito de influencia del proyecto gracias a 125 000 puestos de trabajo indirecto.
- Mejora de la calidad de vida de la población de la región.
- Mayor infraestructura productiva en la región.
- Mayor tecnificación del sector agropecuario.
- Incremento de la recaudación fiscal ante mayor actividad productiva en la región.
- Aumento de la seguridad alimentaria regional y nacional ante cambio climático.

1.2 Componentes del proyecto

El proyecto está dividido en cuatro componentes:

- Componente I: Corresponde a las obras del Túnel de trasvase y la Presa Derivadora Tronera Sur.
- Componente II: Proyecto Hidroenergético.
- Componente III: Proyecto Agrícola, área nueva.
- Componente IV: Desarrollo Agrícola del valle tradicional.

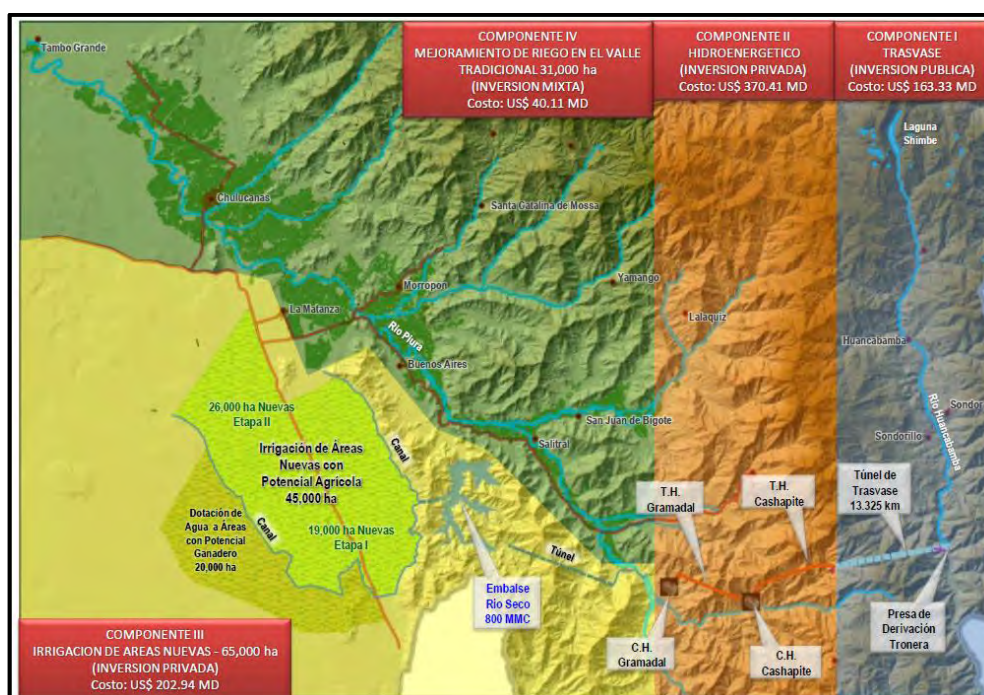


Figura 1.2. Distribución y componentes del Proyecto Alto Piura.

Fuente: Página web www.peihap.gob.pe.

1.2.1 Componente I

De acuerdo al expediente técnico elaborado para la licitación internacional, se establece un costo de US \$ 133.2 millones de dólares (incluyendo I.G.V), que serán asumidos a través de inversión pública con deducibles.

Tabla 1.1 Costo de las obras del Componente I.

OBRAS	TOTAL EN US \$
Obras acceso, mantenimiento y preliminares	30 805 631
Presa Derivadora Tronera Sur	11 395 180
Túnel de trasvase + Ventana 1 + Ventana 2	69 719 544
Sub Total de obras	111 920 355
I.G.V	21 264 867
Total de Inversión pública con deducibles	133 185 223

Fuente: Página web www.peihap.gob.pe.

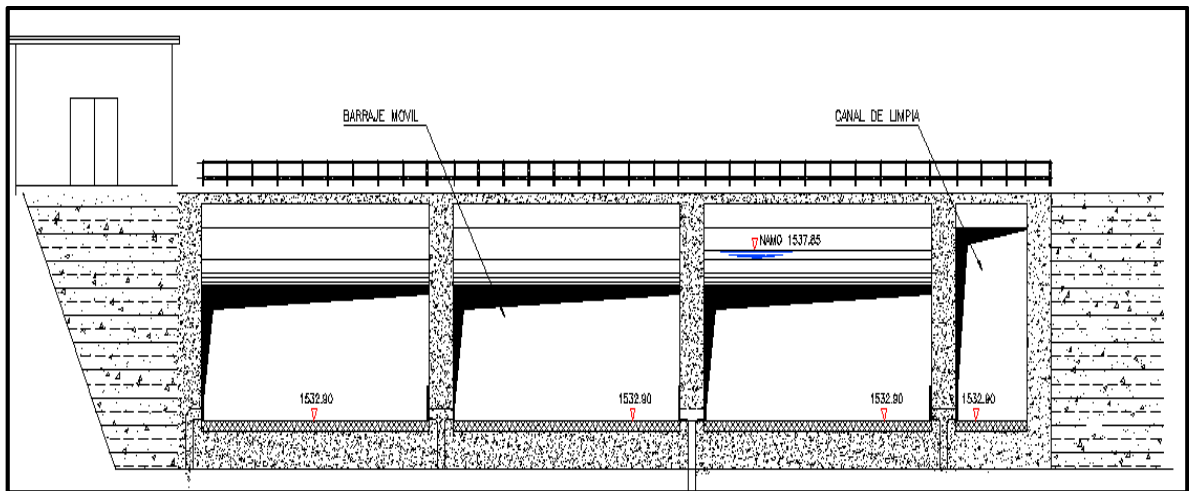


Figura 1.4. Sección del barraje móvil Presa Derivadora Tronera Sur.

Fuente: Planos provistos por el cliente del proyecto. Editado por autor de la tesis.

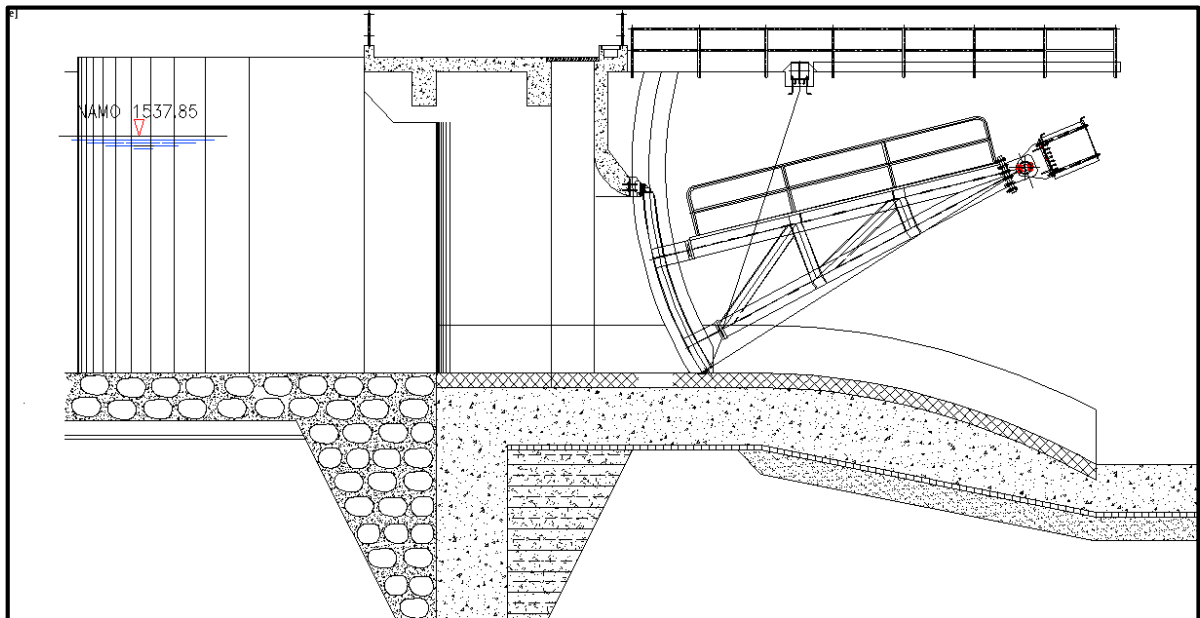


Figura 1.5 Vista de perfil de una compuerta del barraje móvil.

Fuente: Planos provistos por el cliente del proyecto. Editado por autor de la tesis.

- **Canal de limpia:** Parte del barraje móvil, de compuerta radial de 6.30 m de alto y 3.0 m de ancho. Cuenta con una clapeta como se muestra en la Figura 1.5.

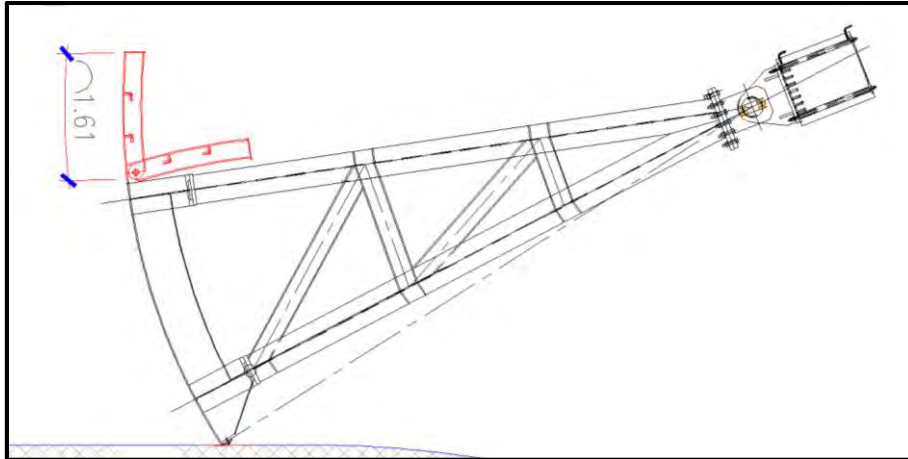


Figura 1.6. Compuerta del canal de limpia con clapeta.

Fuente: Planos provistos por el cliente del proyecto. Editado por autor de la tesis.

- **Canal de aproximación:** Es un desarenador de más de 40 m de largo y 17.7 m de ancho que tiene como función depositar en su fondo las partículas de sedimento para que el caudal necesario llegue sin el mismo hacia la bocatoma.



Figura 1.7. Vista en planta del canal de aproximación.

Fuente: Planos provistos por el cliente del proyecto. Editado por autor de la tesis.

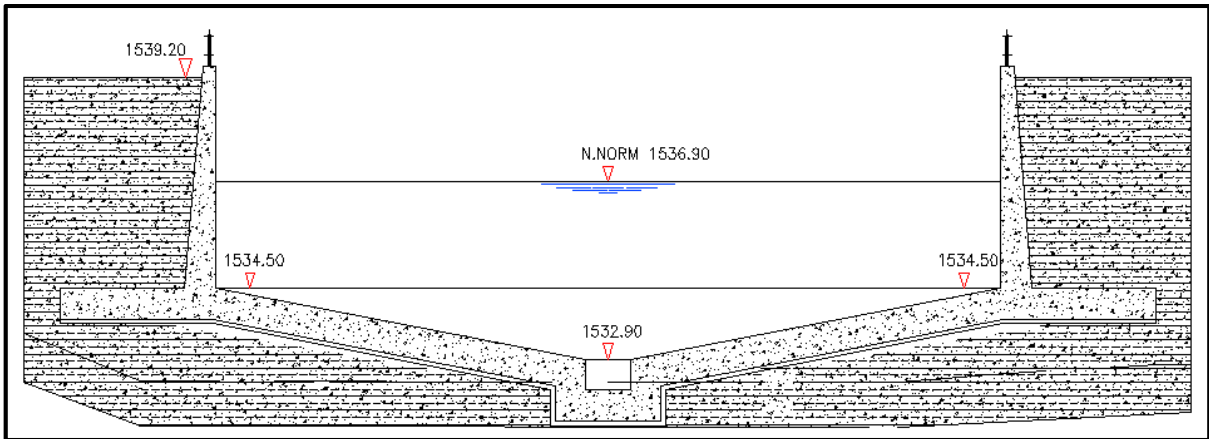


Figura 1.8. Sección del canal de aproximación.

Fuente: Planos provistos por el cliente del proyecto. Editado por autor de la tesis.

- **Vertedero de demasías:** Compuesto por dados amortiguadores con la función de eliminar el caudal excedente si es que este pasara a través del canal de aproximación.

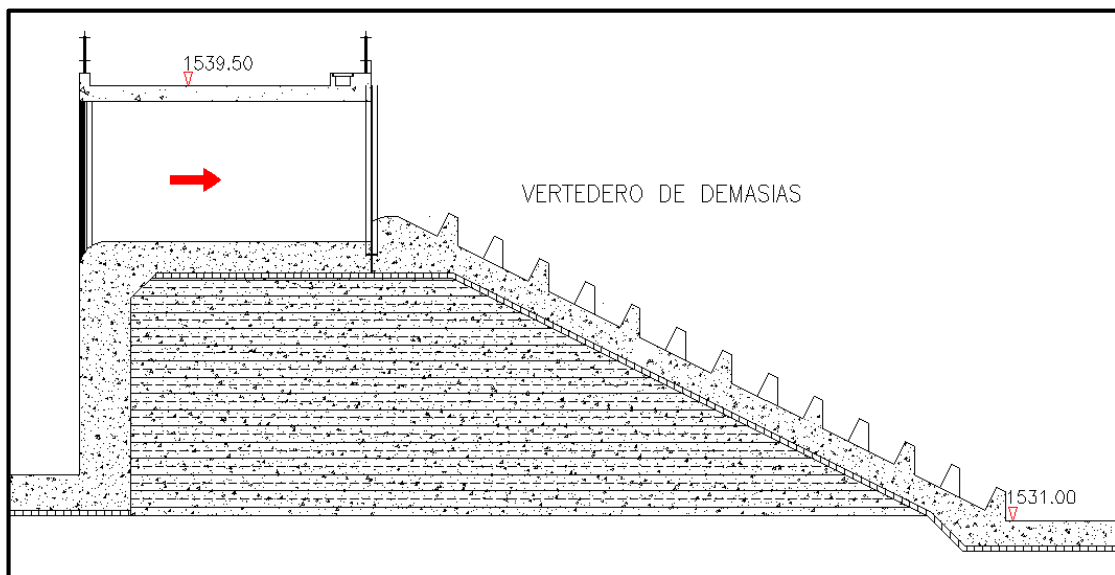


Figura 1.9. Vista de perfil del vertedero de demasías.

Fuente: Planos provistos por el cliente del proyecto. Editado por autor de la tesis.

- **Túnel de descarga ecológica/purga:** Con la capacidad de 0.585 m³/s y 5 m³/s respectivamente. Encargado de la purga de los sedimentos del canal de aproximación.
- **Bocatoma:** Diseñada para captar los 27.2 m³/s necesarios para lograr los objetivos del proyecto. Se conecta con el Túnel de Trasvase.

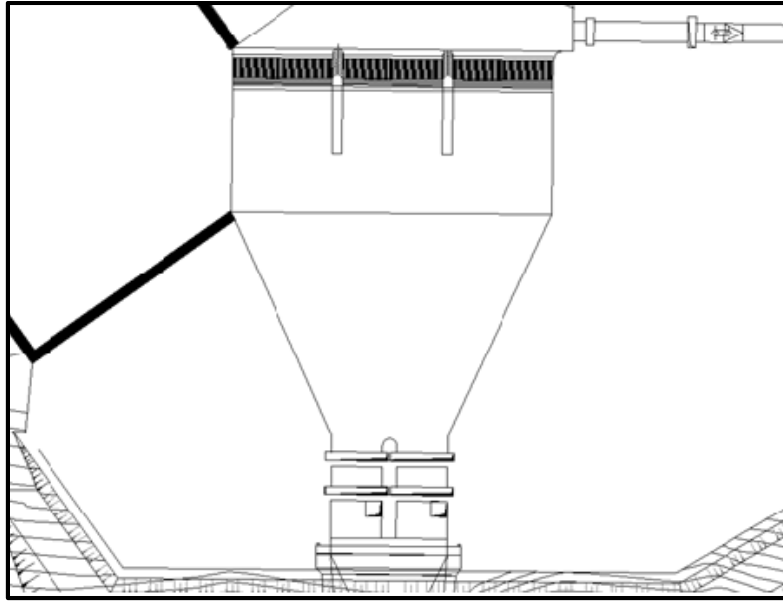


Figura 1.10. Vista en planta de la bocatoma.

Fuente: Planos provistos por el cliente del proyecto. Editado por autor de la tesis.

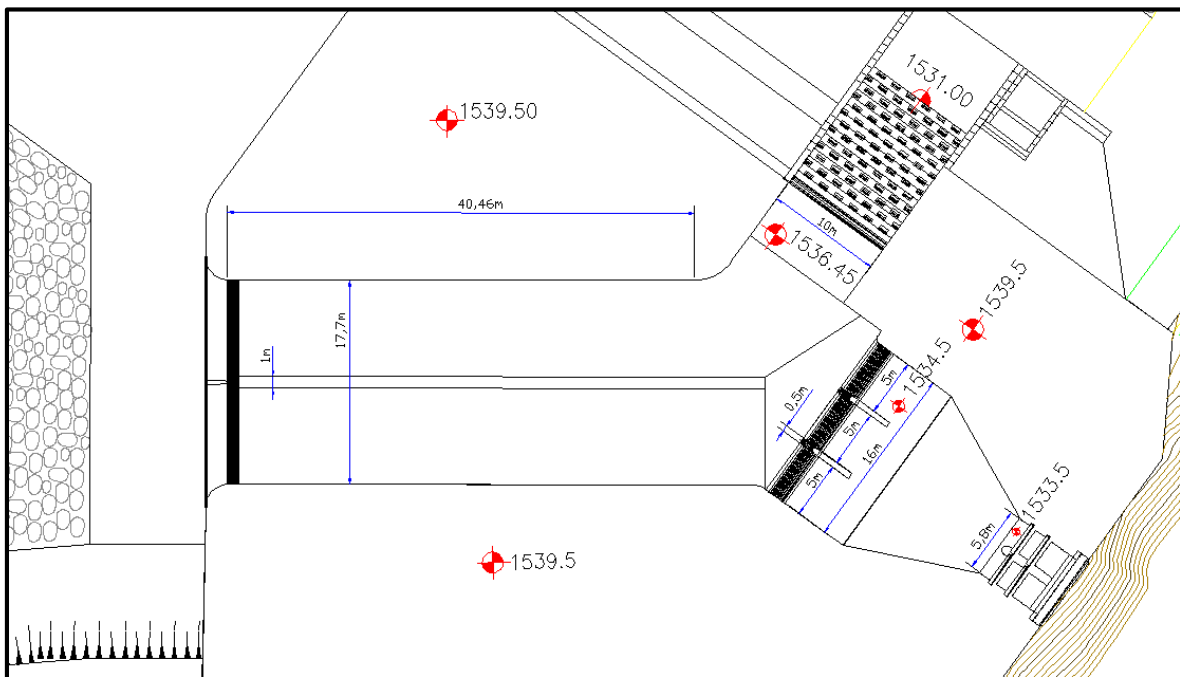


Figura 1.11. Vista en planta de las estructuras de captación y vertedero de demasías.

Fuente: Planos provistos por el cliente del proyecto. Editado por autor de la tesis.

1.2.1.3 Túnel de trasvase

Tiene una longitud de 13,325 m y trabaja a presión e incluye una caída de agua de 74.65 m de altura. Tiene forma de herradura con solera plana de diámetro interno revestido que varía de 2.6 a 3.3 m. El acceso al túnel es a través de 2 ventanas, primera ubicada en el inicio del mismo a 2,040 m y la segunda al final del túnel de 774 m de longitud.



Figura 1.12. Construcción de túnel de trasvase.

Fuente: Página web www.peihap.gob.pe.

1.2.2 Componente II

El segundo componente del proyecto corresponde a la parte del Proyecto Hidroenergético y está constituido por las siguientes obras:

1.2.2.1 Presa Tronera Norte

Con una capacidad de almacenamiento de 40MMC y una altura de 75 m. Su cota de coronación es 1600 m.s.n.m. y un Nivel de Agua Máximo de Operación (NAMO) de 1595 m.s.n.m.

1.2.2.2 Central Hidroeléctrica Cashapite

Con la capacidad de generar 150 MW. Su salto bruto es de 645 m. Consta de un Túnel Hidroenergético alto de 4,835 m de longitud y 2.6 m de diámetro; así como también de un Túnel bajo blindado de 2,065 m de longitud y 2.6 m de diámetro.

1.2.2.3 Central Hidroeléctrica Gramadal

Con la capacidad de generar 150 MW. Su salto bruto es de 580 m. Consta de un Túnel Hidroenergético alto de 4,835 m de longitud y 2.6 m de diámetro; así como también de una Tubería forzada de 1,820 m de longitud y 2.6 m de diámetro.

El costo del segundo componente esta especulado en 424.24 millones de US \$ que serán financiados gracias a una concesión privada.

1.2.3 Componente III

El tercer componente corresponde al Proyecto Agrícola, para cual serán necesarias las siguientes obras:

1.2.3.1 Presa Mamayaco

Posee una capacidad de almacenamiento de 25MMC y una altura de 33 m. Su cota de coronación es de 285 m.s.n.m. y su NAMO es 278 m.s.n.m.



Figura 1.13. Ubicación de presa Mamayaco.

Fuente: Página web www.peihap.gob.pe.

1.2.3.2 Infraestructura de riego

Estará compuesta por un Canal Principal de Conducción de 45.4 Km de longitud, con la capacidad de transportar un caudal de 14 m³/s y por Canales de Distribución que se dividen en norte y sur de 20 y 46.7 Km respectivamente.

El costo de este componente será de 104.38 millones de US \$ que serán financiados gracias a una concesión privada.

1.2.4 Componente IV

El cuarto y último componente del proyecto consiste en el Proyecto Agrícola Valle Tradicional, el cual tendrá un mejoramiento de riego de 31,000 Ha. Además, se establecerán estaciones de bombeo para atender la demanda de 135 MMC anuales en los sectores de Caja Lobos, Franco, Pabur, Nor Perú, Vicús, Ñomala. También se encargarán de la rehabilitación, perforación, electrificación y gestión de 540 pozos para asegurar la extracción de 140 MMC de agua subterránea por año.

1.3 Datos hidráulicos del proyecto

Tratándose la presente investigación acerca de la *Presa Derivadora Tronera Sur* perteneciente al Componente I del proyecto, los presentes datos hidráulicos están relacionados directamente con dicha obra; no obstante, algunos son partes del marco general del proyecto.

1.3.1 Condiciones hidrológicas

A continuación se presentan los caudales máximos instantáneos para determinados periodos de ocurrencia del río Huancabamba.

Tabla 1.2. Caudales representativos del río Huancabamba.

Periodo de Ocurrencia (años)	Probabilidad de Ocurrencia	Caudal Máximo Instantáneo (m³/s)
1000	0.10%	583
500	0.20%	527.1
200	0.50%	456.3
100	1%	405.2
25	4%	308.4

Fuente: Programa para las investigaciones en el modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación.

1.3.2 Datos de Presa Derivadora Tronera Sur

1.3.2.1 Niveles de agua aguas arriba del barraje móvil

Los niveles de agua aguas arriba del barraje móvil deben ser los siguientes:

Tabla 1.3. Niveles de agua requeridos.

Nivel	Cota (m.s.n.m.)
De descarga de avenida máxima	1537.85
De captación frente de la bocatoma	1536.9

Fuente: Programa para las investigaciones en el modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación.

1.3.2.2 Caudales de diseño para dimensionamiento de estructuras hidráulicas

En la tabla 1.4 se presenta los caudales de diseño para las estructuras correspondientes a la *Presa Derivadora Tronera Sur*:

Tabla 1.4. Caudales de diseño.

Estructura	Caudal (m³/s)
Barraje Móvil	456.3
Bocatoma	27.2
Túnel de caudal ecológico/purga	0.585/5

Fuente: Programa para las investigaciones en el modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación.

Capítulo 2

Disipación de Energía

2.1 Introducción

Dentro del rubro del diseño obras hidráulicas hay un aspecto que merece una especial atención, éste se trata de la variante de velocidad y dirección que adquiere un flujo en la descarga del barraje móvil de nuestra presa.

El río tiene un tirante y una velocidad natural a los que siempre tienden llegar dependiendo del caudal que se encuentre en el mismo, pero al colocar una presa o embalse en él, aumentamos la carga energética y cambiamos drásticamente sus características.

Cuando el flujo de agua corre por un vertedero, túnel de descarga, entre otros, contiene gran cantidad de energía cinética y por consiguiente un gran poder destructivo debido a sus velocidades y presiones altas. Estas pueden causar erosión en el lecho del río, en el pie de la presa e inclusive en las mismas estructuras de conducción, atentando contra la estabilidad y poniendo en riesgo las estructuras hidráulicas.

Se utilizan distintos mecanismos como disipadores de energía, para que el río logre establecer sus condiciones naturales y se viten los problemas previamente mencionados. Son elegidos teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Energía del flujo.
- Costos de construcción y mantenimiento del disipador.
- Condiciones del cauce aguas abajo.
- Ubicación de otras estructuras hidráulicas.
- Efectos colaterales al proyecto (flora y fauna, otros proyectos, poblaciones cercanas, etc.) debido a erosión en otros sectores.

2.2 Resalto hidráulico

El resalto hidráulico es el ascenso brusco del nivel de agua que se presenta en un canal abierto debido al retraso que experimenta un flujo de agua proveniente de gran velocidad.

Este fenómeno se caracteriza por tener lugar un cambio violento de régimen de flujo, de supercrítico a subcrítico y presenta un estado de fuerzas en equilibrio como se aprecia en la Figura 2.1, donde podemos ver dos secciones distintas; la primera previa al resalto hidráulico y la segunda posterior al mismo.

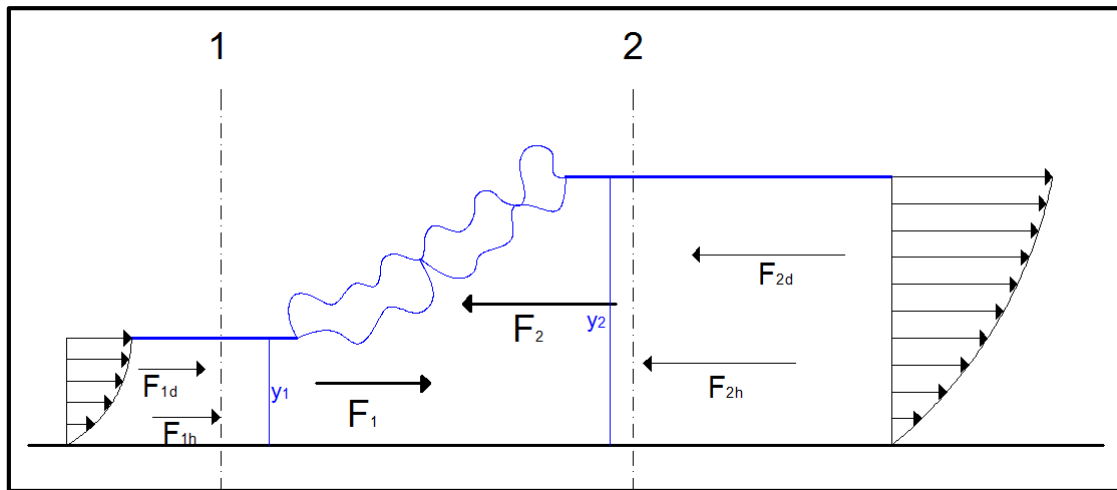


Figura 2.1. Fuerzas que intervienen en el resalto hidráulico.

Fuente: Elaboración propia.

En la primera sección actúan las fuerzas hidrostáticas F_{1h} y la fuerza dinámica F_{1d} ; de la misma manera, pero en sentido contrario en la siguiente sección, actúan F_{2h} y F_{2d} respectivamente. En ambas secciones la sumatoria de dichas fuerzas da como resultado F_1 y F_2 respectivamente, las cuales en un estado de equilibrio tendrían la misma magnitud, pero direcciones opuestas. La fuerza F_{1h} sería menor que F_{2h} debido al menor nivel de agua, caso contrario con F_{1d} que sería mayor a F_{2d} gracias a sus mayores velocidades.

La expresión utilizada que iguala estas fuerzas, conocida como *Ecuación de Cantidad de Movimiento*, viene dada por:

$$g\bar{y}_1 A_1 + Q^2/A_1 = g\bar{y}_2 A_2 + Q^2/A_2$$

El encuentro entre las masas de líquido de cada sección y el choque entre sus partículas provocan la generación de un medio muy turbulento que da a lugar a la absorción de aire de la atmósfera, dando como resultado una mezcla de agua y aire.

Las características del resalto hidráulico han sido aprovechadas para reducir las velocidades del flujo hasta valores que permitan el escurrimiento del mismo sin ocasionar tensiones superiores a los límites permitidos a los materiales que componen el perímetro mojado por donde transcurre el flujo. El lugar geométrico donde se presenta el resalto se le suele llamar *Colchón Hidráulico*.

2.2.1 Número de Froude

El número de Froude (Fr) es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido. Se puede expresar como:

$$Fr = \frac{\text{Fuerzas de Inercia}}{\text{Fuerzas de Gravedad}}$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D_h}}$$

Siendo:

- v : Velocidad media del canal.
- D_h : Profundidad hidráulica (Área de la sección transversal/ancho del espejo de agua) o una longitud característica.
- g : gravedad.

Nos informa el estado de un flujo para los casos de:

- $Fr > 1$, se trataría de un flujo de régimen *supercrítico*.
- $Fr = 1$, se trataría de un flujo de régimen *crítico*.
- $Fr < 1$, se trataría de un flujo de régimen *subcrítico*.

Además, el cálculo de tirantes conjugados y_1 , y_2 en un canal rectangular puede calcularse gracias a la siguiente expresión que se encuentra en función del número de Froude y necesitaría como dato previo uno de los dos tirantes:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr^2} - 1)$$

2.2.2 Tipos de resalto hidráulico

Se pueden considerar varios tipos de resaltos hidráulicos dependiendo precisamente del Número de Froude. Como se dijo previamente, se da el resalto a causa del cambio de un flujo supercrítico a un flujo subcrítico, por lo que el valor del número de Froude siempre será mayor a 1, caso contrario no se podría formar el resalto hidráulico.

Cuando el número de Froude varía entre 1 y 1.7, el cambio del tirante entre la primera y segunda sección es gradual y se manifiesta por ondulaciones ligeras y de corta longitud en la superficie del agua.

A partir del valor de 1.7, se comienzan a formar una mayor cantidad de ondulaciones aunque de menor altura; sin embargo, se hacen más grandes con valores más elevados del número. Aparte de las ondulaciones superficiales, el flujo prevalece bastante uniforme hasta que el número de Froude alcanza un valor de 2.5 aproximadamente.

Cuando el valor del número de Froude se encuentre entre 2.5 y 4.5, se produce un resalto oscilante en el cual el chorro corre a lo largo de la superficie en la que se encuentra hacia aguas abajo produciendo ondas superficiales que pueden ser perjudiciales y llegan mucho más allá del extremo del colchón amortiguador.

A partir de 4.5 y hasta un valor aproximado de 9, el resalto es estable y equilibrado. La turbulencia que se forma es de corta longitud, termina en el cuerpo principal del resalto y a pesar de las ondulaciones, la superficie del flujo es relativamente pareja.

Desde el valor 9 hacia adelante, aumenta la actividad de la turbulencia dentro del resalto y del remolino de la superficie, resultando ondas superficiales fuertes e irregulares aguas abajo del resalto.

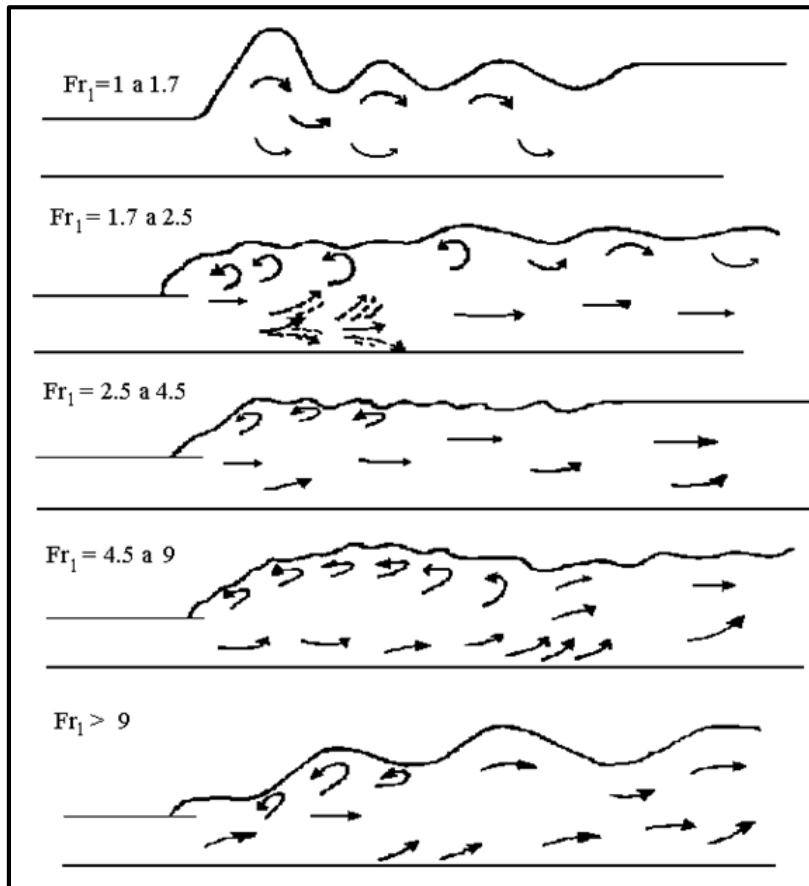


Figura 2.2. Tipos de resalto hidráulico.

Fuente: U.S. Bureau of Reclamation.

2.2.3 Características del resalto hidráulico

Las principales características del resalto hidráulico son:

2.2.3.1 Pérdida de energía

La pérdida de energía es igual a la diferencia de las energías específicas antes y después del resalto. Puede calcularse con:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_1 - y_2)^3}{4y_1y_2}$$

La relación $\Delta E/E_1$ es conocida como *Pérdida Relativa*.

2.2.3.2 Eficiencia

Es la relación entre las energías específicas después y antes del resalto hidráulico. Puede determinarse con la siguiente fórmula:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{(8Fr_1 + 1)^{3/2} - 4Fr_1^2 + 1}{8Fr_1^2(2 + Fr_1^2)}$$

La *pérdida relativa* se calcula con:

$$1 - E_2/E_1$$

Al igual que la fórmula anterior, es un valor adimensional dado en función de Fr_1 .

2.2.3.3 Altura del resalto

La diferencia entre los tirantes después y antes del resalto da como resultado la altura del mismo. Se expresa como $h_j = y_2 - y_1$. Esta altura también puede ser calculada como una *altura relativa* mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{h_j}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 3}{Fr_1^2 + 2}$$

2.2.3.4 Longitud

La longitud del resalto es un parámetro muy importante a considerar en el diseño de obras hidráulicas ya que definirá la necesidad de incorporar otras obras complementarias con el propósito de reducir esta longitud.

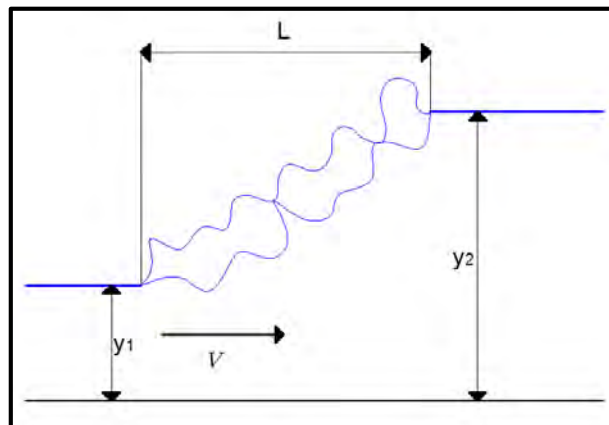


Figura 2.3. Longitud del resalto hidráulico.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a resultados de pruebas experimentales realizadas por el *Bureau of Reclamation*¹, se han obtenido los siguientes resultados con los cuales se puede calcular la longitud del resalto:

¹ Fuente: Hidráulica de canales abiertos, Ven Te Chow – Sección 15.5 Longitud del resalto.

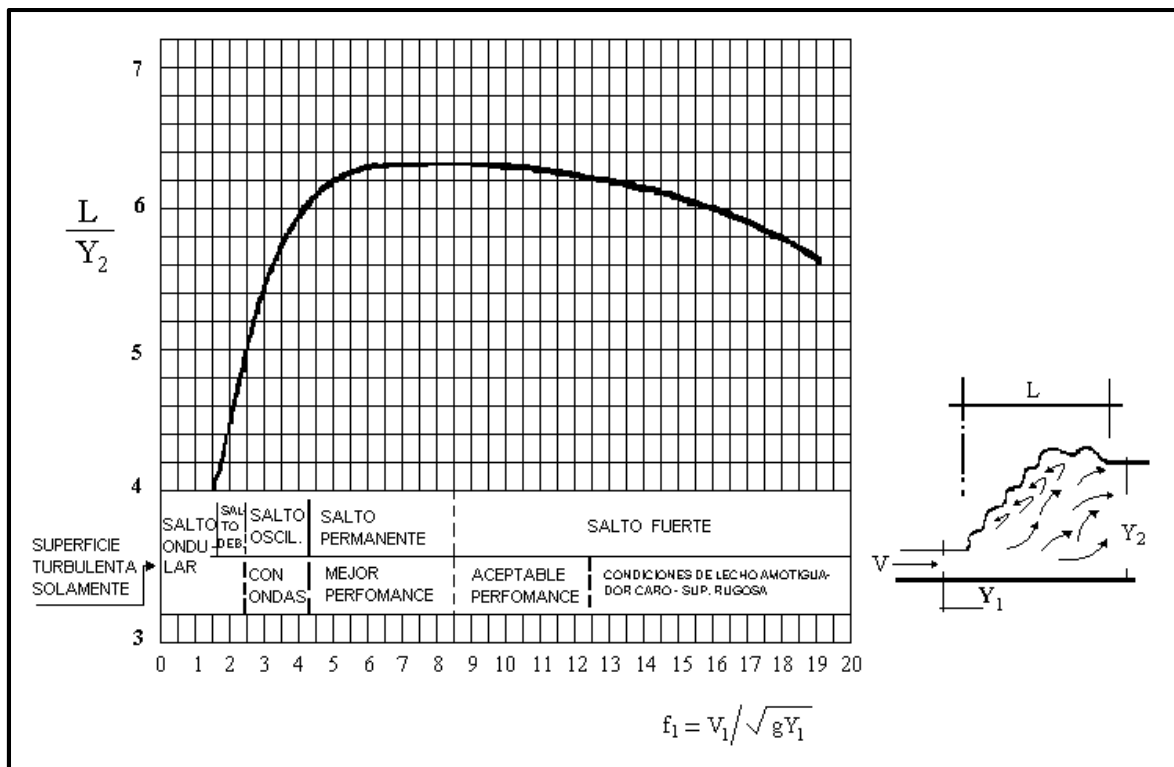


Figura 2.4. Diagrama utilizado para calcular la longitud del resalto hidráulico.

Fuente: Hidráulica de canales abiertos – Ven Te Chow. Elaborado por U.S. Bureau of Reclamation.

2.2.3.5 Perfil de la superficie del resalto

Este dato tiene utilidad para el diseño de las paredes laterales de la estructura hidráulica, tanto en lo que se refiere a su altura como a su estabilidad. Boris Bakhmeteff y Arthur Matzke² encontraron que el perfil de la superficie de un resalto hidráulico se puede representar por curvas adimensionales en función a Fr_1 , como se muestra en el siguiente diagrama:

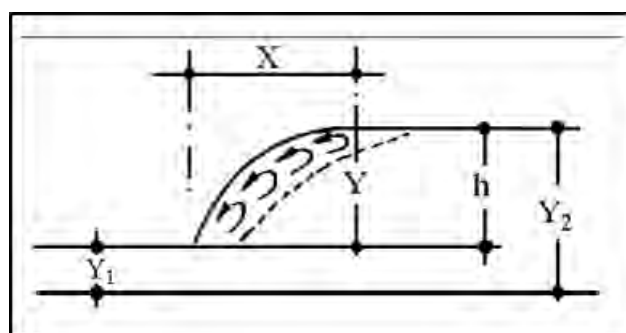


Figura 2.5. Perfil de la superficie del resalto hidráulico.

Fuente: Hidráulica de canales abiertos – Ven Te Chow. Elaborado por U.S. Bureau of Reclamation.

² Fuente: Hidráulica de canales abiertos, Ven Te Chow – Sección 15.6 El perfil superficial.

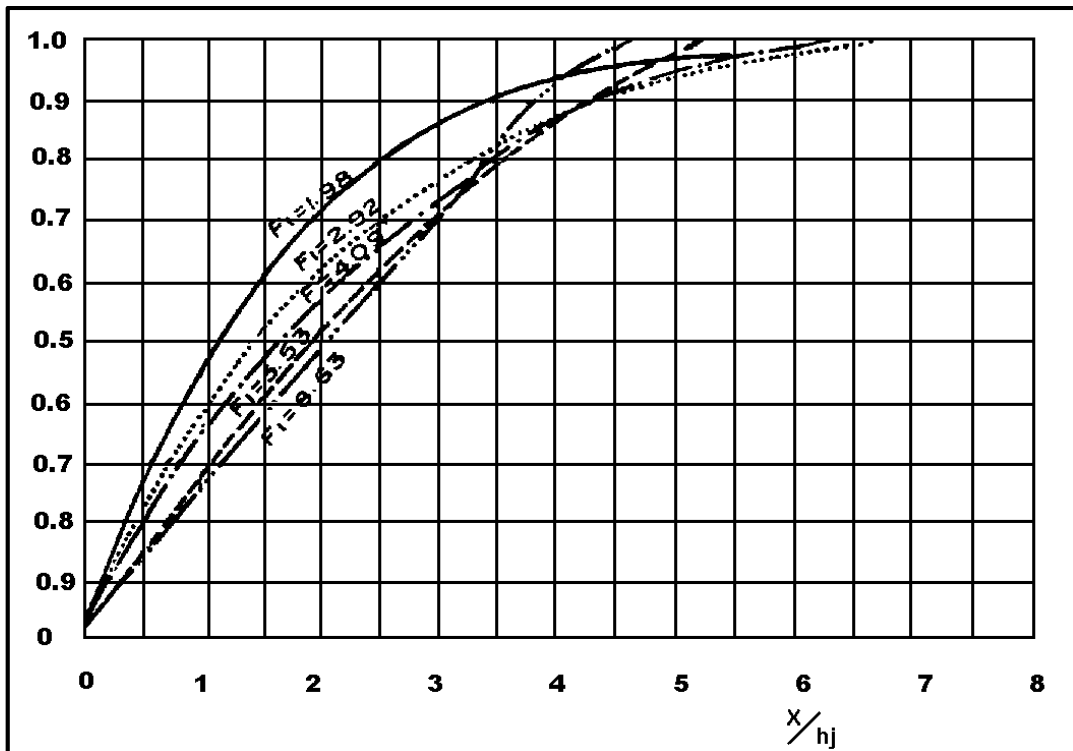


Figura 2.6. Diagrama para el cálculo del Perfil de la superficie del resalto.

Fuente: U.S. Bureau of Reclamation.

2.3 Colchón Hidráulico

Cuando no es posible lograr la disipación de energía deseada de manera natural, es decir, cuando el tirante conjugado necesario es menor al tirante existente aguas abajo, es necesaria la construcción de un colchón hidráulico.

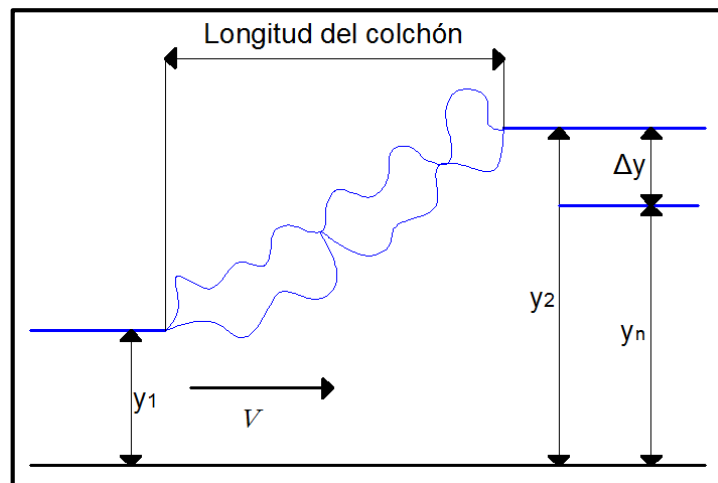


Figura 2.7. Longitud del colchón hidráulico.

Fuente: Elaboración propia.

En muy pocos casos el tirante conjugado y_2 del resalto hidráulico será igual al tirante disponible aguas abajo y_n ; en general y_2 será mayor presentándose un déficit Δy . Para superar este déficit se considera la alternativa de forzar a la disipación a través de la incorporación de elementos complementarios tales como: cuenco artificial, bloques de

impacto, incremento de rugosidad aguas abajo, etc. Obligando a desarrollar un resalto hidráulico en un tramo definido que sea lo más corto posible.

2.3.1 Diseño de un colchón hidráulico

Para incrementar el tirante de aguas abajo existen varias posibilidades, como por ejemplo: profundizar la solera, construir un travesaño de fondo, incrementar la rugosidad de la solera, reducir el ancho de la sección, reducir la pendiente de la solera, etc. De las cuales las dos primeras son opciones más factibles ya que el resto son difíciles de lograr.

2.3.1.1 Colchón hidráulico profundizando el nivel de la solera

La profundización de la solera incrementaría la altura de la caída de agua y en consecuencia la disminución del tirante y_1 y un tirante conjugado y_2 mayor; sin embargo, este colchón no solo presenta la compensación geométrica del déficit Δy de la altura del tirante aguas abajo y_n , sino que la confinación del resalto hidráulico genera una mayor intensidad de choque entre las partículas de agua y las paredes laterales de nuestra estructura y principalmente con el muro frontal que se formaría con la profundización de la solera. De esta manera se general las pérdidas de carga compatibles a las necesidades de disipación.

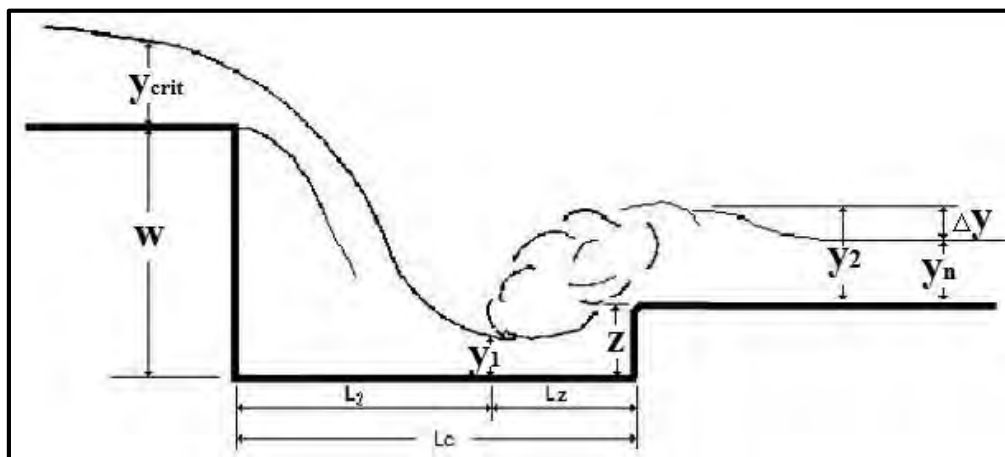


Figura 2.8. Colchón hidráulico profundizando el nivel de la solera.

Fuente: U.S. Bureau of Reclamation.

Para el cálculo de la profundidad del colchón z , que alcance la menor longitud posible, se determina el tirante conjugado a partir del tirante y_1 mediante las expresiones propuestas previamente. El tirante natural dependerá de las condiciones hidráulicas aguas debajo de la estructura. El déficit se obtendrá de la diferencia entre el tirante conjugado y el tirante existente aguas abajo ($\Delta y = y_2 - y_n$). La expresión que determina el valor de z será:

$$z = \Delta y \left[n + \frac{1 - n}{W/y_{crit}(1 - n) + 1} \right]$$

Donde: $n = 0.65 - 0.5Fr_n$ ($Fr_n =$ Número de Froude natural aguas abajo).

Se recomienda $L_z = 10z$ como longitud para el desarrollo adecuado del resalto hidráulico. Este valor deberá ser revisado con los cálculos obtenidos previamente mediante la Figura 2.4.

2.3.1.2 Colchón hidráulico con travesaño de fondo

Otra posibilidad para el colchón hidráulico es emplear un travesaño de fondo con la misión de elevar el tirante aguas abajo hasta los niveles que compensen el déficit del tirante conjugado. Esto sería útil en casos que la profundización de la solera no se puede emplear debido a tema de costos, tipo de suelo, entre otros.

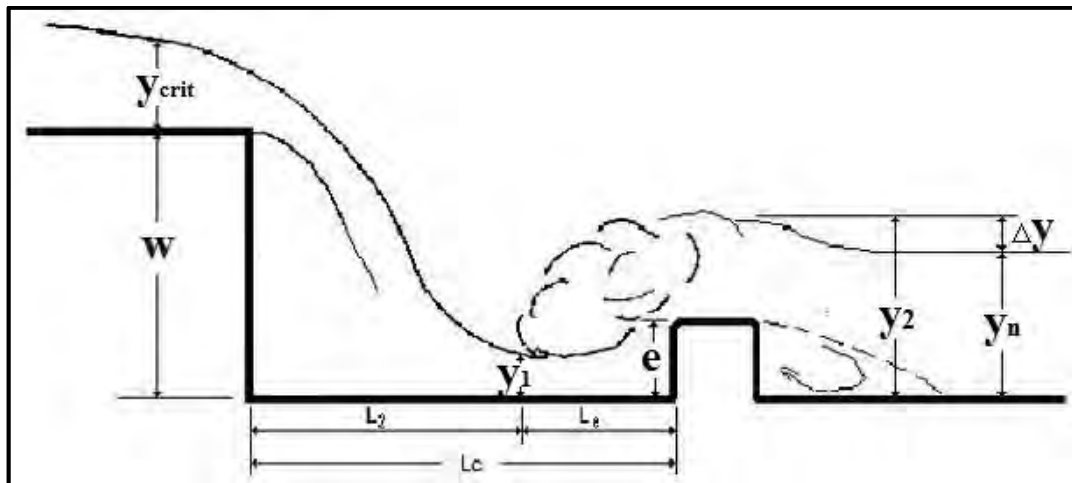


Figura 2.9. Colchón hidráulico con travesaño de fondo.

Fuente: U.S. Bureau of Reclamation.

Tal como en el caso anterior, podemos adoptar $L_e = 10e$ para una longitud adecuada de desarrollo del resalto hidráulico.

La altura del travesaño de fondo debe tener como máximo la altura de la caída mínima necesaria para la formación del resalto hidráulico, caso contrario, podría generar un nuevo resalto hidráulico.

En estructuras de elevada pendiente se desarrollan estados de flujo con gran velocidad que requieren condiciones hidráulicas muy exigentes que son difíciles de alcanzar con las opciones señaladas previamente, por lo que se recurre a otros métodos de disipación.

2.4 Estanques amortiguadores de la U.S.B.R.

De acuerdo a la clasificación del U.S. Bureau of Reclamation, existen cinco tipos de estanques amortiguadores:

2.4.1 Tipo I: Estanques amortiguadores para canales o aliviaderos con pendiente moderada

Los estanques tipo I son utilizados cuando el número de Froude de llegada Fr_1 , llega como máximo a 2.5. Aproximadamente al valor de 1.7, el tirante conjugado es casi el doble al

tirante de llegada, mientras que la velocidad de salida es la mitad de la velocidad de llegada.

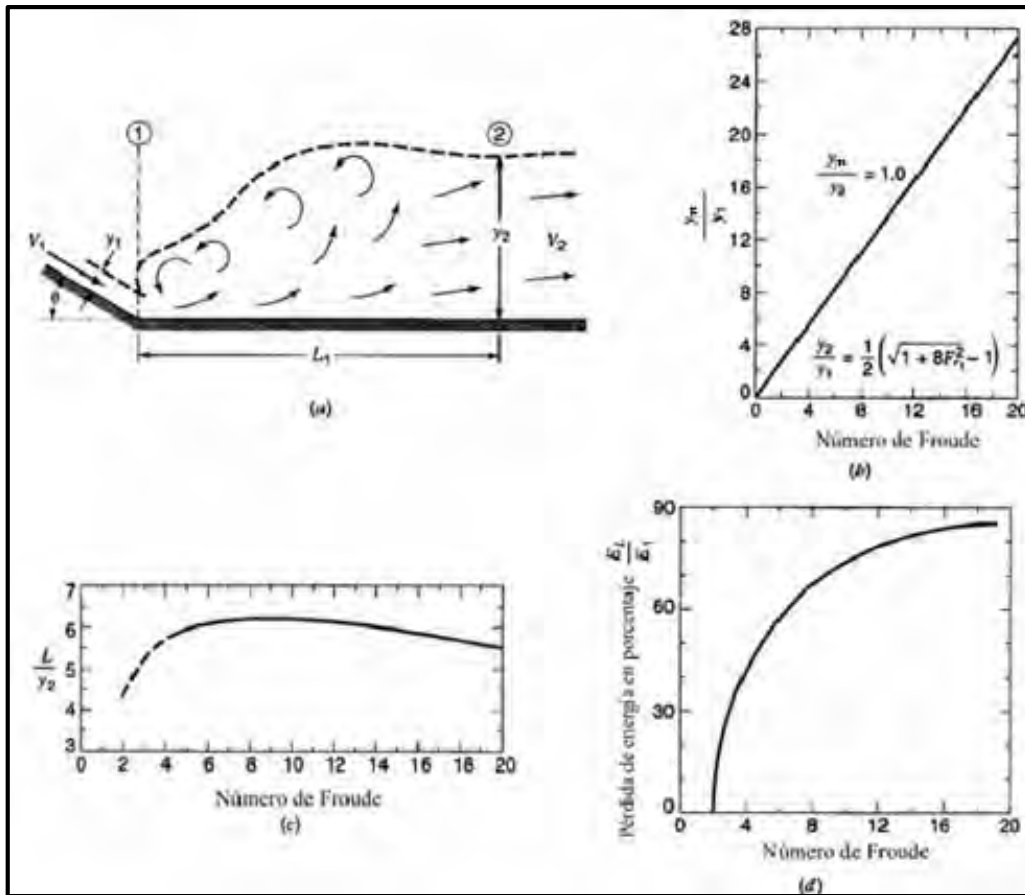


Figura 2.10. Diagramas para diseño de estanque amortiguador Tipo I.

Fuente: U.S. Bureau of Reclamation – Design of stilling basins and energy dissipators.

2.4.2 Tipo II: Estanques amortiguadores para presas altas y presas de tierra con canales extensos

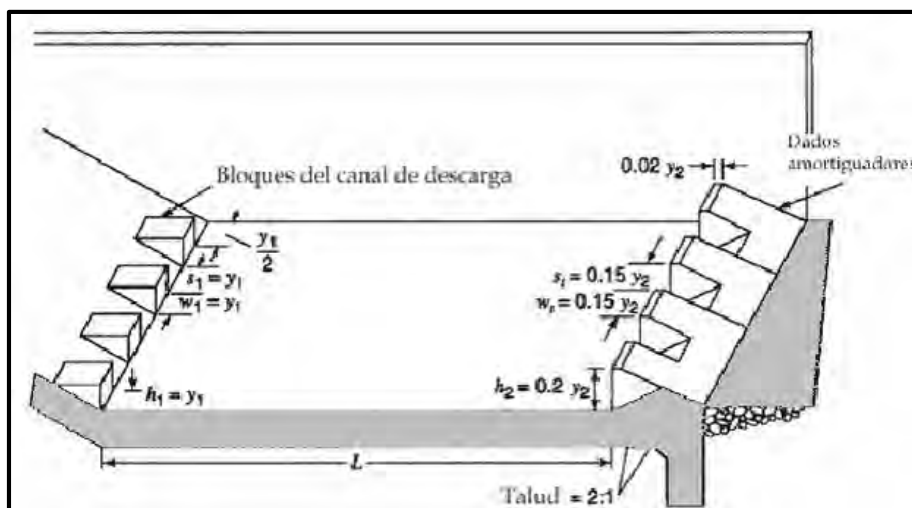


Figura 2.11. Estanque amortiguador Tipo II.

Fuente: U.S. Bureau of Reclamation – Design of stilling basins and energy dissipators.

Este tipo de estanque disipador es utilizado cuando el Fr_1 es mayor a 4.5 o existen velocidades mayores a 15 m/s. Se caracteriza por contener bloques en la rápida del extremo de aguas arriba y un umbral dentado en el extremo de aguas abajo. No se utilizan bloques de impacto debido a que las velocidades de entrada son relativamente altas y pueden causar cavitación en dichos bloques.

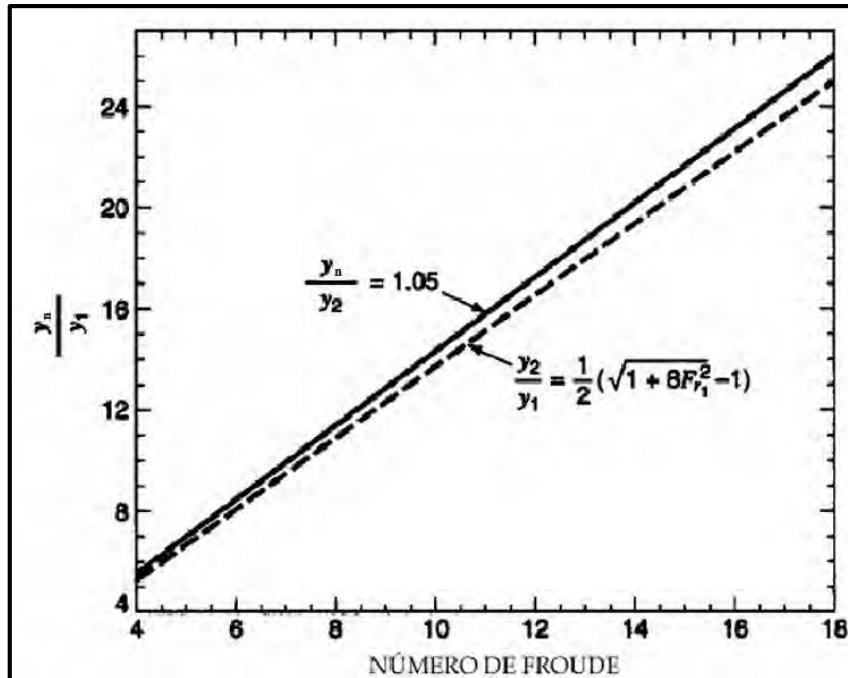


Figura 2.12. Diagrama para cálculo de tirante conjugado en estanque Tipo II.
Fuente: U.S. Bureau of Reclamation – Design of stilling basins and energy dissipators.

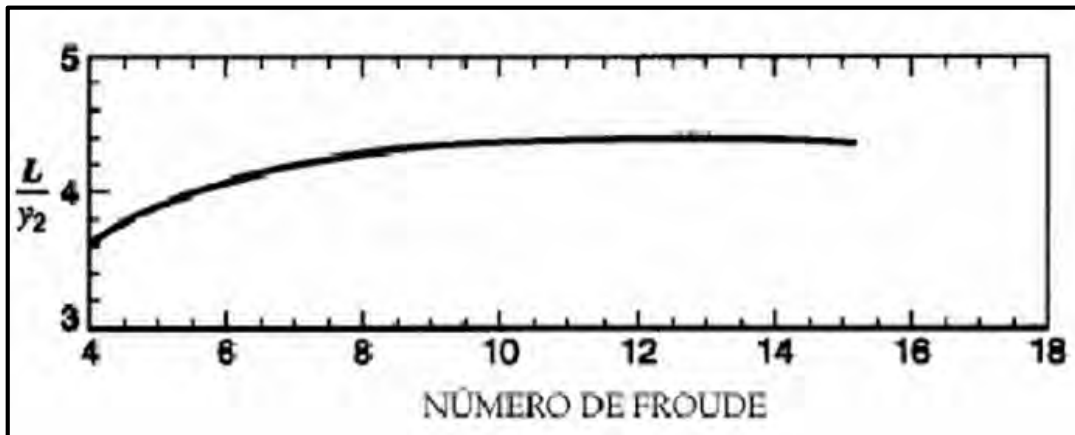


Figura 2.13. Diagrama para cálculo de la longitud de un estanque Tipo II.
Fuente: U.S. Bureau of Reclamation – Design of stilling basins and energy dissipators.

2.4.3 Tipo III: Estanques amortiguadores pequeños para estructuras de canal, pequeñas estructuras de salida y pequeños aliviaderos

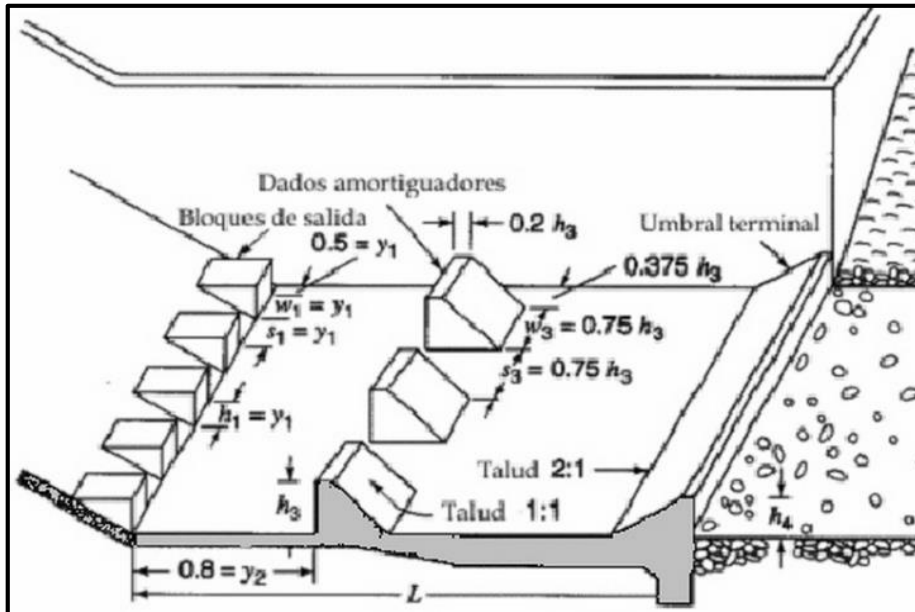


Figura 2.14. Estanque amortiguador Tipo III.

Fuente: U.S. Bureau of Reclamation – Design of stilling basins and energy dissipators.

Se caracterizan por poseer un umbral de salida y dados aguas debajo de los bloques de caída. Son más cortos que los estanques Tipo II.

Estos estanques son utilizados en los casos en los que la velocidad no se encuentre entre 15 y 18 m/s, ya que a mayores velocidades existe la posibilidad de que presiones bajas en los dados amortiguadores originen cavitación, y Fr_1 sea mayor a 4.5.

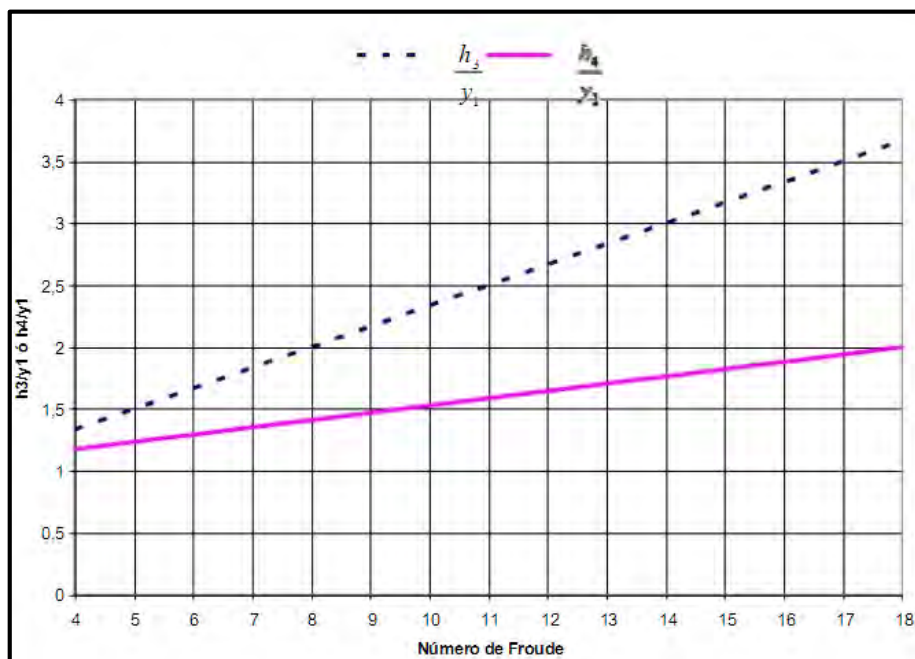


Figura 2.15. Diagrama para cálculo de bloques para estanque amortiguador Tipo III.

Fuente: U.S. Bureau of Reclamation – Design of stilling basins and energy dissipators.

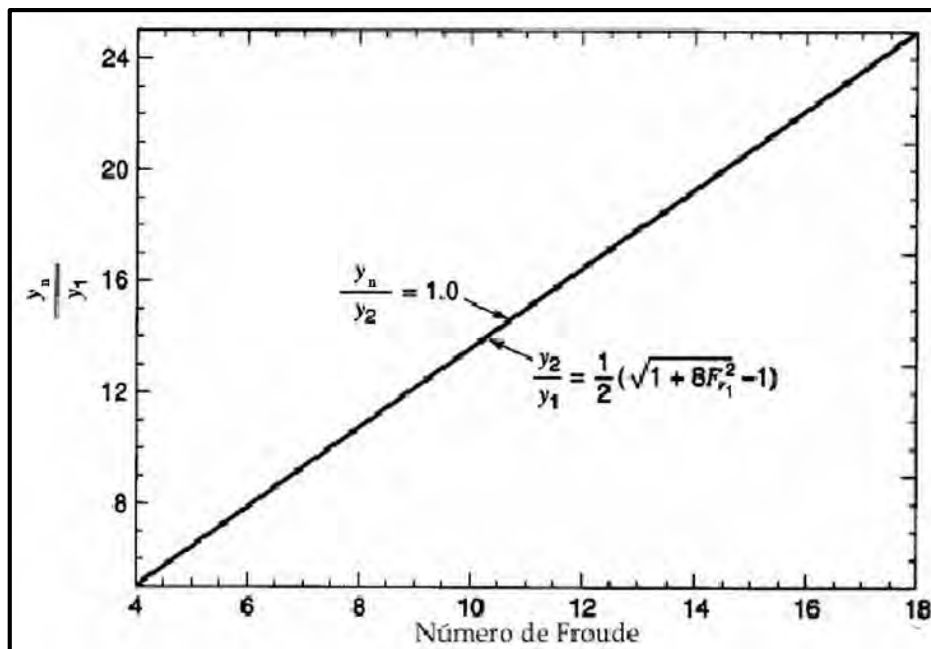


Figura 2.16. Diagrama para cálculo de tirante conjugado en estanque Tipo III.

Fuente: U.S. Bureau of Reclamation – Design of stilling basins and energy dissipators.

2.4.4 Tipo IV: Estanques amortiguadores y supresor de ondas para estructuras de canal, obras de toma y presas de derivación

Cuando el Fr_1 está comprendido entre 2.5 y 4.5, se producirá un resalto hidráulico oscilante en el estanque amortiguador, el cual genera una onda difícil de atenuar. Este tipo de estanque se diseña para afrontar este inconveniente eliminando dicha onda en su fuente. Esto se logra intensificando el vórtice que aparece en la parte superior del resalto con chorros direccionales deflectados utilizando grandes bloques en la parte de la rápida. Para un mejor comportamiento hidráulico, es conveniente construir estos bloques más angostos, preferiblemente con un ancho equivalente a $0.75y_1$.

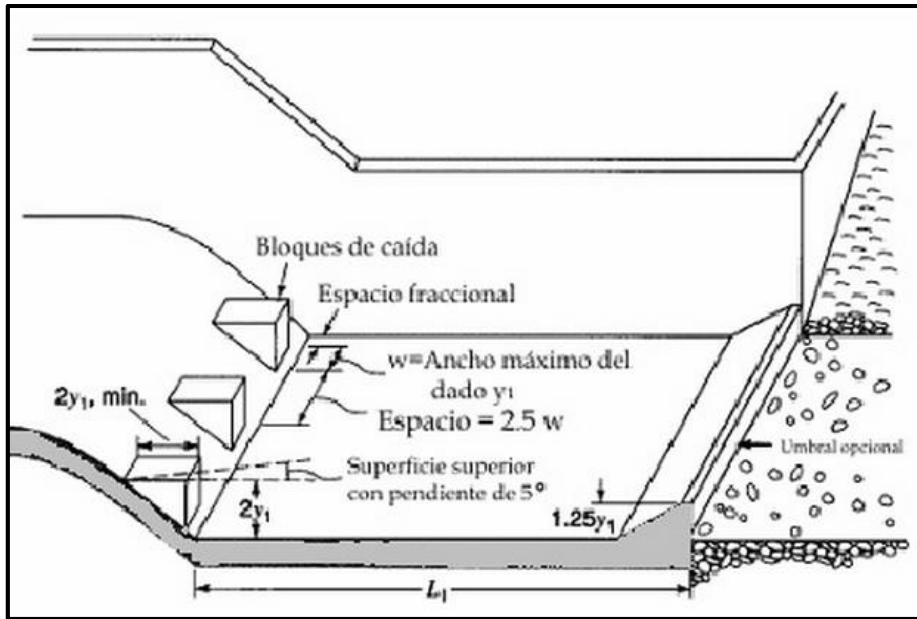


Figura 2.17. Estanque amortiguador Tipo IV.

Fuente: U.S. Bureau of Reclamation – Design of stilling basins and energy dissipators.

2.4.5 Tipo V: Estanques amortiguadores para pendiente pronunciada

Se ha hablado mucho de las ventajas y desventajas de los estanques amortiguadores con pendientes pronunciadas, pero la realidad es que no se cuenta con suficiente información para poder sacar una conclusión al respecto. En la figura 2.18 se muestra estos distintos casos de estanques de pendiente pronunciada:

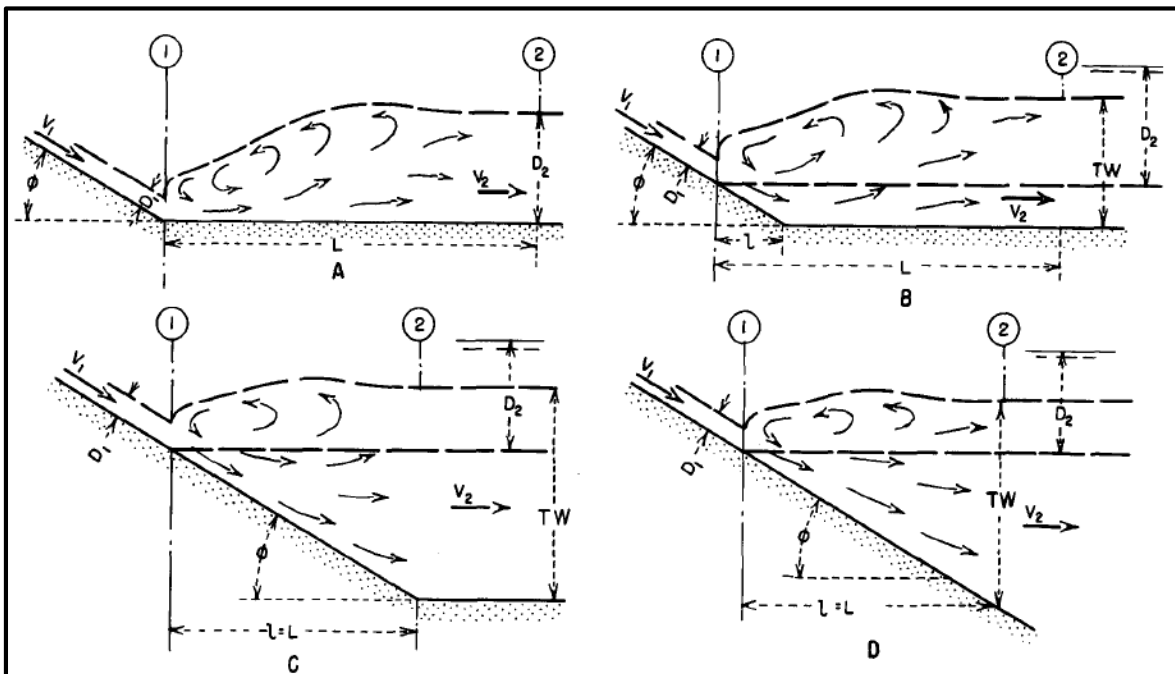


Figura 2.18. Estanques amortiguadores para pendientes pronunciadas (Tipo V).

Fuente: U.S. Bureau of Reclamation – Design of stilling basins and energy dissipators.

En el caso A el resalto ocurre en una plataforma horizontal; en el caso B el resalto inicia en la pendiente y termina en la plataforma horizontal; en el caso C el resalto inicia en la

pendiente y termina en donde termina la misma y empieza la plataforma horizontal; en el caso D el resalto se da en el pendiente en su totalidad. Los dos primeros casos pueden generar desgaste en la plataforma hasta el punto de destruirla, mientras que las otras dos opciones tienen los mismos resultados aguas abajo, ya que el resalto que se genera no llega a la plataforma.

Este tipo de plataformas no son recomendables debido a sus altos costos, es por eso que se recomienda encontrar un arreglo en la pendiente que disminuya las condiciones de descarga y de la misma manera los costos.

2.5 Disipación de energía por dispersión (salto de sky)

Otra alternativa para disipar la energía cinética es la dispersión del flujo generando un salto por medio de un canal de evacuación de solera curvada, para que de esta manera el chorro se aleje y reduzca la velocidad del flujo en su punto de llegada.

De esta manera, el chorro impacta aguas abajo de la estructura sin comprometerla. A pesar de esto, se debe considerar la erosión que se generaría en el cauce del río debido a las variantes que puedan existir aguas abajo u otras estructuras.

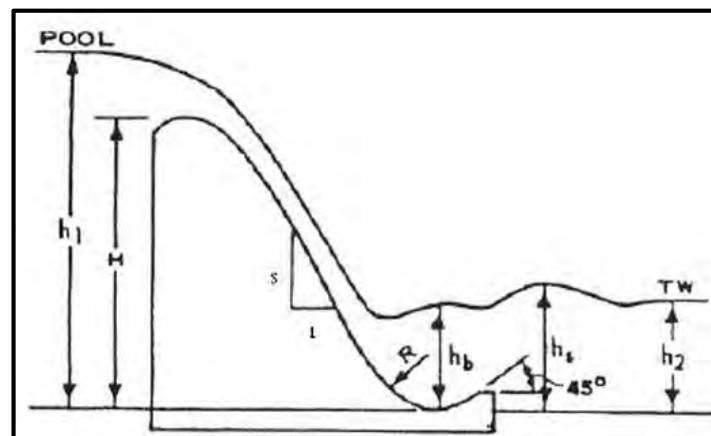


Figura 2.19. Salto de Sky.

Fuente: U.S. Bureau of Reclamation – Design of stilling basins and energy dissipators.

Capítulo 3

Modelación Hidráulica

3.1 Introducción

Antes de definir lo que es un modelo hidráulico, definiremos lo que es un *modelo*. Un modelo es una representación abstracta, conceptual, física, matemática, entre otros, de sistemas, estructuras o procesos con el fin de analizar, describir, simular, explicar, explorar fenómenos o procesos. Permite determinar un resultado a partir de datos de inicio controlados y es parte esencial en las actividades científicas.

Teniendo claro el concepto de modelo, llamamos *modelo hidráulico* a representaciones de dimensiones reducidas de estructuras hidráulicas, mediante las cuales se puede predecir el comportamiento o conducta de la estructura real, a la que conocemos como *prototipo*. Los principios en los que se basan estos procedimientos incluyen las teorías de similitud hidráulica.

El modelo y el prototipo están ligados el uno con el otro, es por eso que el estudio del modelo nos sirve para realizar la simulación de situaciones reales que se podrían producir en el prototipo, para poder ver como éste se vería afectado antes dichas situaciones. El estudio del modelo constituye información necesaria para comprender la naturaleza del prototipo.

Los modelos hidráulicos son muy útiles y prácticos para la investigación ya que se caracterizan por:

- Despreciar fuerzas o elementos de la naturaleza que intervienen mínimamente en el comportamiento del prototipo, tales como las fuerzas del viento, temperatura, entre otros parámetros.
- La investigación se realiza bajo condiciones controladas, esto quiere decir que los investigadores son quienes proponen las condiciones de los ensayos dependiendo de las variables o parámetros que se desean observar e investigar. Por ejemplo, se puede realizar una investigación en una estructura bajo condiciones extremas de caudales decamilenarios, el cual es altamente improbable que ocurra en la naturaleza, pero que si podríamos ver el comportamiento de nuestra estructura en este caso a través del modelo.

3.2 Clasificación general de los modelos hidráulicos

3.2.1 Modelo físico

Es la representación física de un fenómeno que ocurre u ocurriría en una obra hidráulica, con el fin de observarlo, controlarlo, analizarlo y en lo posible solucionarlo. Esto con fin de confirmar la validez del diseño, optimizarlo o tomar en cuenta efectos colaterales que se deberán tener en cuenta para un futuro rediseño.

Existen dos criterios de clasificación de los modelos físicos que se detalla a continuación:

3.2.1.1 Clasificación respecto de la semejanza geométrica del prototipo

- Modelos geoméricamente semejantes: Aquellos modelos en los que se conserva la escala de todas las variables geométricas, es decir, existe un solo factor de reducción (al que llamaremos *escala*) de todas las magnitudes geométricas y las que deriven de las mismas.
- Modelos geoméricamente distorsionados: A diferencia de la clase de modelo anterior, estos modelos usan diferentes factores de reducción para diferentes dimensiones de la estructura. Por ejemplo, es posible que las dimensiones horizontales tengan una escala y las dimensiones verticales otras.

3.2.1.2 Clasificación respecto de la movilidad y deformabilidad del contorno

- Modelos de contorno fijo: Si la deformabilidad del contorno no es relevante, puede presentarse en el modelo simplificado como si fuera fijo o indeformable.
- Modelos de contorno móvil: Se utilizan cuando se debe representar el contorno de forma fiel y confiable debido a que los fenómenos que ocurren, pueden estar determinados por la deformabilidad de la sección.

3.2.2 Modelos analógicos

Es la reproducción de un fenómeno en estudio de un prototipo en un modelo diferente al original, pero que aprovecha las similitudes de las leyes matemáticas que gobiernan el fenómeno en ambos sistemas.

De esta manera, se podría resolver un fenómeno de menor dificultad y emplearlo para resolver el otro. Esto ofrece la posibilidad de resolver problemas hidráulicos basándose en mediciones hechas sobre un fenómeno análogo.

3.2.3 Modelos matemáticos

Son modelos numéricos en los que se emplean ecuaciones o expresiones matemáticas que definen simplificado el fenómeno en estudio que ocurre en el prototipo. Existen tres tipos de modelos matemáticos:

- Modelos determinísticos: Los procesos físicos involucrados se expresan en relaciones funcionales determinísticas en los que no se considera la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.
- Modelos estocásticos: Los procesos físicos se representan haciendo uso de variables aleatorias, probabilísticas que involucran el fenómeno en estudio.
- Modelos de simulación numérica: Se emplean principalmente ecuaciones diferenciales y condiciones iniciales de borde que son resueltos utilizando técnicas de análisis numérico, tales como métodos de diferencias finitas y elementos finitos.

Los métodos de diferencias finitas simulan algunos procesos imposibles de resolver con el simple cálculo resolviendo ecuaciones que tienen dominio continuo mediante la solución en un número finito de puntos discretos en dicho dominio, llamados *nodos*.

El método de elementos finitos discretiza el área de estudio mediante una malla conformada por pequeños elementos que tienen formas triangulares o rectangulares. Los vértices de estos elementos representan los nodos de la malla en los cuales se busca encontrar el valor de la variable incógnita.

3.3 Paralelo entre modelos físicos y matemáticos

A continuación se presenta un paralelo de ciertas limitaciones que tienen los modelos físicos y numéricos:

Tabla 3.1. Paralelo de las limitaciones entre modelos físicos y numéricos.

Modelo Físico	Modelo Numérico
Tamaño del modelo (espacio en el laboratorio).	Capacidad de almacenamiento en la memoria del computador.
Caudal de bombeo.	Velocidad de cálculo.
Carga hidráulica (capacidad de bombeo).	Conjunto incompleto de ecuaciones.
Leyes de Similitud.	Hipótesis de turbulencias.
Escala mínima del modelo.	En ecuación de simplificación: - Exactitud de relaciones supuestas. - Disponibilidad de coeficientes.
Método de medida y recolección de datos	Estabilidad numérica, convergencia del cálculo numérico.

Fuente: Modelación Hidráulica – Biblioteca virtual UDEP.

3.4 Uso e importancia de modelos físicos en una investigación

Son útiles los modelos físicos como herramientas de apoyo al diseño de estructuras hidráulicas y en general a la ingeniería hidráulica. Puede considerarse una fase previa a la construcción del prototipo correspondiente, ya que éstos involucran fenómenos complejos para los cuales no existe una teoría o solución aceptada (estos pueden ser casos como los fenómenos de turbulencia, sedimentación, erosión, como en el caso de un río). Estos fenómenos pueden ser investigados bajo condiciones relativamente simples, seguras, controladas y a un menor costo.

A pesar de que la investigación que se realizaría en un modelo toma tiempo y dinero, supone un gran ahorro gracias a las mejoras que se introduzcan al diseño de la estructura, ya que es mucho más barato probar algún cambio del diseño en el modelo, a la corrección de defectos que hubieran supuesto obras de reparación en el futuro, al mejor conocimiento y manejo de la obra, a la verificación de otros diseños y a la seguridad.

La modelación física sigue siendo una herramienta muy útil a pesar del avance que existe en la modelación matemática, y es que, al no poder describir ciertos fenómenos completamente en formas matemáticas, deja un vacío en la investigación que un modelo físico puede llenar.

Es aquí donde radica la importancia de la modelación física, llenar aquellos vacíos en los que la modelación matemática aún no ha podido llegar y los cálculos hidráulicos no pueden sustituir a la experiencia y aprendizaje que se generan a partir de reproducir físicamente un fenómeno ocurrente.

3.5 Leyes de semejanza en el diseño de modelos físicos

Para el diseño de modelos hidráulicos es necesaria una homogeneidad dimensional sobre las cantidades implicadas en un fenómeno físico para que de esta manera se obtengan valiosos indicios acerca de las relaciones que conectan entre sí sus magnitudes. Esto se da a partir del *análisis dimensional*.

Las leyes de semejanza parten de este análisis dimensional y expresan las relaciones entre los distintos parámetros que gobiernan el comportamiento de un fluido.

Por razones prácticas, no se puede asegurar una similitud total entre el modelo y el prototipo, ya que resulta incompatible intentar igualar todas las condiciones mecánicas (Número de Reynolds, Froude, Weber, Mach, etc.) del flujo. Para solucionar esto, en la mayoría de modelos físicos se opta por diseñar con la condición de cumplir con una de estas propiedades, a pesar de los errores o desviaciones que puedan generarse y deban tenerse en cuenta durante la reproducción de los fenómenos a analizar.

3.5.1 Modelos a semejanza de Froude

Como se mencionó en el capítulo anterior, el número de Froude representa la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitatorias, así que aquellos modelos que están determinados principalmente por fuerzas gravitacionales, se acepta que la condición de semejanza dinámica

esté dada para $F_r = 1$, siendo F_r la relación entre los números de Froude del modelo y del prototipo. Esto significa que las escalas estarán gobernadas por esta relación.

Este tipo de modelación es aplica a flujos con superficie libre, en especial cuando el escurrimiento es bruscamente variado donde los efectos friccionales son despreciables.

El modelo en el que se basa la presente tesis, se rige bajo este tipo de semejanzas.

$$\text{Número de Froude} = Fr_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D_h}}$$

3.5.2 Modelos a semejanza de Reynolds

El número de Reynolds expresa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de fricción interna en un fluido debido a su viscosidad. Esta relación se utiliza en el caso de estudio de fenómenos como flujos laminar en presión o superficie libre, flujo turbulento hidrodinámicamente liso y el flujo viscoso alrededor de un obstáculo sumergido, etc.

La condición de semejanza viene dada por $Re_r = 1$, siendo Re_r la relación de los números de Reynolds entre el modelo y el prototipo.

$$\text{Número de Reynolds} = Re_r = \frac{\rho v_p l_p}{\mu_p} = \frac{\rho v_m l_m}{\mu_m}$$

Donde:

- v : Velocidad del flujo.
- l : Longitud característica.
- μ : Viscosidad.
- ρ : Densidad del fluido.

3.5.3 Modelos a semejanza de Weber

El número de Weber expresa el efecto de la tensión superficial entre líquidos y gases y también entre dos líquidos. Estas fuerzas, al ser de origen molecular, resultan significativas y predominantes sólo cuando las dimensiones del flujo son pequeñas. Es decir, escurrimiento de muy baja altura, ondas superficiales pequeñas.

La condición a satisfacer es $We_r = 1$, donde We_r es la relación de los números de Weber del modelo y del prototipo.

$$\text{Número de Weber} = We_r = \frac{\rho v_p^2 l_p}{\sigma_p} = \frac{\rho v_m^2 l_m}{\sigma_m}$$

Donde:

- σ : Tensión superficial.

3.6 Similitud en modelos físicos

El modelo debe representar adecuadamente al prototipo, para que esto suceda, es necesario que se comporte mecánicamente similar a éste, es decir, exista similitud geométrica, cinemática y dinámica, además de similitudes relacionadas con los sedimentos.

3.6.1 Similitud geométrica

Involucra la similitud de forma. Gracias a un *factor de escala*, tanto el modelo como el prototipo tienen las mismas propiedades geométricas respecto a sus longitudes, en cada una de sus partes. Si no fuese así, sería un modelo distorsionado.

Este tipo de similitud es quizás el requisito primario para que un modelo pueda satisfacer la correspondencia con su respectivo prototipo. Sin embargo, no es tan sencillo de obtener esta similitud total, ya que no se trata solamente de longitudes, sino también de rugosidades que deberían ser geoméricamente similares o de tamaño de sedimentos en el caso de estudios de arrastre de los mismos o sedimentación en ríos.

El factor de escala utilizado para el modelo puede expresarse como:

$$L_r = L_m / L_p$$

Siendo L_m y L_p dimensiones lineales correspondientes al modelo y al prototipo respectivamente y L_r el factor de escalas. Por consiguiente también tendríamos las siguientes relaciones para áreas y volúmenes:

$$A_r = \left(L_m / L_p \right)^2 = L_r^2 \quad ; \quad V_r = \left(L_m / L_p \right)^3 = L_r^3$$

3.6.2 Similitud cinemática

La similitud cinemática implica la similitud en el movimiento. Esto implica similitud tanto en tiempo como en espacio (similitud geométrica). Por lo tanto, si las escalas en longitud son fijas, debe suceder lo mismo con las escalas con respecto al tiempo.

Si los movimientos de los fluidos son cinemáticamente similares, los patrones formados por líneas de corriente son geoméricamente similares en los tiempos correspondientes. Entonces, las magnitudes de velocidades estarán corresponden a la siguiente relación:

$$V_r = L_r / T_r$$

3.6.3 Similitud dinámica

En este caso se requiere que además de que en ambos sistemas exista la similitud geométrica y dinámica, también exista una igualdad en la razón de todas las fuerzas actuantes en los mismos.

Esto quiere decir que debería existir una similitud de modelo y prototipo en las fuerzas de inercia, de presión, a las producidas por acción de la gravedad, tensión superficial, viscosidad y por compresión elástica del fluido. Pero no todas estas relaciones pueden considerarse como independientes, ya que deben determinarse algunas a partir de ya haber establecido las demás. Así, se tienen fuerzas que actúan en forma mínima comparadas con la fuerza predominante e inclusive otras fuerzas no llegan a actuar en el fenómeno que se está estudiando.

Como se explicó previamente, en la práctica, el movimiento de un fluido puede ser reproducido buscando la similitud de solo la fuerza que predomina sobre las demás.

Para los problemas de obras hidráulicas y fluviales gobernados por flujo libre como en el caso de la presente tesis, la fuerza predominante es la de gravedad. La ley de semejanza en este caso viene dada por el Número de Froude como se vio en el capítulo anterior y a partir de este se pueden sacar las siguientes relaciones:

$$F_r = \frac{V_m / \sqrt{gL_m}}{V_p / \sqrt{gL_p}}$$

Siendo la semejanza dinámica $F_r = 1$ y simplificando la gravedad en ambos términos, obtendríamos:

$$V_r = \frac{V_m}{V_p} = \frac{\sqrt{L_m}}{\sqrt{L_p}} = L_r^{1/2}$$

Con esta escala podemos calcular por ejemplo la relación entre caudales:

$$Q_r = V_r \cdot A_r = L_r^{1/2} \cdot L_r^2 = L_r^{5/2}$$

Es decir, que si en el prototipo el caudal equivale a 100 m³/s y estamos utilizando una escala de 1:20, el caudal en el modelo será de 0.056 m³/s.

$$Q_r = \frac{Q_m}{100} = (1:20)^{5/2};$$

3.6.4 Similitud sedimentológica

Es necesaria para muchos aspectos de la investigación, tales como el proceso de sedimentación, erosión, transporte de sedimentos, deposición, concentración, entre otros.

Para la modelación sedimentológica, se utiliza la semejanza del número de Froude teniendo en cuenta la escala de velocidad del flujo $V_r = W_r = L_r^{0.5}$. Donde V_r es la relación entre velocidades del flujo entre modelo y prototipo; W_r es la relación de velocidad de caída de sedimento.

Con dichas velocidades se pueden determinar los diámetros correspondientes a las partículas que formarían parte del modelo, garantizando una velocidad análoga a su correspondiente prototipo.

3.6.4.1 Material del lecho móvil

El diámetro del material del lecho móvil también vendrá relacionado con la similitud del número de Froude entre el modelo y prototipo.

Partiendo de los conceptos de esfuerzo del flujo y esfuerzo resistente de las partículas tendremos:

$$\tau_{flujo} = \gamma_w \cdot y \cdot S$$

$$\tau_{resistente} = C \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d$$

Donde:

- y : Tirante de agua.
- S : Pendiente energética.
- C : Coeficiente.
- d : Diámetro del grano.
- γ_w : Peso específico del agua = 9810 N/m³.
- γ_s : Peso específico del sedimento.
- τ : Esfuerzo cortante N/m².
- ρ : Densidad Kg/m³.

Para que una partícula pueda desplazarse, el esfuerzo de flujo de ser mayor o igual al esfuerzo resistente. Igualando ambos términos tendremos:

$$\gamma_w \cdot y \cdot S = C \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d$$

$$C = \frac{\gamma_w \cdot y \cdot S}{(\gamma_s - \gamma_w) d}$$

Con esta relación de esfuerzos y considerando un modelo sin distorsión, de igual escala geométrica y utilizando sedimentos de igual origen natural que el prototipo, tenemos:

$$Fr^* = \frac{\gamma_W \cdot R_M \cdot S_M}{(\gamma_S - \gamma_W)_M d_M} = \frac{\gamma_W \cdot R_P \cdot S_P}{(\gamma_S - \gamma_W)_P d_P}$$

Reduciendo la expresión por los parámetros previamente descritos y considerando los sedimentos de un peso específico igual tanto en modelo como en prototipo, tenemos:

$$\frac{R_M}{d_M} = \frac{R_P}{d_P}$$

$$d_r = \frac{d_P}{d_M} = \frac{R_P}{R_M} = L_r$$

Por lo tanto, la escala de tamaño o diámetro de sedimentos es igual a la escala geométrica:

$$d_r = L_r$$

3.7 Efectos de escala

Al hablar de “efectos de escala”, nos referimos a ciertos errores causados por ésta debido a no darse las condiciones completas de semejanza mecánica en los modelos, ya que en razón de la magnitud de la transformación adoptada existen fuerzas que cobran importancia, especialmente las fuerzas moleculares que son insignificantes en prototipo y que en cambio, pueden ser relevantes en el modelo.

Es por ello, que en el diseño del modelo se deben considerar ciertos límites para evitar o minimizar estos efectos de escala.

- En modelos a semejanza de Froude, los efectos de capilaridad se hacen despreciables cuando la carga en vertederos de pared delgada o napas vertientes a través de aberturas es mayor de 6 cm, así mismo la longitud de ondas de superficie de ser mayor a 1.7 cm. Para que se produzcan ondas de gravedad, la velocidad de la corriente en superficie libre debe ser mayor a 23 cm/s. La profundidad del escurrimiento debe ser mayor a 1.5 cm.
- Los fenómenos de cavitación, efectos de viscosidad y tensión superficial se eliminan si tanto el número de Weber y de Reynolds son suficientemente grandes.
- El régimen de escurrimiento en el modelo y prototipo debe ser el mismo, ya sea laminar o turbulento.
- Para la modelación de arrastre de fondo, debe asegurarse que las partículas granulares del prototipo llevadas al modelo, no sean tan pequeñas que lleguen a tener propiedades cohesivas. Además, debe asegurarse también la independencia respecto del número de Reynolds del grano para que de esta manera se logre que la escala de diámetros del grano sea simplemente geométrica.

- Al utilizar modelos distorsionados, ya sea variando la pendiente o la densidad del sedimento entre el modelo y prototipo, a pesar de no conservar la similitud geométrica es posible conservar la similitud dinámica.

3.8 Calibración del modelo

Una vez construido el modelo en estudio, es necesario verificar que éste sea capaz de reproducir y reflejar las cualidades del prototipo requeridas. En caso no fuese así, será necesario efectuar cambios para modificar y ajustar todo aquello que discrepe con la realidad.

La calibración consiste en adecuar las condiciones y características físicas e hidráulicas, tales como la rugosidad del lecho, la descarga, niveles de agua, con las correspondientes al prototipo.

En modelos de cauces naturales, la calibración es un proceso iterativo en el cual se modifica la rugosidad del cauce hasta hacer equivalentes las curvas tirante-caudal del modelo con las del prototipo, en secciones de medición establecidas de antemano en el prototipo.

Capítulo 4

Modelo Hidráulico del Proyecto Alto Piura

La información utilizada para la elaboración de este capítulo fue obtenida de los Informes parciales N°1 y N°2 del “Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura” elaborado por el IHHS de la Universidad de Piura.

4.1 Objetivos

El modelo hidráulico tiene por objeto evaluar las capacidades y el comportamiento hidráulico de las estructuras del sistema, su funcionamiento en diferentes condiciones de operación y, en caso de ser necesario, efectuar ajustes de diseño como resultado de las pruebas efectuadas. Esto con el fin de lograr:

- Una adecuada eficiencia en el prototipo.
- Confianza en el diseño y predicción del funcionamiento del prototipo.
- Definición de las reglas de operación.
- Prolongación de la vida útil del proyecto.
- Optimización económica del proyecto en su conjunto.

4.2 Ubicación del modelo

El Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria (IHHS) de la Universidad de Piura, cuenta con un área extensa designada para investigaciones experimentales, la cual está dividida en 3 zonas que se muestran a continuación:



Figura 4.1. Instalaciones del IHHS.

Fuente: Informe parcial N°1 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

- Zona 1: Ubicada al interior del IHHS, designada especialmente a modelos que necesitan realizarse en un área techada, con un área de aproximadamente 700 m².
- Zona 2: Ubicada en la parte posterior del IHHS, con un área de aproximadamente 1,500 m².
- Zona 3: Ubicada a las afueras del IHHS, con un área de aproximadamente 4200 m².

Para la construcción de modelo Alto Piura se eligió la Zona 3. En esa área se construyó un circuito cerrado compuesto principalmente por un sistema de alimentación y regulación, tanque de aquietamiento de entrada y control de caudal, canal de alimentación, poza de entrada, plataforma del cauce, cauce propiamente dicho, poza de salida y canal de retorno.



Figura 4.2. Esquema general de la ubicación del modelo.

Fuente: Informe parcial N°1 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

4.3 Componentes del modelo

Como se mencionó previamente, para el funcionamiento del modelo se necesitó construir un circuito cerrado para la circulación de agua en el modelo, el cual está compuesto por:

4.3.1 Sistema de alimentación y regulación

Este sistema de alimentación trabaja a circuito cerrado y está formado por:

- Reservorio de suministro subterráneo de 140 m³ que se abastece de una red principal.
- Sistema de bombeo compuesto por: dos motobombas marca KSB Eternorm, modelo ETA-R-250-330 de 200 l/s y 34 KW de potencia cada una; y otra motobomba de la misma marca, modelo ETA-R-150-250, de 100 l/s y 17 KW de potencia.
- Tanque elevado de 48 m³ con una carga de 5.5 m.
- Sistema de tuberías de asbesto-cemento de 12" de diámetro provenientes del tanque elevado.
- Tanque de aquietamiento donde descarga el sistema de tuberías.
- Válvula compuerta usada para regular el caudal requerido.



Figura 4.3. Cuarto de Bombas.

Fuente: Informe parcial N°1 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

4.3.2 Modelo hidráulico

La plataforma del cauce corresponde a aproximadamente 60 m de longitud modelados en un área de 480 m², incluye áreas de acceso, plataformas para desplazamiento y toma de datos.



Figura 4.4. Cauce del modelo.

Fuente: Informe parcial N°1 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

4.3.3 Canal de retorno

Encargado de dirigir el caudal nuevamente a la cisterna con el fin de cerrar el circuito de distribución de agua para el modelo.



Figura 4.5. Canal de retorno.

Fuente: Informe parcial N°1 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

4.4 Escala del modelo

De acuerdo a las soluciones técnicas de las estructuras de represamiento y captación, el espacio con el que se cuenta para realizar el modelo, las dimensiones del prototipo y las limitaciones para evitar los efectos de escala, se definió la escala de 1:20 para la construcción del modelo, aplicando como se dijo previamente, la ley de similitud de Froude.

4.5 Construcción del modelo

La construcción del modelo fue basada de acuerdo a los planos detallados brindados por el consultor. Fue construido exactamente según las características definitivas de las estructuras, garantizando la reproducción total de todos los elementos importantes para la operación hidráulica de las estructuras.

Los materiales designados para la construcción fueron: acrílico, acero, madera, concreto y material de albañilería.

Además, se construyeron otras estructuras que ayudan a optimizar la modelación, las cuales se detallan en los puntos siguientes.

4.5.1 Tanque de quietamiento y control de caudal

Sirve para controlar el caudal que ingresa al modelo. Tiene capacidad para 21 m³ de agua y tiene una pequeña pared intermedia que sirve para la disipación de energía cinética proveniente de la tubería de suministro. Está construido con columnas de concreto armado y muros de albañilería revestidos con mortero. Su altura es de 2.50 m sobre el nivel del suelo del laboratorio.



Figura 4.6. Tanque de quietamiento y vertedero.

Fuente: Informe parcial N°1 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

4.5.2 Muro calado y espigón

El muro calado es una estructura conformada básicamente de albañilería cuyas unidades están colocadas como se muestra en la Figura 4.7. El espigón es una estructura que consiste en un enmallado metálico en forma de bloque rectangular en cuyo interior se coloca una cierta cantidad de piedras pilcas (ver Figura 4.8.). Ambas estructuras tienen como función disminuir la turbulencia en la entrada del cauce.



Figura 4.7. Muro calado.

Fuente: Informe parcial N°1 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.



Figura 4.8. Espigón.

Fuente: Informe parcial N°1 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

4.5.3 Cauce del modelo

Se generaron 24 secciones a lo largo del cauce para poderlo construirlo con mayor precisión tomando como referencia el eje del río. El cauce está compuesto por afirmado compactado al cual se le dio forma con las secciones previamente mencionadas, utilizando en total 48 moldes correspondientes a la margen derecha e izquierda de cada una de dichas secciones.

Una vez perfilado el cauce, se colocó una malla de fierro para posteriormente colocar la mezcla de mortero nuevamente con los moldes.

Finalmente se colocaron niveles en el fondo del cauce para a partir de estos poder modelar el lecho fijo.



Figura 4.9. Construcción del cauce del modelo.

Fuente: Informe parcial N°1 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

4.6 Calibración

La etapa de calibración nos servirá para comprobar la similitud existente entre el modelo y el prototipo como se explicó en el capítulo anterior. De esta manera al encontrarse dicha similitud, ya podría llevarse a cabo la construcción de las estructuras propiamente dichas.

Para dicha calibración se eligieron 3 secciones de control a lo largo de cauce como se muestra a continuación:

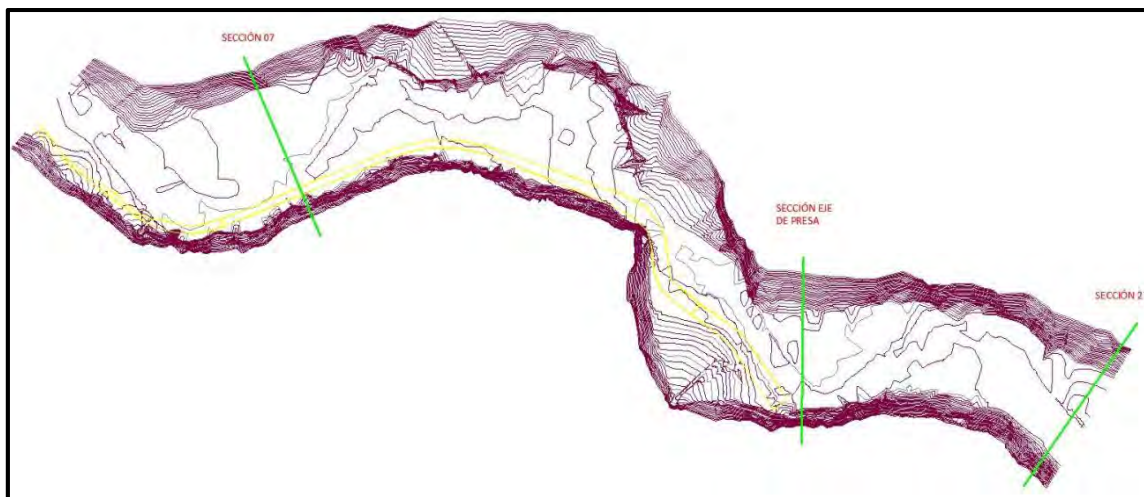


Figura 4.10. Secciones de control a lo largo del cauce.

Fuente: Informe parcial N°1 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

Entre las secciones de control, se debe resaltar la sección en donde se ubicará el eje de la presa.

Los resultados del proceso de calibración se muestran en el anexo A.

4.7 Construcción de las obras de represamiento

4.7.1 Barraje móvil y canal de limpia

Los tres pilares que forman parte de esta estructura fueron modelados: la primera sección en madera y la sección final en concreto. Los materiales utilizados permiten tener la rugosidad adecuada de acuerdo a las leyes de similitud.



Figura 4.11. Construcción de estructuras.

Fuente: Informe parcial N°2 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

Las compuertas han sido elaboradas de acero inoxidable. Para su elaboración se respetaron las dimensiones, curvaturas y radio de giro indicados en los planos. El sistema de izaje es formado por un engranaje y una manivela para cada compuerta, de tal forma que sea posible su manipulación independiente.



Figura 4.12. Vista de barraje móvil construido.

Fuente: Informe parcial N°2 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

4.7.2 Umbral de captación y canal de aproximación

Para la construcción de estas estructuras se utilizó concreto y se realizó de acuerdo a los detalles de las especificaciones de los planos para lograr la similitud entre modelo y prototipo.



Figura 4.13. Construcción de canal de aproximación.

Fuente: Informe parcial N°2 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

4.7.3 Bocatoma

Para la construcción de la bocatoma se utilizaron piezas de madera.



Figura 4.14. Construcción de la bocatoma.

Fuente: Informe parcial N°2 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

4.7.4 Aliviadero fijo – Vertedero de demasías

Se construyó la plataforma de concreto del vertedero y posteriormente se le colocaron los dados ya fabricados, hechos también de concreto.



Figura 4.15. Vertedero de demasías.

Fuente: Informe parcial N°2 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

4.7.5 Canal de purga – Túnel de caudal ecológico

Las paredes fueron construidas de concreto, las compuertas de madera, mientras que la transición y túnel de acrílico.



Figura 4.16. Túnel de caudal ecológico.

Fuente: Informe parcial N°2 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

4.8 Investigación

4.8.1 Programa de investigación

Se determinó una serie de investigaciones para las distintas estructuras que comprenden la presa: Barraje móvil, canal de limpia, bocatoma, vertedero de demasías, etc. con distintas finalidades dependiendo de la función de cada una de las mismas.

Entre las características más importantes que se deben medir tenemos:

- Caudales.
- Niveles de agua.
- Velocidades.
- Patrón de flujo en el sistema.
- Pérdidas hidráulicas.
- Pulsaciones de presiones.
- Predicción y control de vórtices.
- Inestabilidades de flujo.
- Posibilidad de la ocurrencia de la cavitación y medidas de control.
- Ocurrencia y problemas de abrasión y vibración.

Las investigaciones necesarias para los planteamientos de la presente tesis se basaron en la búsqueda de la protección de la estructura de concreto contra la socavación, debido a la erosión del suelo natural alrededor del concreto y la protección antierosiva del fondo del cauce y las laderas del cauce del río, aguas abajo del barraje móvil.

Las obras de represamiento y derivación están cimentadas sobre depósitos aluviales. El espesor máximo del material de sobrecarga en el cauce es de 31 m. Con dichas características geotécnicas podría verse comprometida la estabilidad de la estructura de concreto si no se toman las medidas de protección antierosivas correspondientes del fondo del cauce inmediatamente aguas arriba y aguas debajo de sus extremos. El volumen de la erosión, con y sin medidas de protección, deberá determinarse en el modelo hidráulico, por lo que es preciso que el modelo sea construido con fondo móvil de profundidad y extensión correspondientes.

Esto resulta especialmente importante una alternativa de solución que incluye un enrocado encargado de proteger el fondo del cauce. Se deberá determinar la longitud del cauce protegido a partir de lograr que las velocidades de agua al final del enrocado sean similares a las velocidades en el cauce del río normal.

De la misma manera se deberá proteger y verificar las laderas del cauce del río sin importar que se encuentren en pendiente natural o artificial.

4.8.2 Equipos e instrumentos de medición

Para lograr las mediciones y experimentos requeridos, son necesarios ciertos dispositivos e instrumentos, conformados principalmente por los que se detallan en los puntos siguientes.

4.8.2.1 Limnímetros

Utilizados para medir los tirantes en el cauce y/o establecer los niveles de agua en cada ensayo de acuerdo a las condiciones necesarias. Los limnímetros son instalados a lo largo del cauce de experimentación sobre unos puentes que permiten el desplazamiento lateral en la dirección transversal del cauce.

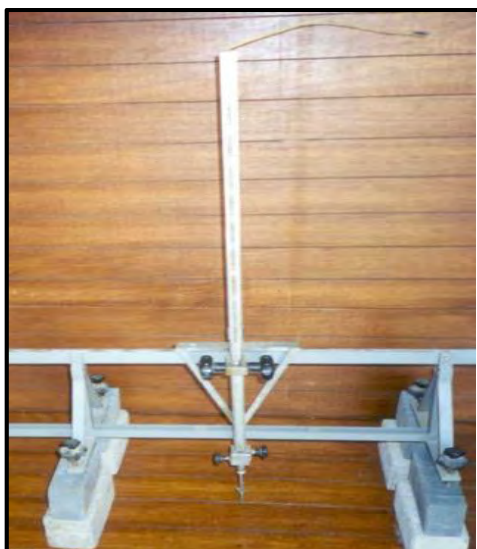


Figura 4.17. Limnómetro.

Fuente: Informe parcial N°1 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

4.8.2.2 Correntómetro

Utilizado para la medición de velocidades en diferentes puntos del canal y a diferentes alturas de agua según sea requerido. Para el presente proyecto se utilizó un correntómetro con molinete tipo C2 OTT y un contador OTT KEMPTEN modelo Z210.

Viene con un número fijo de hélices y son empleadas según las magnitudes de las velocidades a medir; cada una posee una ecuación que relaciona la velocidad con el número de revoluciones por segundo.



Figura 4.18. Correntómetro.

Fuente: Informe parcial N°1 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

4.8.2.3 Nivel topográfico y mira milimétrica

Se utilizará para la medición de cotas un nivel SOKKIA modelo C31 y una mira milimétrica. Servirá para la medición de la erosión en el cauce.



Figura 4.19. Nivel topográfico.

Fuente: Informe parcial N°1 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

4.8.2.4 Puentes

Utilizados como apoyo para facilitar la toma de medidas y se instalarán a lo largo de del cauce de experimentación, en secciones transversales definidas como secciones de control. También utilizados como soporte para los limnímetros en muchos casos.



Figura 4.20. Puentes metálicos.

Fuente: Informe parcial N°1 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

4.8.2.5 Material filmico y fotográfico

La toma de fotografías y grabación de videos forma parte importante de la investigación ya que ayuda a tener un registro y poder revisar constantemente lo ocurrido durante los ensayos, por lo que contar con este tipo de material es de suma importancia.

Entre las cosas que se pueden registrar tenemos la erosión, localización de vórtices, arrastre de sedimentos, etc.

4.8.3 Toma de datos

Para la toma de datos de tirantes y velocidades en el sector del barraje móvil se establecieron 8 secciones (A-H). Para la zona ubicada entre los pilares, se han ubicado 9 puntos por sección; mientras que, en las demás zonas, se han ubicado 3 puntos, dando un total de 48 puntos en esta estructura (Figura 4.21).

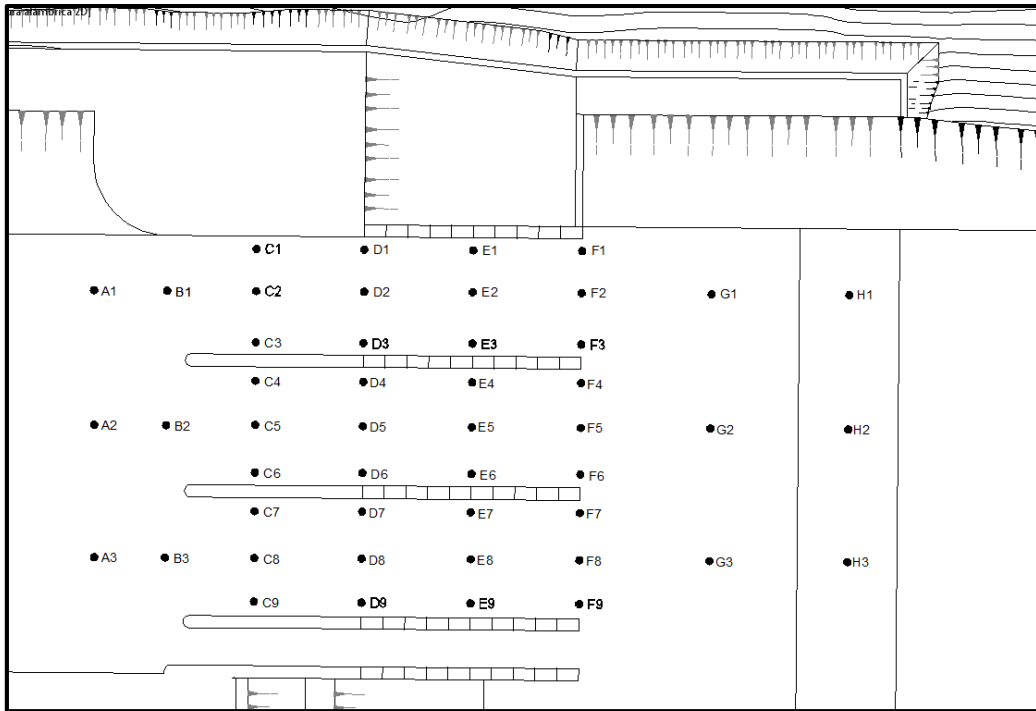


Figura 4.21. Localización de puntos para la toma de datos en el barraje móvil.

Fuente: Informe parcial N°1 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

Para la medición de erosión y sedimentación, se estableció una malla de puntos aguas abajo. En total fueron 173 puntos distribuidos según se indica en la Figura 4.22.



Figura 4.22. Localización de puntos para la toma de datos en el lecho móvil.

Fuente: Informe parcial N°1 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

Capítulo 5

Disipación de Energía en el Modelo Hidráulico del Proyecto Alto Piura

La información utilizada para la elaboración de este capítulo fue obtenida de los Informes parciales N°2 y N°3 del “Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura” elaborado por el IHHS de la Universidad de Piura.

5.1 Estudio de la disipación de energía en el diseño original de la presa

Se realizaron ensayos denominados *Ensayos para condiciones críticas*, los cuales consistían en determinar la máxima profundidad de erosión que se podría presentar con distintos caudales representativos y aberturas totales en cada una de las compuertas.

Los puntos donde se realizaron las respectivas medidas han sido especificados en el capítulo anterior en la sección 4.8.3.

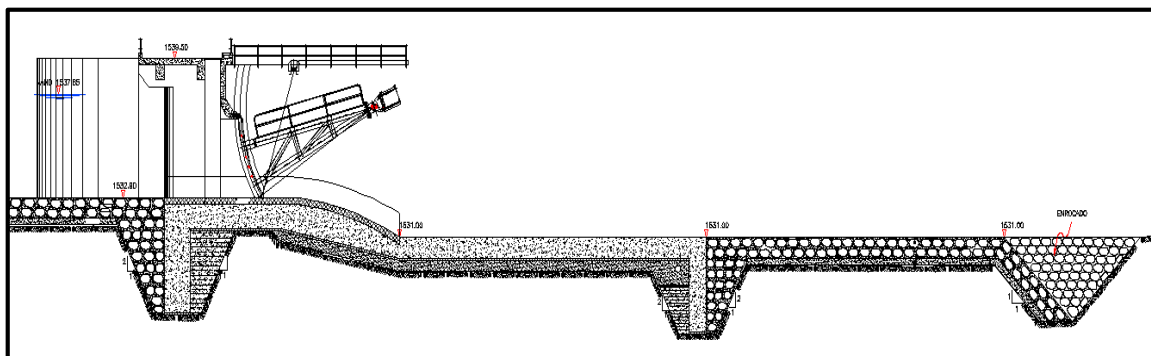


Figura 5.1. Vista de perfil del diseño original del vertedero de la presa.

Fuente: Planos provistos por el cliente del proyecto. Editado por autor de la tesis.

5.1.1 Caudal de 27.2 m³/s

Para este caudal se llegó a la cota 1533.4 m.s.n.m. en la zona de entrada al canal de aproximación, por lo que no supera la cresta de su vertedero, ubicada en la cota 1537 m.s.n.m.

La distribución del flujo de agua en las estructuras para los casos en que el nivel de agua no llega a la cresta del vertedero se muestra en la Figura 5.2.

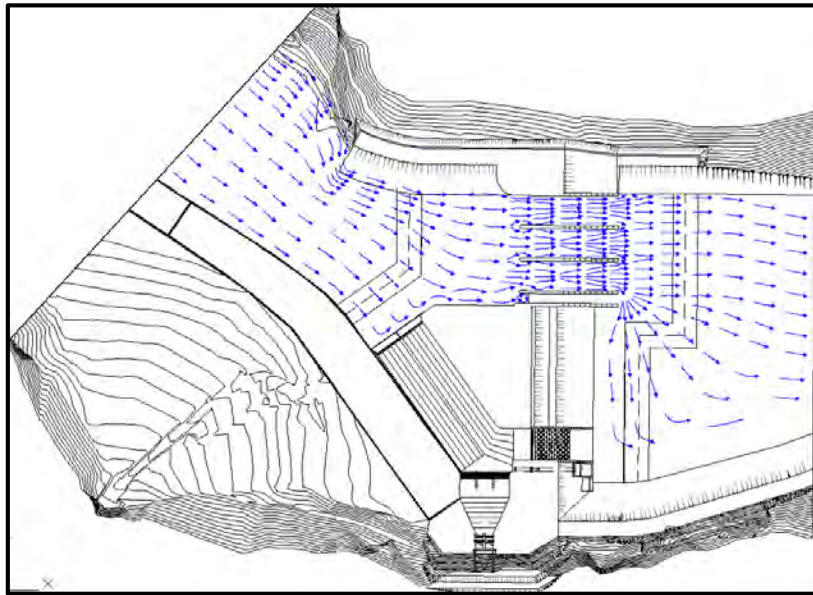


Figura 5.2. Distribución de flujo de agua en las estructuras.

Fuente: Informe parcial N°2 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.1.1.1 Velocidades

Los tirantes correspondientes a este caudal eran muy bajos, por lo cual no se lograron medir velocidades.

5.1.1.2 Niveles de erosión

En la Figura 5.3 se muestra los perfiles de la erosión generada en cada uno de los ejes de cada una de las compuertas.

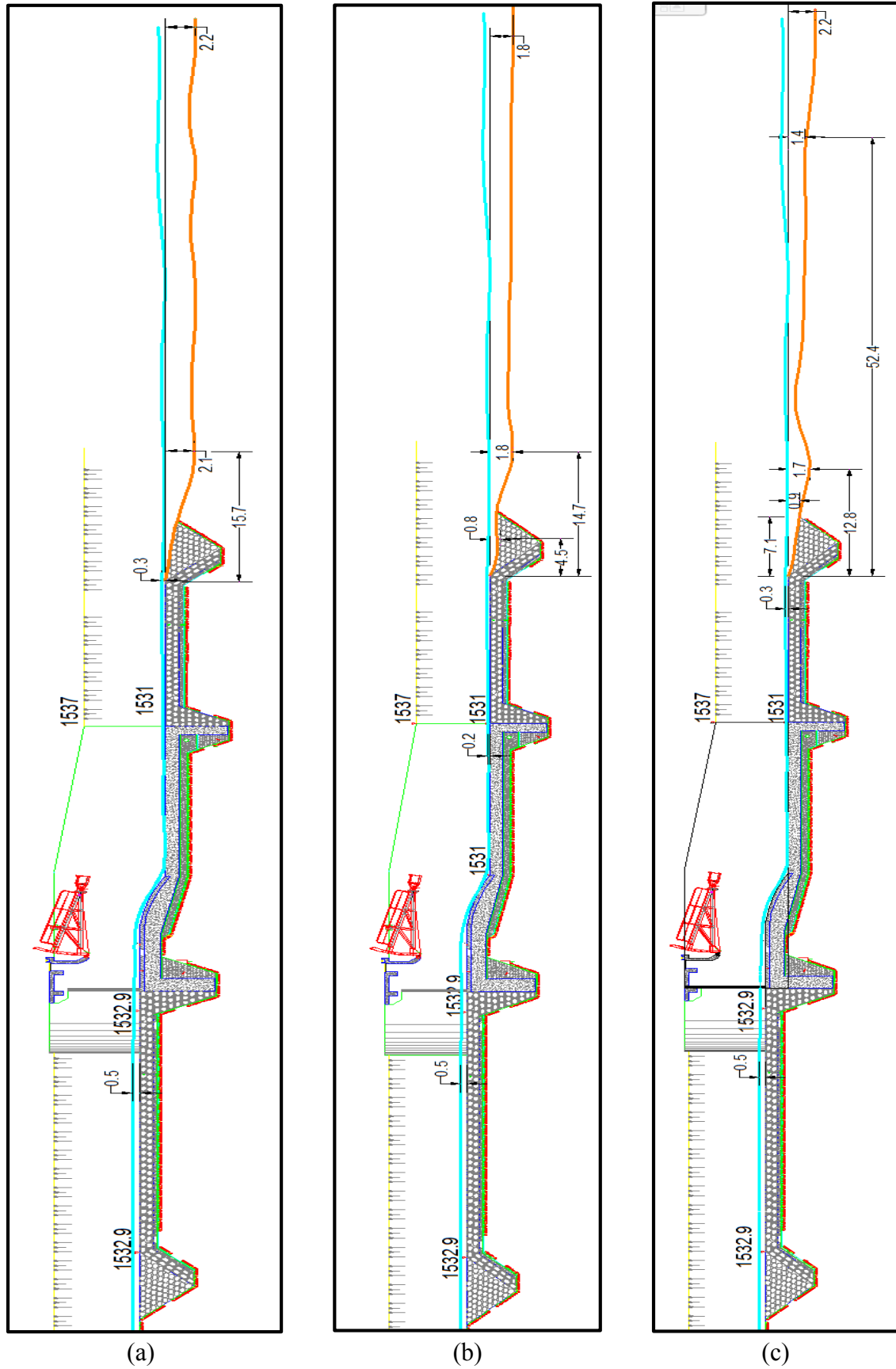


Figura 5.3. Niveles de erosión para $Q = 27.2 \text{ m}^3/\text{s}$ en: (a) Eje de Compuerta 1; (b) Eje de Compuerta 2; (c) Eje de Compuerta 3.

Fuente: Informe parcial N°2 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.1.2 Caudal 117 m³/s

Para este caso se llegó a la cota 1534.6 m.s.n.m. en la zona de entrada al caudal de aproximación.

5.1.2.1 Velocidades

Los tirantes aguas abajo del barraje móvil no fueron suficientemente elevados para poder medir velocidades, pero sí se midieron las velocidades aguas arriba del mismo:

Tabla 5.1. Velocidades (m/s) registradas para Q = 117 m³/s.

COMPUERTA 1			COMPUERTA 2			COMPUERTA 3		
Sección	Punto	Velocidad	Sección	Punto	Velocidad	Sección	Punto	Velocidad
A	A3	1.93	A	A2	2.29	A	A1	1.93
B	B3	2.19	B	B2	2.45	B	B1	2.19
C	C7	2.76	C	C4	2.99	C	C1	2.63
	C8	3.20		C5	3.10		C2	3.02
	C9	3.72		C6	4.54		C3	3.85

Fuente: Informe parcial N°2 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.1.2.2 Niveles de erosión

En la Figura 5.4 se muestra los perfiles de la erosión generada en cada uno de los ejes de cada una de las compuertas:

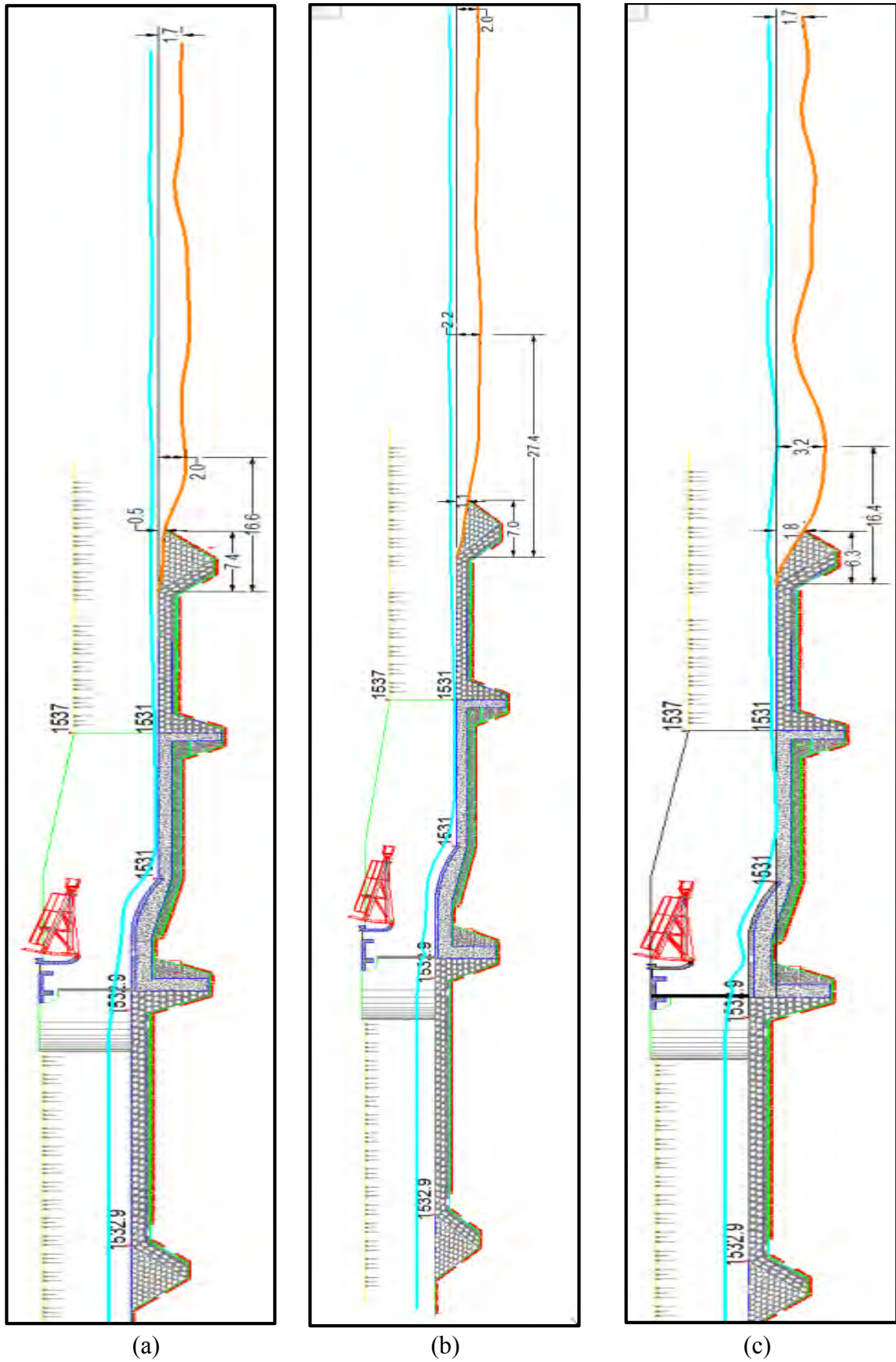


Figura 5.4. Niveles de erosión para $Q = 117 \text{ m}^3/\text{s}$ en: (a) Eje de Compuerta 1; (b) Eje de Compuerta 2; (c) Eje de Compuerta 3.

Fuente: Informe parcial N°2 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.1.3 Caudal 308.4 m³/s

El nivel de agua en esta ocasión llegó a la cota 1536 m.s.n.m.

5.1.3.1 Velocidades

Para este caudal, se lograron medir velocidades en todas las secciones a excepción de la última sección (Sección H), debido a la pequeña altura en el nivel del agua en esos puntos.

Tabla 5.2. Velocidades (m/s) registradas para Q = 308.4 m³/s.

COMPUERTA 1			COMPUERTA 2			COMPUERTA 3		
Sección	Punto	Velocidad	Sección	Punto	Velocidad	Sección	Punto	Velocidad
A	A3	3.02	A	A2	3.41	A	A1	2.86
B	B3	3.25	B	B2	3.56	B	B1	3.66
C	C7	4.00	C	C4	4.08	C	C1	4.03
	C8	4.59		C5	4.21		C2	4.33
	C9	5.84		C6	4.26		C3	4.41
D	D7	8.62	D	D4	8.72	D	D1	8.31
	D8	8.31		D5	8.13		D2	8.26
	D9	8.39		D6	8.21		D3	7.65
E	E7	9.05	E	E4	9.51	E	E1	9.92
	E8	9.51		E5	9.59		E2	9.46
	E9	9.79		E6	9.36		E3	8.70
G	G3	9.61	G	G2	10.18	G	G1	9.89

Fuente: Informe parcial N°2 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.1.3.2 Niveles de erosión

En la Figura 5.5 se muestra los perfiles de la erosión generada en cada uno de los ejes de cada una de las compuertas:

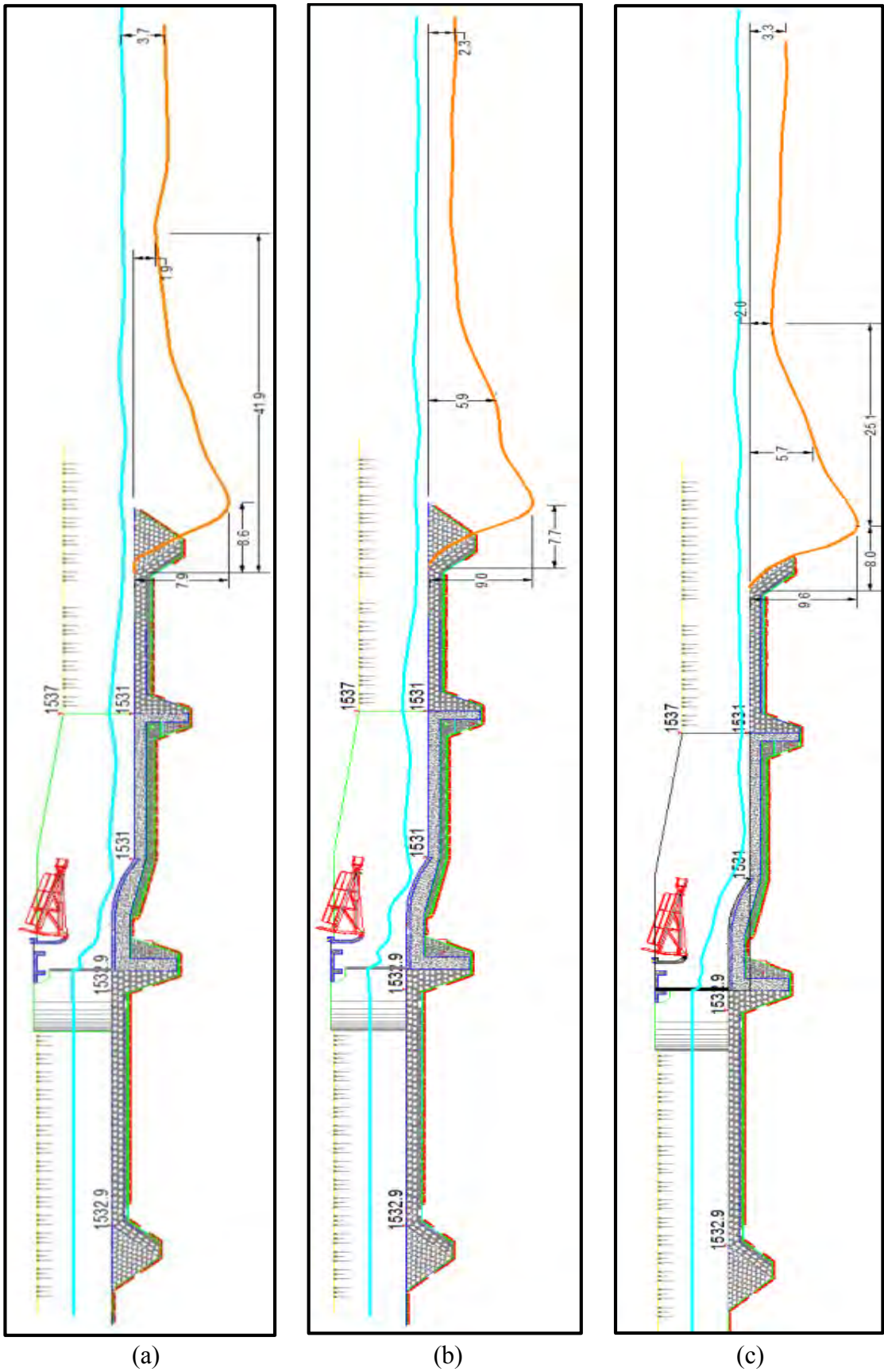


Figura 5.5. Niveles de erosión para $Q = 308.4 \text{ m}^3/\text{s}$ en: (a) Eje de Compuerta 1; (b) Eje de Compuerta 2; (c) Eje de Compuerta 3.

Fuente: Informe parcial N°2 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.1.4 Caudal 456.3 m³/s

Para el presente caudal, el nivel de agua llegó hasta la cota 1537.1 m.s.n.m. por lo que el agua si logró ingresar al canal de aproximación y por consiguiente, derivar a través de la bocatoma.

La distribución del flujo de agua en las estructuras para los casos en que el agua ingresa al canal de aproximación se muestra en la Figura 5.6.

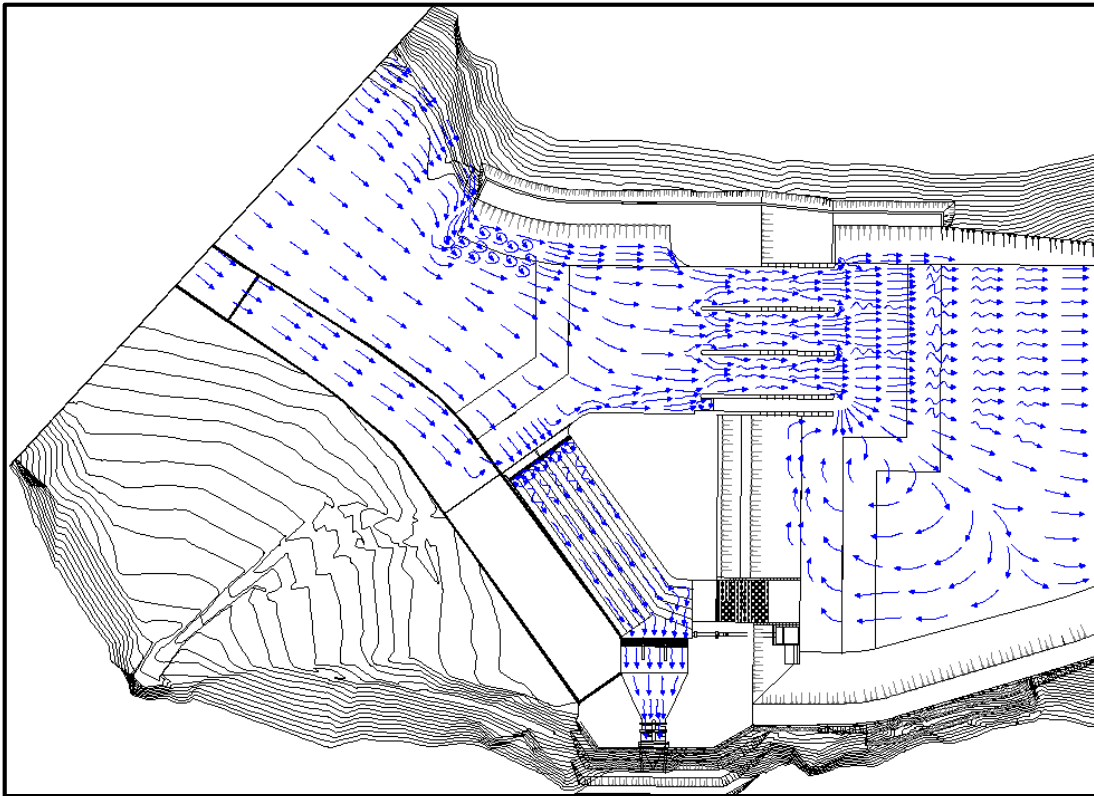


Figura 5.6. Distribución de flujo de agua en las estructuras.

Fuente: Informe parcial N°2 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.1.4.1 Velocidades

Los niveles de aguas para el presente caudal fueron lo suficientemente altos para poder medir sus respectivas velocidades. Ver Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Velocidades (m/s) registradas para $Q = 456.3 \text{ m}^3/\text{s}$.

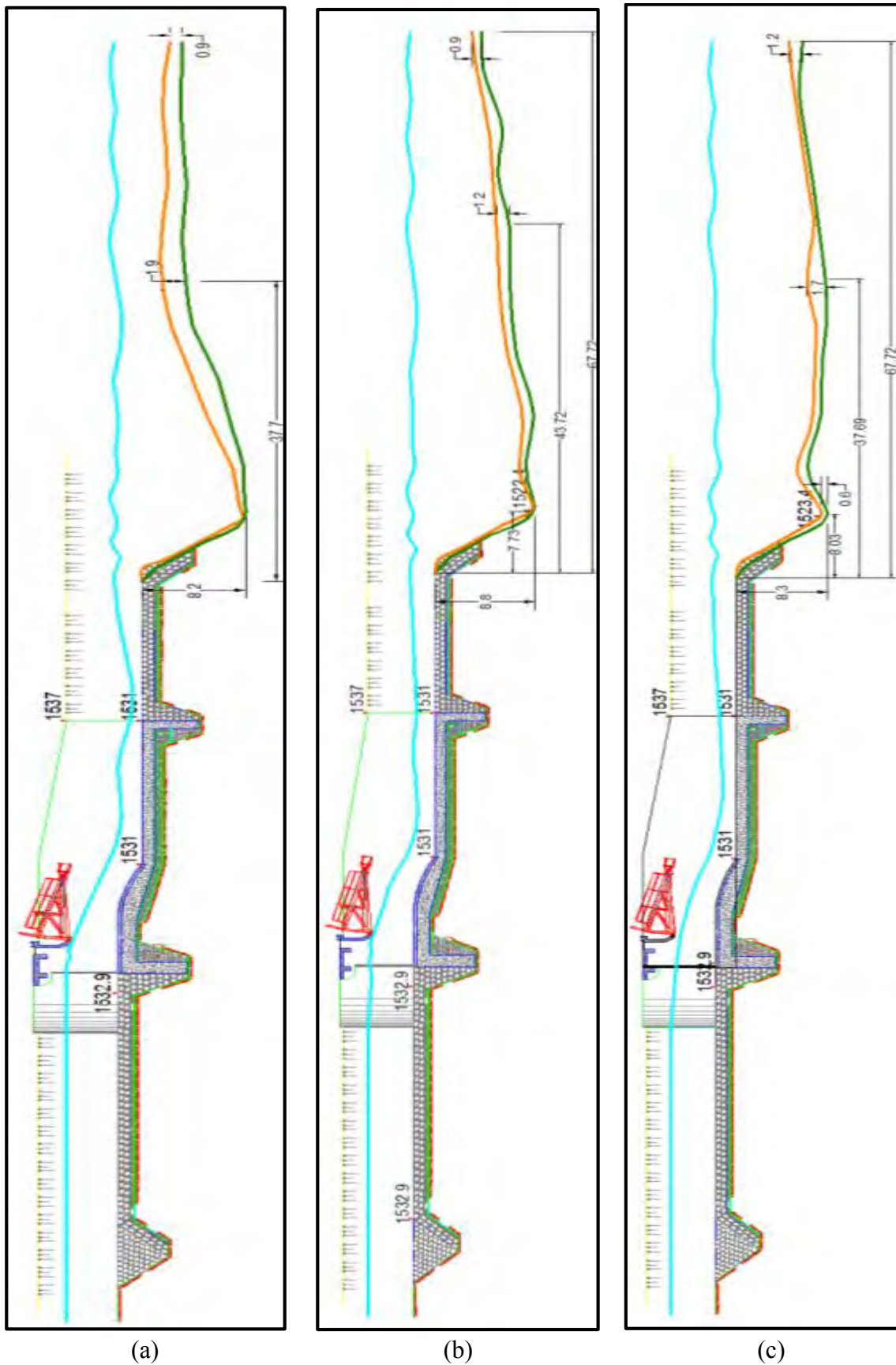
COMPUERTA 1			COMPUERTA 2			COMPUERTA 3		
Sección	Punto	Velocidad	Sección	Punto	Velocidad	Sección	Punto	Velocidad
A	A3	3.33	A	A2	3.72	A	A1	3.59
B	B3	3.61	B	B2	4.10	B	B1	4.31
C	C7	4.46	C	C4	4.54	C	C1	4.72
	C8	4.59		C5	4.69		C2	4.95
	C9	5.48		C6	5.23		C3	5.12
D	D7	8.54	D	D4	9.82	D	D1	8.11
	D8	9.05		D5	9.84		D2	8.93
	D9	8.11		D6	9.03		D3	8.80
E	E7	10.51	E	E4	10.35	E	E1	9.66
	E8	9.51		E5	10.20		E2	10.00
	E9	8.93		E6	9.59		E3	10.07
F	F7	10.25	F	F4	10.51	F	F1	9.89
	F8	10.20		F5	10.33		F2	10.05
	F9	9.96		F6	10.23		F3	10.12
G	G3	10.18	G	G2	10.53	G	G1	10.18
H	H3	9.92	H	H2	10.48	H	H1	10.05

Fuente: Informe parcial N°2 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.1.4.2 Niveles de erosión

La Figura 5.7 muestra la erosión generada por el presente caudal. La línea verde que marca la erosión se añadió para hacer una comparación entre los resultados que se obtuvieron de la erosión en el modelo físico y el software Hec Ras.

Para el caso de los caudales de mayor magnitud, en los que se calculó la posible erosión mediante el Hec Ras, se puede apreciar que los resultados obtenidos son muy similares a los obtenidos en el modelo físico para ambos casos.



(a) (b) (c)

Figura 5.7. Niveles de erosión para $Q = 456.3 \text{ m}^3/\text{s}$ en: (a) Eje de Compuerta 1; (b) Eje de Compuerta 2; (c) Eje de Compuerta 3.

Fuente: Informe parcial N°2 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.1.5 Caudal 583.1 m³/s

En este último caso, el nivel de agua llegó hasta la cota 1537.8 m.s.n.m. derivando parte del flujo a través del canal de aproximación y posteriormente por la bocatoma.

5.1.5.1 Velocidades

Tal como el caso del caudal anterior, en el presente caso también se lograron medir las velocidades en todos los puntos.

Tabla 5.4. Velocidades (m/s) registradas para Q = 583.1 m³/s.

COMPUERTA 1			COMPUERTA 2			COMPUERTA 3		
Sección	Punto	Velocidad	Sección	Punto	Velocidad	Sección	Punto	Velocidad
A	A3	3.48	A	A2	3.79	A	A1	3.41
B	B3	3.43	B	B2	4.18	B	B1	3.90
C	C7	4.00	C	C4	4.33	C	C1	4.41
	C8	4.46		C5	4.74		C2	4.82
	C9	4.59		C6	5.00		C3	5.02
D	D7	8.70	D	D4	8.95	D	D1	7.09
	D8	9.41		D5	8.93		D2	9.41
	D9	8.13		D6	8.01		D3	9.46
E	E7	10.81	E	E4	10.69	E	E1	9.38
	E8	10.07		E5	10.35		E2	10.48
	E9	9.23		E6	10.07		E3	10.28
F	F7	10.07	F	F4	10.58	F	F1	9.92
	F8	10.18		F5	10.43		F2	10.53
	F9	9.33		F6	10.35		F3	10.12
G	G3	9.64	G	G2	10.58	G	G1	10.48
H	H3	9.23	H	H2	10.86	H	H1	10.84

Fuente: Informe parcial N°2 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.1.5.2 Niveles de erosión

En la Figura 5.8 se muestra los perfiles de la erosión generada en cada uno de los ejes de cada una de las compuertas.

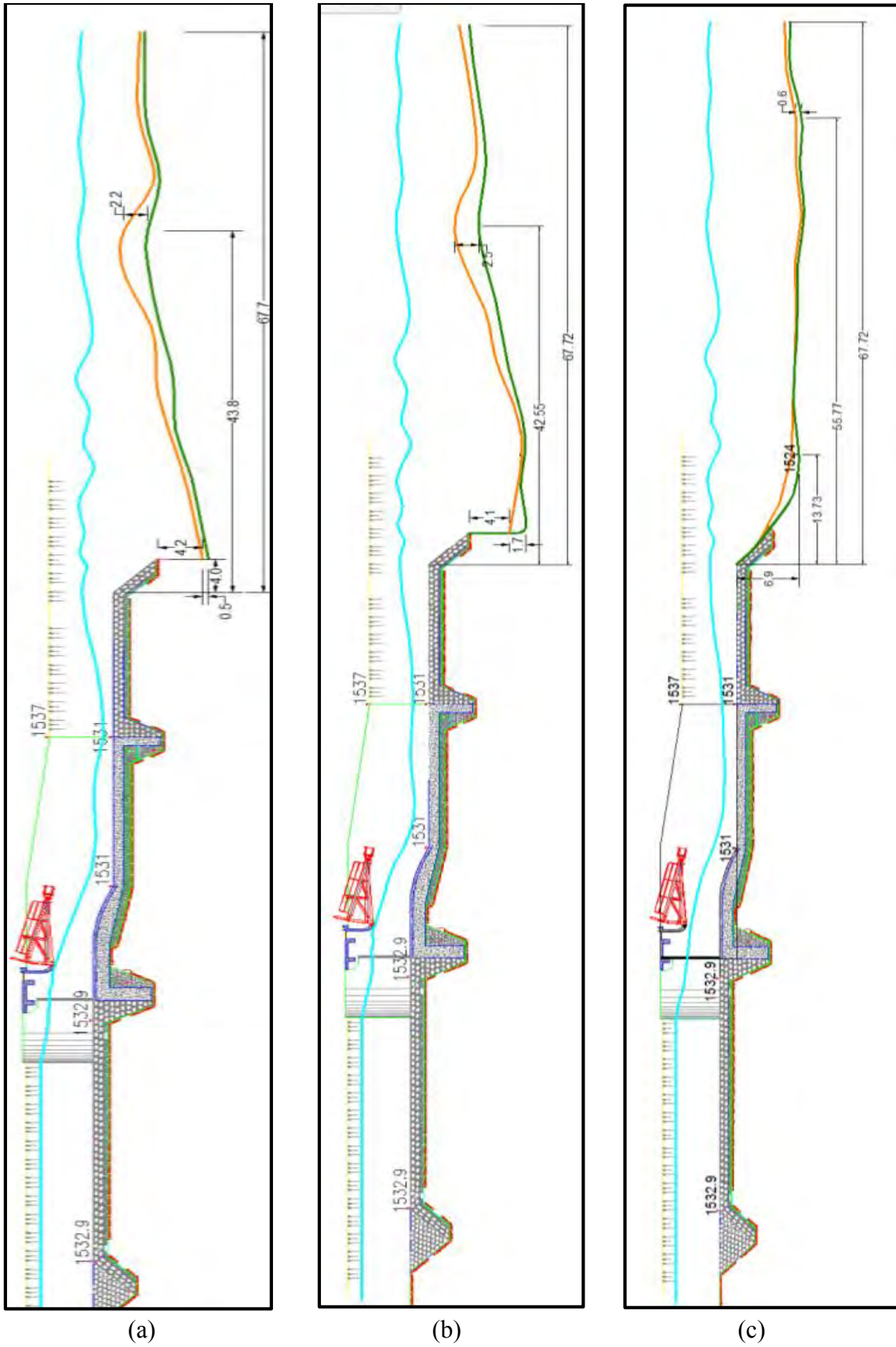


Figura 5.8. Niveles de erosión para $Q = 583.1 \text{ m}^3/\text{s}$ en: (a) Eje de Compuerta 1; (b) Eje de Compuerta 2; (c) Eje de Compuerta 3.

Fuente: Informe parcial N°2 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

De acuerdo a los resultados obtenidos, podemos resumir las siguientes conclusiones:

- Los valores de velocidad en las losas llegan hasta alrededor de 10 m/s.
- Para caudales pequeños el valor de la erosión es aceptable, pero para los caudales de mayor magnitud, se llegan a profundidades que rodean los 7 m de profundidad, lo cual puede significar riesgos en las estructuras.
- Es recomendable una modificación en la zona aguas abajo del aliviadero de compuertas con el fin de disminuir dicha erosión.

5.2 Modificaciones realizadas para optimizar la disipación de energía

En el modelo físico Alto Piura se realizaron una serie de modificaciones con respecto al diseño original con el motivo final de mejorar el comportamiento en sus estructuras. Lo que se desea evitar es que aguas abajo de la presa, ocurran erosiones significativas que pongan en riesgo las mismas.

Cada una de las opciones que se presentan, fueron evaluadas mediante ensayos hasta encontrar la solución óptima para el proyecto.

5.2.1 Modificación de solera de protección

La configuración inicial de la solera de protección ubicada aguas abajo del barraje móvil (Figura 5.9), fue modificada en varias ocasiones con el fin de reducir sus niveles de erosión. Para lograr este objetivo, se buscó mantener el resalto hidráulico sobre la solera protegida para todos los casos de operación en las compuertas.

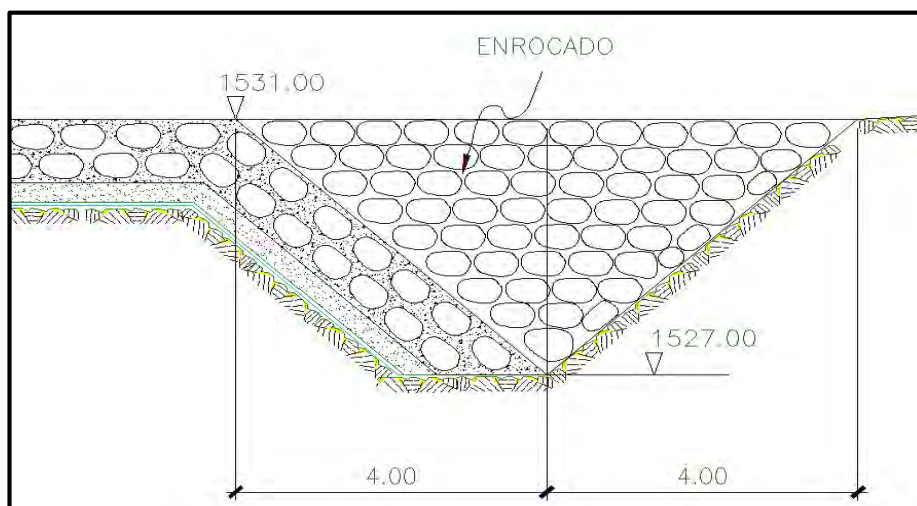


Figura 5.9. Configuración original de solera de protección aguas abajo.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

Las opciones más destacadas entre las que se probaron fueron:

- Enrocado de protección aguas abajo con $D_{\text{máx}}$ de 0.90 m y de 8 m de largo y posteriormente otro enrocado con $D_{\text{máx}}$ de 0.50 m y 10 m de largo.

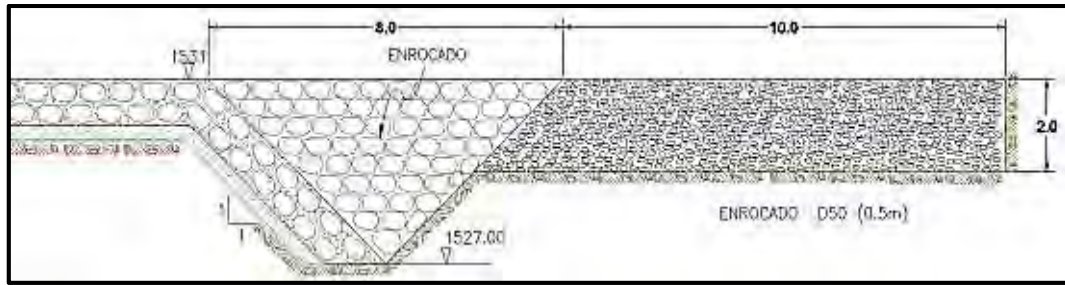


Figura 5.10. Primer enrocado de prueba.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

- Enrocado de protección aguas abajo con $D_{máx}$ de 0.90, de forma trapezoidal y base mayor de 16 m; posteriormente otro enrocado de $D_{máx}$ de 0.50 m y 10 m de largo.

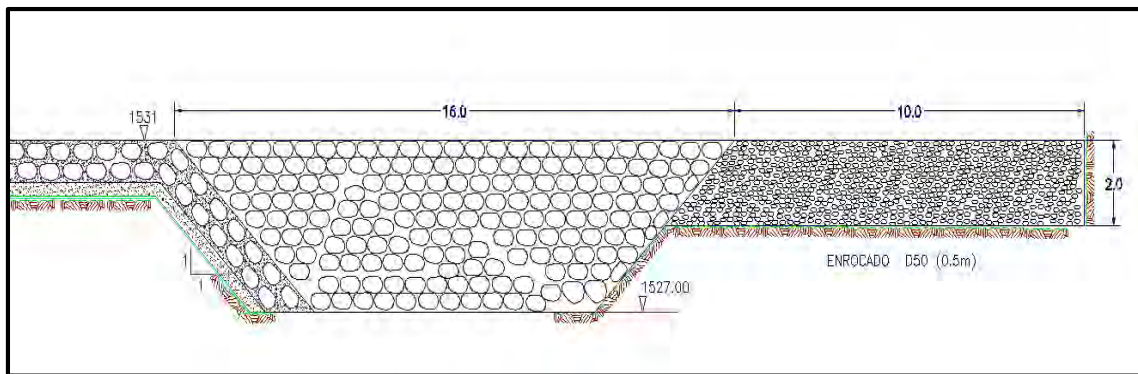


Figura 5.11. Enrocado de prueba en forma trapezoidal.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.2.2 Construcción de poza disipadora

Se construyó una poza disipadora aguas abajo del barraje móvil de 3.2 m de profundidad con respecto a la solera de protección.

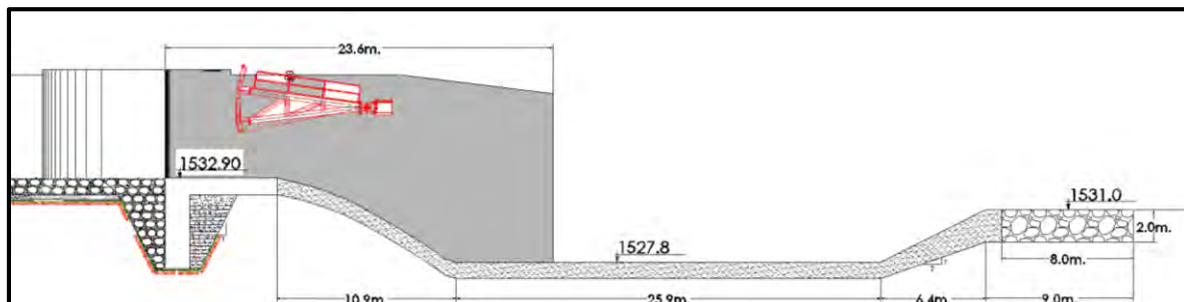


Figura 5.12. Poza disipadora.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

El enrocado colocado aguas debajo de la poza disipadora fue de una longitud de 8 m y conformado por un material con $D_{50} = 1.2$ m y un $D_{90} = 1.4$ m.



Figura 5.13. Poza disipadora construida.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

Esta opción fue la que el IHHS consideró como mejor para tener una disipación de energía correcta y no se comprometan las estructuras ni el lecho del río aguas abajo. Finalmente los diseñadores de proyecto mantuvieron su postura de optar por la opción de una rampa y dejaron de lado esta opción por verla poco factible de realizar en prototipo debido a elevados costos de excavación, entre otros aspectos.

5.2.3 Construcción de una rampa de proyección de muro divisorio entre barraje fijo y barraje móvil

La siguiente modificación consistió en la construcción de una rampa en la zona aguas abajo del barraje móvil con las siguientes características:

- Cota de inicio de la rampa: 1532.9 m.s.n.m.
- Cota final de la rampa: 1531 m.s.n.m.
- Longitud: 42.2 m.
- Pendiente: 4.5%.

Al final de la rampa se encuentra una plataforma horizontal de 2 m de longitud que empalma con el enrocado. También se alargó el muro divisorio entre el barraje fijo y el barraje móvil, el cual queda proyectado hasta el final de la rampa, previo a la plataforma. Además se incorporó en la margen izquierda la rampa, un muro denominado *Muro 1*, protegiendo el talud de dicha margen.



Figura 5.14. Vista en planta de la rampa y proyección de muros.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

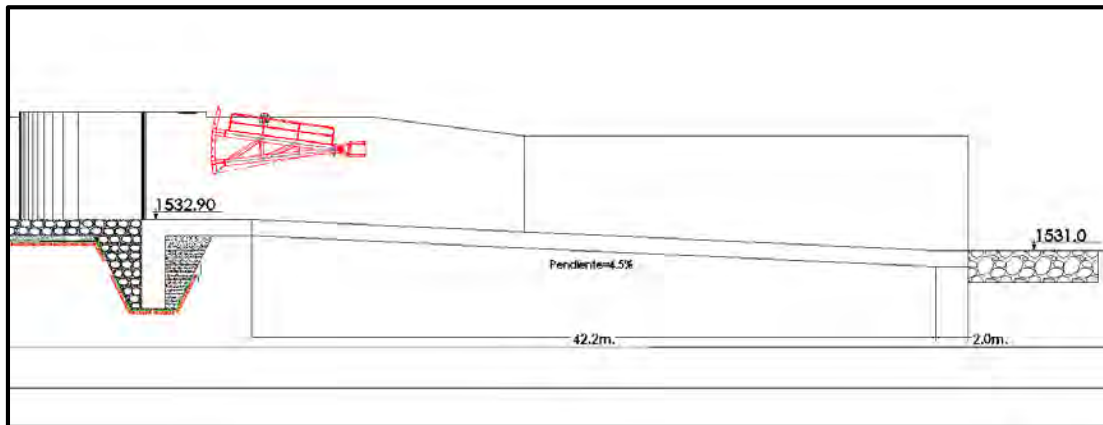


Figura 5.15. Vista de perfil de la rampa.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.2.4 Construcción de plataforma horizontal y modificación en la solera de enrocado

Gracias a los ensayos realizados en condiciones extremas con este diseño (Ver apartados 5.3.1 y 5.3.2), los clientes del proyecto consideraron que esta solución era la mejor opción de disipación de energía para el proyecto y fue considerada como el diseño final del mismo.

Se realizaron los siguientes cambios:

- Reincorporación de la plataforma horizontal que se encuentra en la cota 1531 m.s.n.m. y con una longitud total de 35.5 m en la zona aguas abajo del barraje móvil.
- Proyección del muro divisorio entre el barraje fijo y el barraje móvil, el cual quedará proyectado hasta una longitud de 14.5 m después del término de la plataforma horizontal.

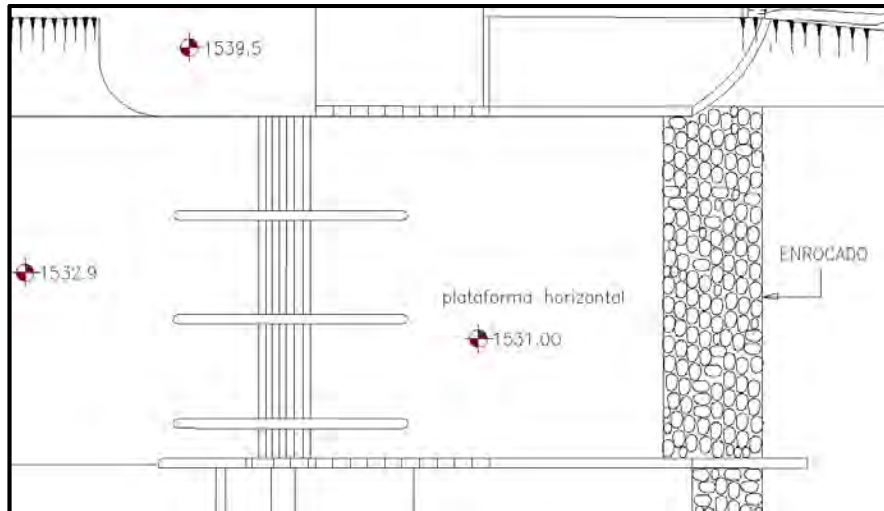


Figura 5.16. Vista en planta del diseño definitivo de barraje móvil.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

- Modificación de las dimensiones y forma de la solera de enrocada ubicada aguas abajo del barraje móvil.
- La solera modificada tiene un ancho de 10 m, con una uña con altura de 6 m y una disposición en forma romboidal, las especificaciones de enrocado son de $D_{90} = 1.5$ m y $D_{50} = 1.2$ m.

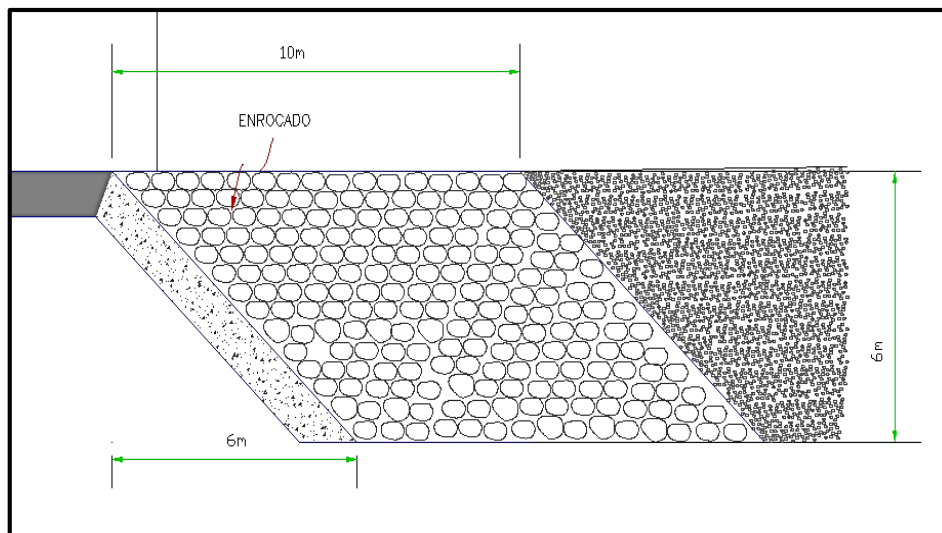


Figura 5.17. Vista de perfil de la solera modificada en forma romboidal.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

- Modificación de la sección final de los pilares pertenecientes al barraje móvil, de una sección final rectangular a una semicircular.

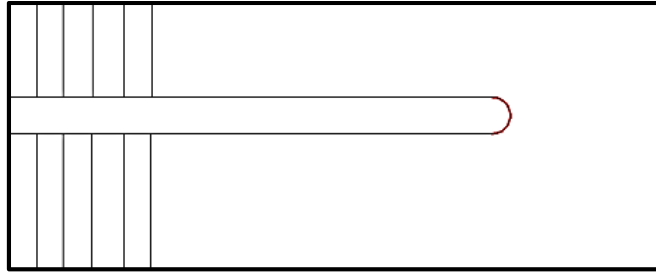


Figura 5.18. Cambio de sección final de pilares.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

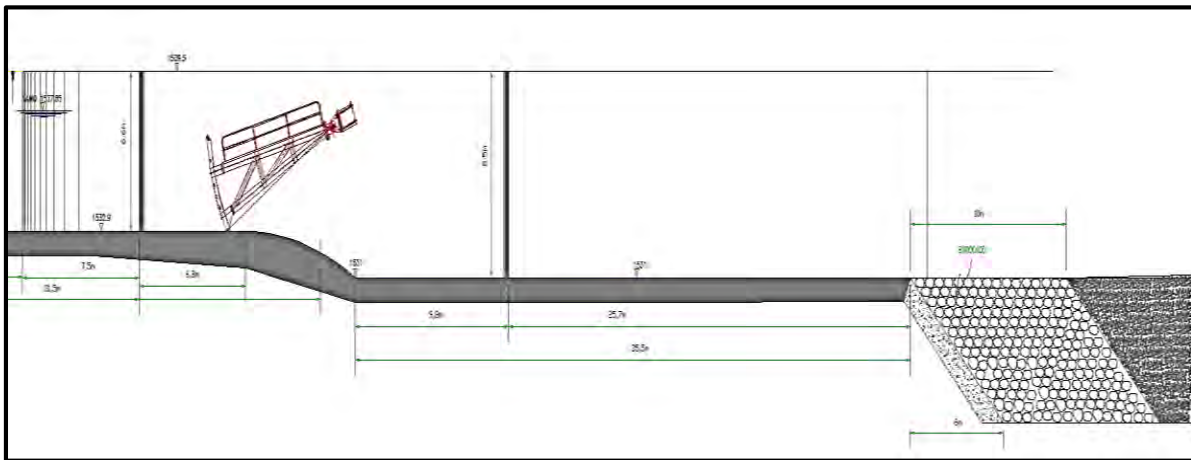


Figura 5.19. Vista de perfil del diseño definitivo de barraje móvil.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.3 Ensayos de verificación de diseño final

5.3.1 Ensayo para $Q = 583 \text{ m}^3/\text{s}$

El nivel de operación aguas arriba de las compuertas (antes de la entrada al canal de aproximación), fue de 1537.35 m.s.n.m.; las compuertas tuvieron una abertura de 1.6 m y el caudal de entrada a la bocatoma que se registró fue de $27.9 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se midieron niveles de agua y velocidades justo después de los pilares y en la sección final de la losa, obteniendo tirantes de 0.95 m y 1.1 m y velocidades de 11.75 m/s y 11.05m/s, respectivamente.

En la Figura 5.20 se muestra la erosión en la zona aguas abajo de las estructuras.

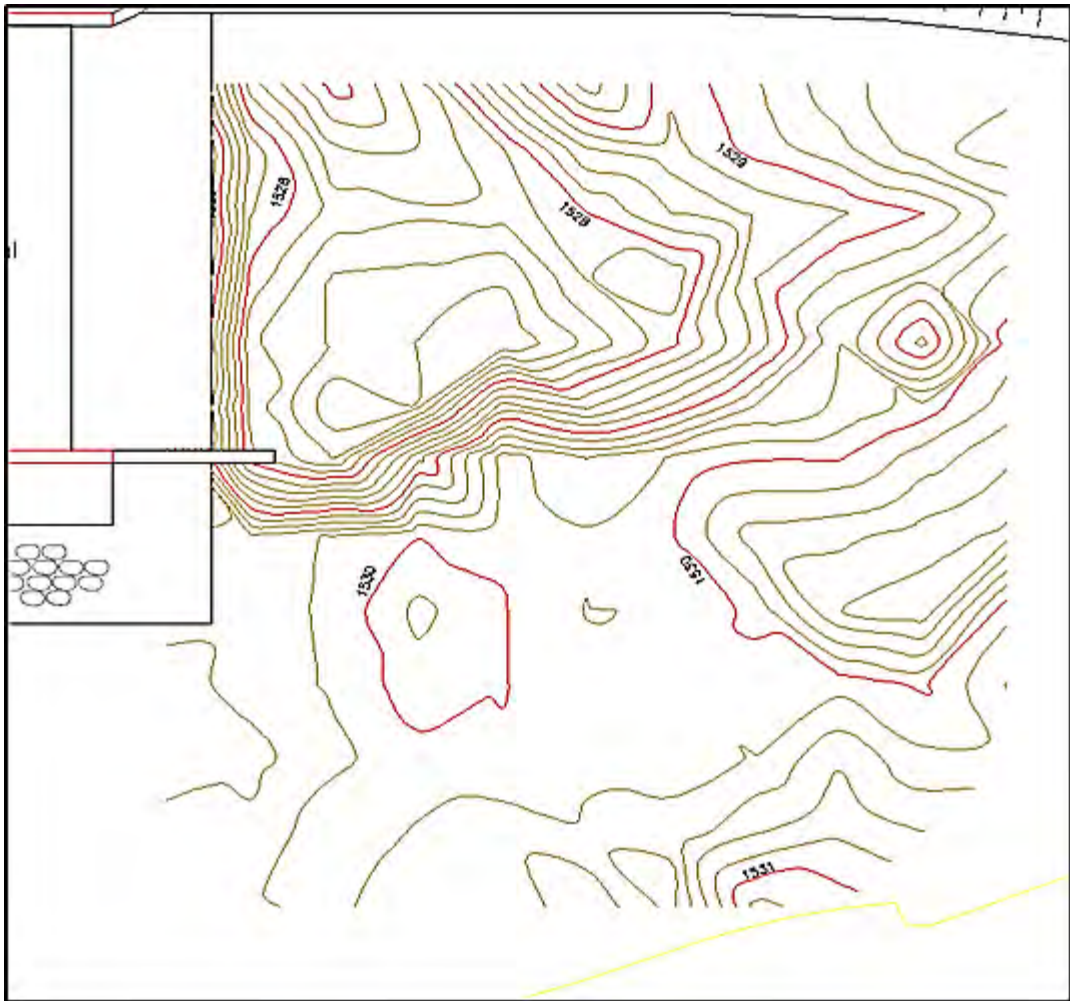


Figura 5.20. Curvas de nivel para ensayo $Q = 583 \text{ m}^3/\text{s}$.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.3.2 Ensayo para nivel de operación 1537.35 m.s.n.m.

El caudal que se ensayó fue de 583 m³/s; la abertura de las compuertas fue de 2.1 m y el caudal de entrada que se registró en la bocatoma fue de 7.98 m³/s.

5.3.2.1 Tirantes y velocidades en barrage móvil

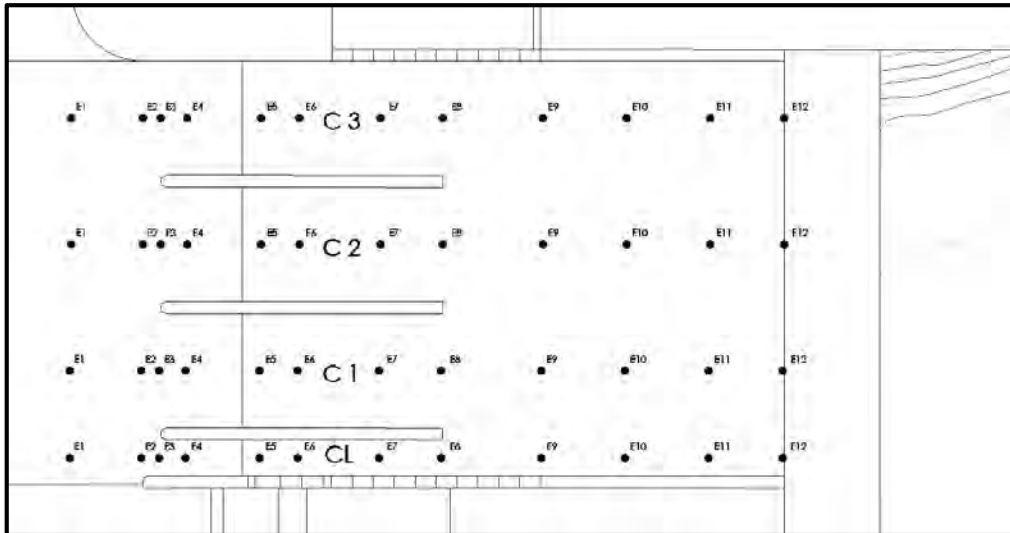


Figura 5.21. Puntos para toma de datos en barrage móvil.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

Tabla 5.5. Tirantes de agua (m) en el eje de cada compuerta del barrage móvil.

SECCIÓN	CL	C1	C2	C3
E1	4.39	4.40	4.42	4.29
E2	4.38	4.40	4.44	4.28
E3	4.41	4.40	4.44	4.28
E4	4.36	4.57	4.56	4.88
E7	1.14	1.25	1.36	1.54
E8	1.28	1.37	1.35	1.68
E9	1.10	1.18	1.22	1.73
E10	1.26	1.08	1.08	1.65
E11	1.38	0.97	1.02	1.80

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

Tabla 5.6. Velocidades (m/s) en el barraje móvil.

SECCIÓN	PUNTO	Modelo	Prototipo
E2	CL-EJE	0.44	1.97
	C1-EJE	0.54	2.42
	C2-EJE	0.58	2.6
	C3-EJE	0.61	2.73
E4	CL-EJE	0.59	2.64
	C1-EJE	0.57	2.54
	C2-EJE	0.57	2.55
	C3-EJE	0.51	2.27
E8	CL-EJE	2.25	10.07
	C1-EJE	2.28	10.21
	C2-EJE	2.35	10.53
	C3-EJE	2.31	10.31
E10	CL-EJE	2.05	9.15
	C1-EJE	2.39	10.7
	C2-EJE	2.39	10.7
	C3-EJE	2.27	10.15

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.3.2.2 Tirantes en el canal de aproximación

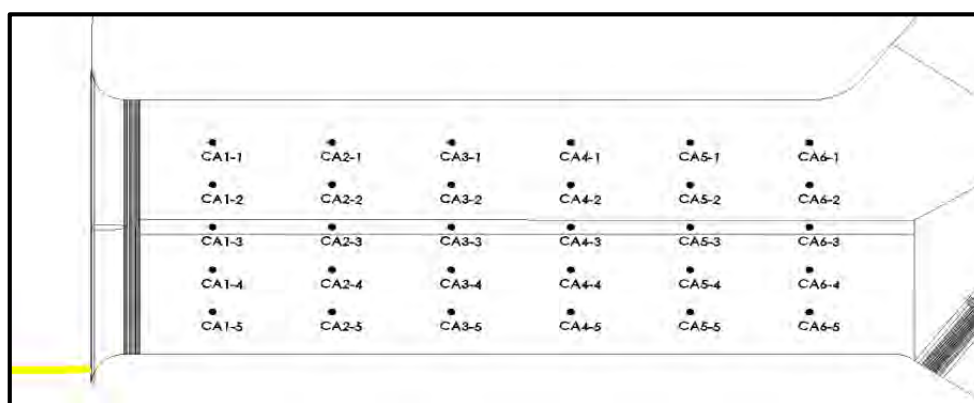


Figura 5.22. Puntos para toma de datos en canal de aproximación.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

Tabla 5.7. Tirantes de agua (m) en el canal de aproximación.

SECCIÓN	1	2	3	4	5
CA1	1.46	2.04	2.88	2.06	1.46
CA2	1.5	2.1	2.84	2.14	1.52
CA3	1.48	2.08	3.14	2.1	1.52
CA4	1.5	2.1	3.22	2.12	1.54
CA5	1.5	2.1	3.3	2.14	1.54
CA6	1.46	2.1	3.34	2.12	1.54

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.3.2.3 Tirantes en la bocatoma

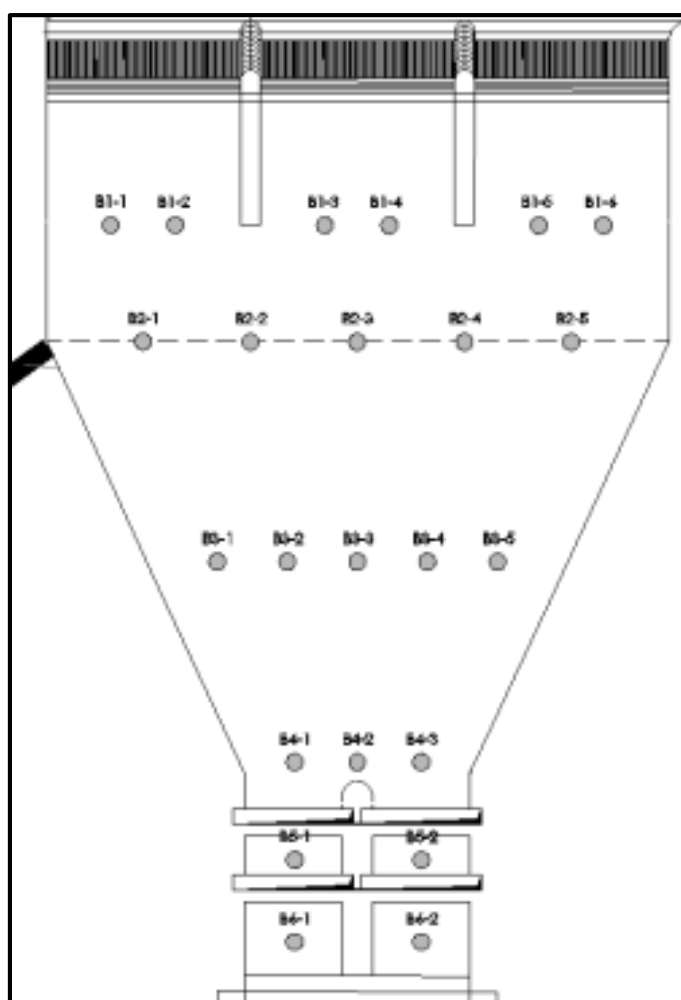


Figura 5.23. Puntos para toma de datos en la bocatoma.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

Tabla 5.8. Tirantes de agua (m) en la bocatoma.

SECCIÓN	1	2	3	4	5	6
B1	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
B2	0.64	0.64	0.64	0.62	0.64	
B3	1.24	1.16	1.18	1.16	1.14	
B4	1.26	1.2	1.22			
B5	1.24	1.22				
B6	1.24	1.22				

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.3.2.4 Topografía y erosión

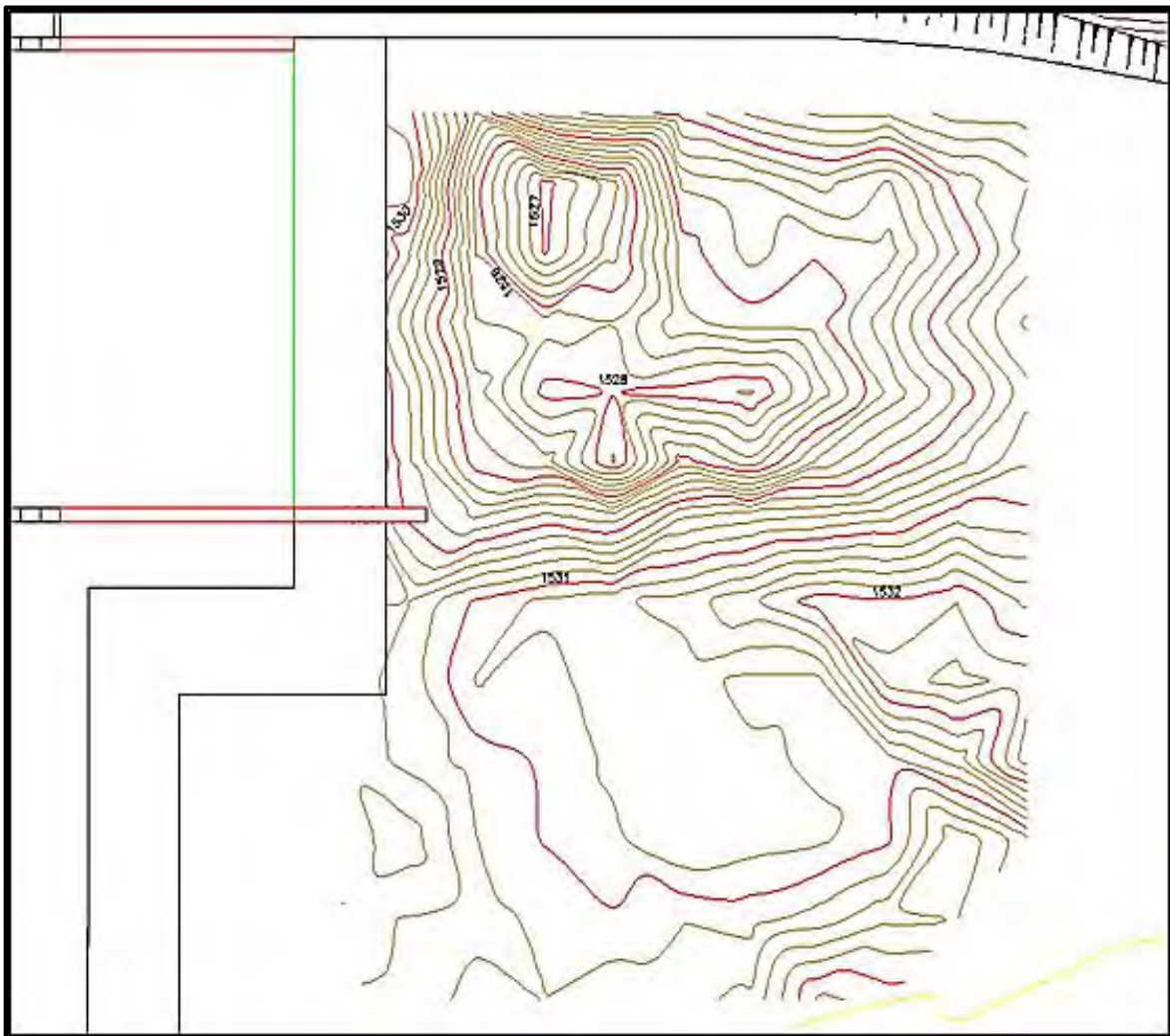


Figura 5.24. Curvas de nivel para ensayo en nivel de operación de 1537.35 m.s.n.m.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.4 Ensayos programados con el diseño definitivo

Para los ensayos realizados, se mantuvo el nivel de operación normal en la cota 1537.85 m.s.n.m. y se tomaron en cuenta los siguientes datos para comprobar la disipación de energía en el modelo hidráulico: Tirantes de agua y velocidades en el barraje móvil, así como también erosión aguas debajo de la rampa incorporada.

Se realizaron pruebas para cada una de las compuertas en funcionamiento individual y posteriormente en simultáneo para diferentes caudales y diferentes aberturas. Con esto no sólo se podría medir la erosión y capacidad de disipación de energía de las estructuras propuestas; sino también definir la curva “Abertura de compuerta vs Caudal” para cada una de las compuertas.

Para estos ensayos se modificaron los puntos donde se tomaron las medidas, los cuales se muestran a continuación:

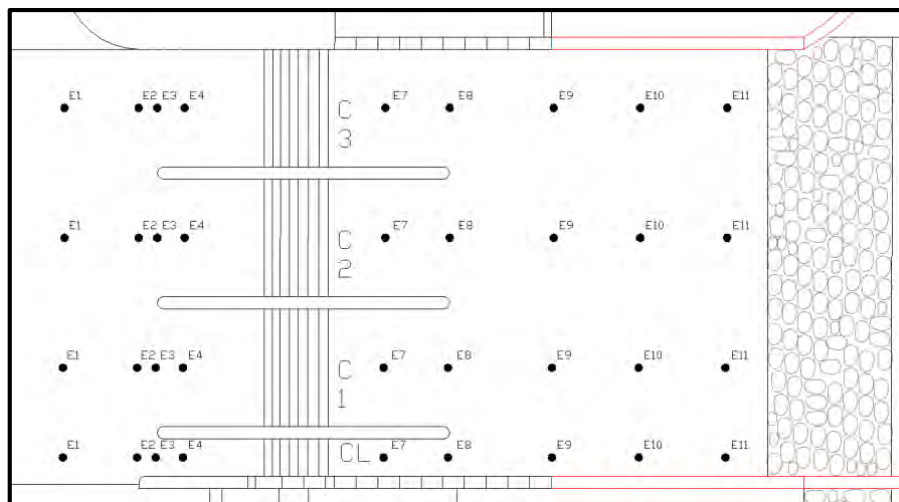


Figura 5.25. Puntos definitivos para toma de datos en barraje móvil.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

Para el caso de las velocidades, se consideraron solamente los puntos E4, E7, E8 y E11.

5.4.1 Ensayos para compuerta N° 1

5.4.1.1 Ensayo con caudal = 66.5 m³/s

Para lograr el nivel de operación deseado de 1537.85 m.s.n.m. se necesitó de un caudal de 66.5 m³/s y de una abertura de 1 m. El nivel de agua en la sección de control aguas abajo fue de 1531.7 m.s.n.m.



Figura 5.26. Comportamiento del flujo para $Q = 66.5 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

A. Tirantes de agua

A continuación se muestran los valores de los tirantes registrados.

Tabla 5.9. Tirantes de agua (m) para $Q = 66.5 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1.

SECCIÓN	COMPUERTA 1		
	MI	EJE	MD
E1		5.38	
E2		5.42	
E3	4.95	4.96	4.96
E4	4.97	4.97	4.97
E7	0.69	0.60	0.48
E8	0.58	0.66	0.72
E9		0.58	
E10		0.54	
E11		0.43	

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

B. Velocidades

En la siguiente tabla se presenta el valor de las velocidades en cada uno de los puntos de medición mostrados al inicio de este apartado. Es importante mencionar que la altura de medición en cada uno de estos puntos es de 0.2H, 0.6H y 0.8H medidos desde la superficie de agua hasta el fondo.

Tabla 5.10. Velocidades (m/s) para $Q = 66.5 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1.

SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	4.97	0.20H	0.99	1.65
		0.60H	2.98	0.82
		0.80H	3.98	0.61
E7	0.60	0.20H	0.12	
		0.60H	0.36	10.27
		0.80H	0.48	9.87
E8	0.66	0.20H	0.13	
		0.60H	0.40	10.51
		0.80H	0.53	10.07
E11	0.43	0.20H	0.09	
		0.60H	0.26	10.22
		0.80H	0.34	9.78

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

C. Erosión y topografía

Ahora se presentan las curvas de nivel de la zona del cauce erosionado aguas debajo de la plataforma:

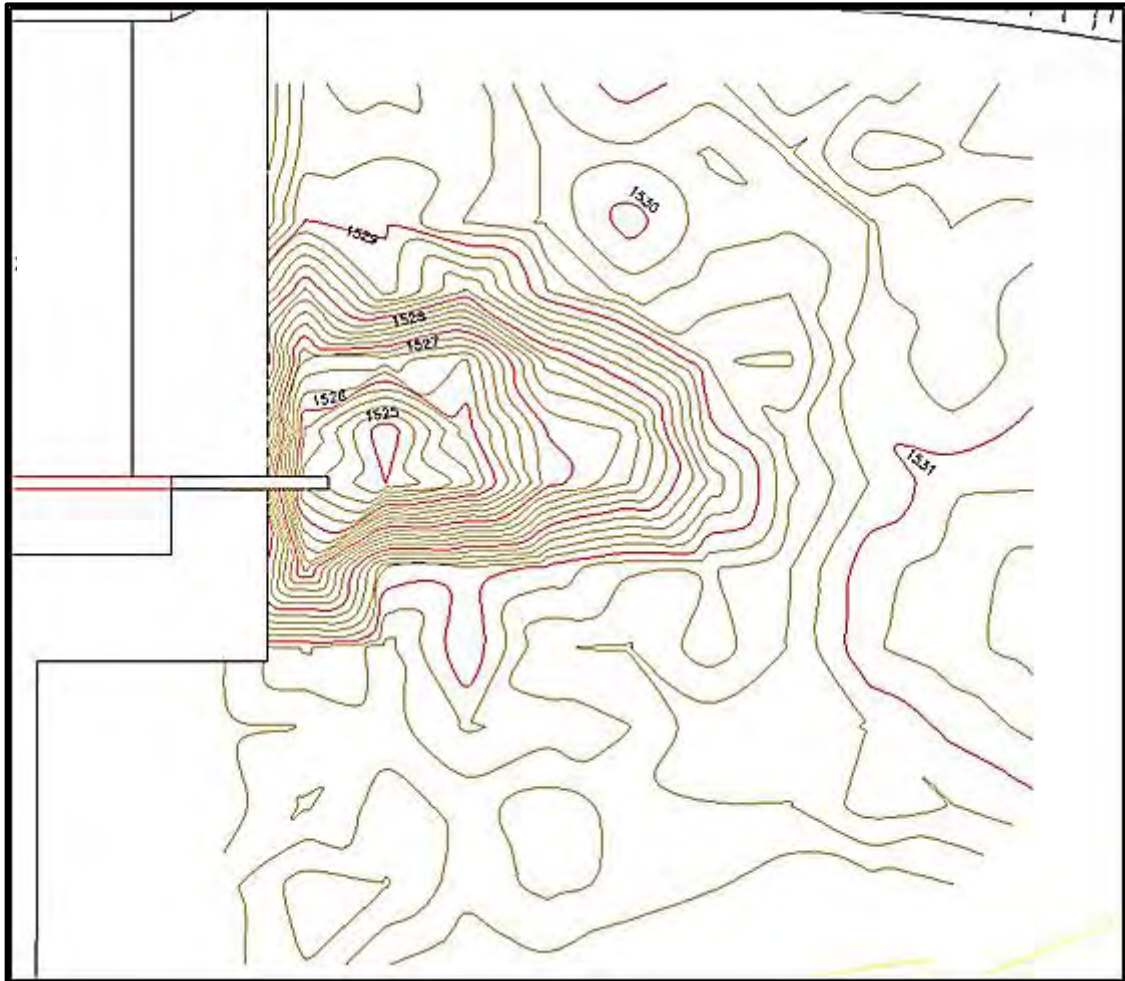


Figura 5.27. Curvas de nivel para erosión en ensayo $Q = 66 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.4.1.2 Ensayo con caudal = 117 m³/s

Para lograr el nivel de operación deseado de 1537.85 m.s.n.m. se necesitó de un caudal de 117 m³/s y de una abertura de 2.36 m. El nivel de agua en la sección de control aguas abajo fue de 1531.9 m.s.n.m.

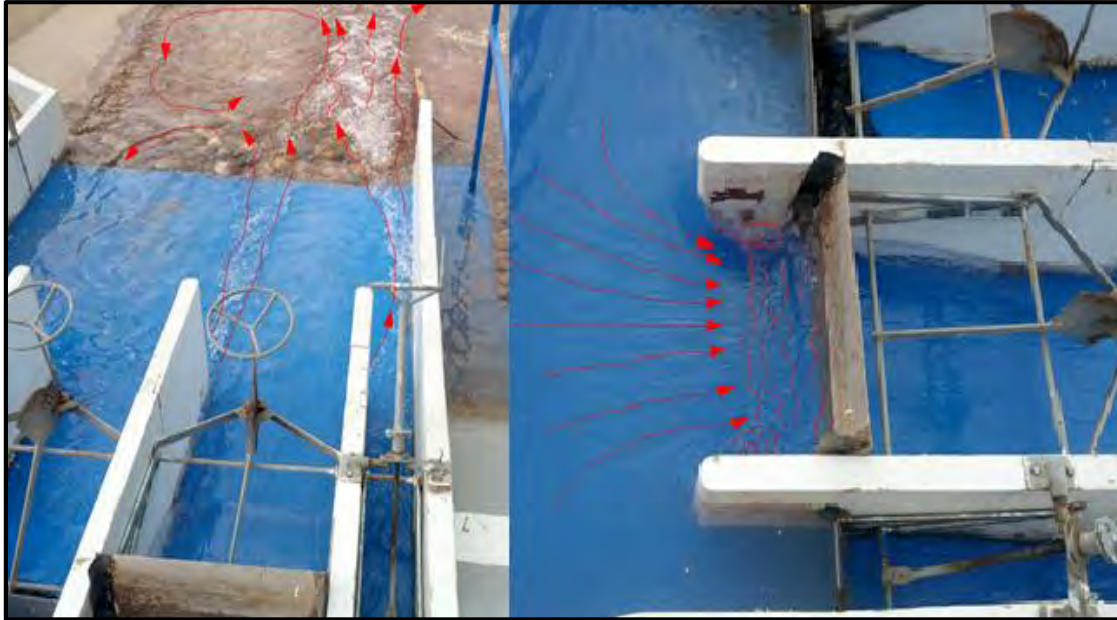


Figura 5.28. Comportamiento del flujo para $Q = 117 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

A. Tirantes

Los niveles de agua que se recogieron para este ensayo fueron:

Tabla 5.11. Tirantes de agua (m) para $Q = 117 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1.

SECCIÓN	COMPUERTA 1		
	MI	EJE	MD
E1		4.95	
E2		4.96	
E3	4.97	4.97	4.97
E4	4.98	4.98	4.98
E7	0.99	1.18	1.23
E8	1.23	1.23	1.21
E9		1.12	
E10		0.85	
E11		0.55	

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

B. Velocidades

Tabla 5.12. Velocidades (m/s) para $Q = 117 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1.

SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	4.98	0.20H	1.00	3.98
		0.60H	2.99	2.82
		0.80H	3.98	2.63
E7	1.18	0.20H	0.24	
		0.60H	0.71	10.84
		0.80H	0.94	8.16
E8	1.23	0.20H	0.25	
		0.60H	0.74	10.89
		0.80H	0.99	10.63
E11	0.55	0.20H	0.11	
		0.60H	0.33	10.57
		0.80H	0.44	10.18

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

C. Erosión y topografía

Las curvas de nivel obtenidas después del presente ensayo fueron las siguientes:

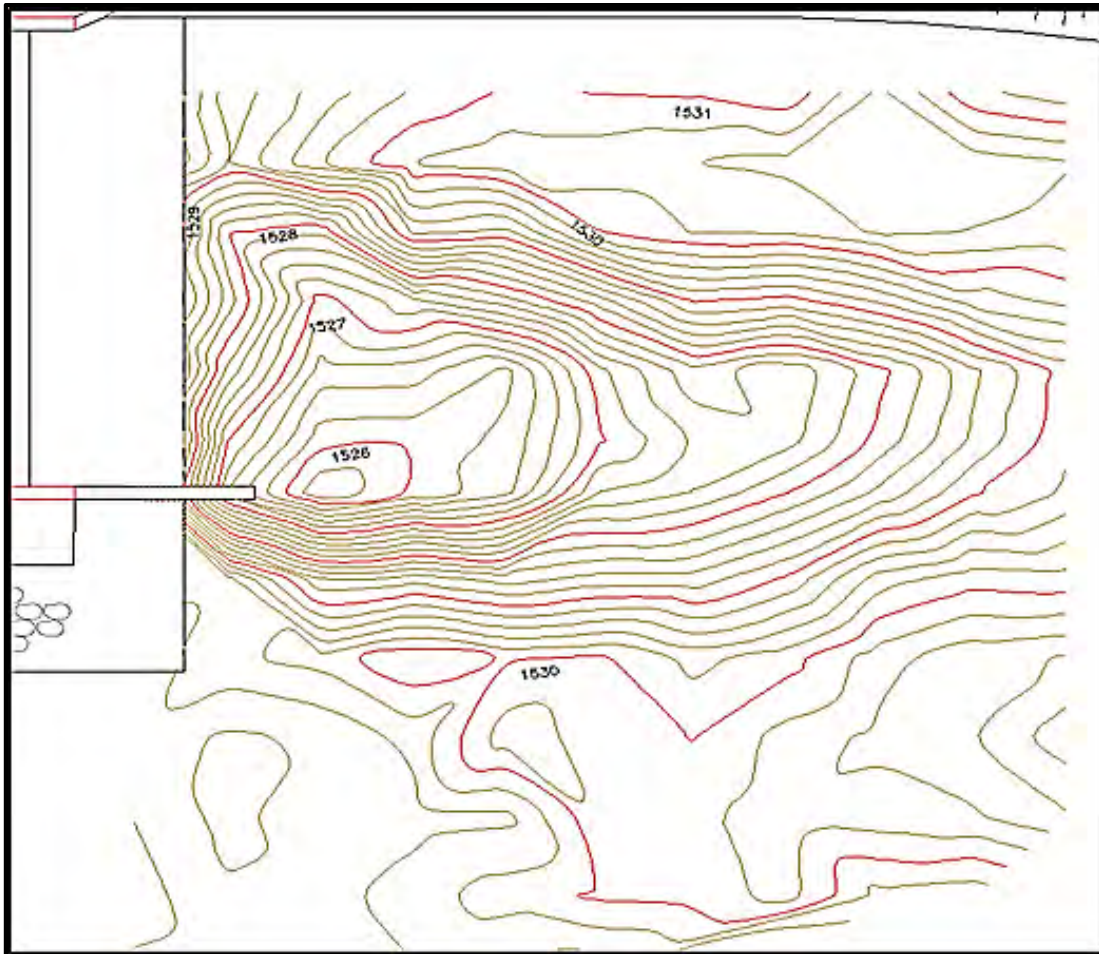


Figura 5.29. Curvas de nivel para erosión en ensayo $Q = 117 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

En la figura 5.30 , se aprecia como la erosión mayor se da después de la prolongación del muro divisorio de barraje móvil y fijo.



Figura 5.30. Resultados de la erosión para $Q = 117 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.4.1.3 Ensayo con caudal = 138.22 m³/s

Para lograr el nivel de operación deseado de 1537.85 m.s.n.m. se necesitó de un caudal de 138.22 m³/s y de una abertura de 3 m. El nivel de agua en la sección de control aguas abajo fue de 1531.98 m.s.n.m.

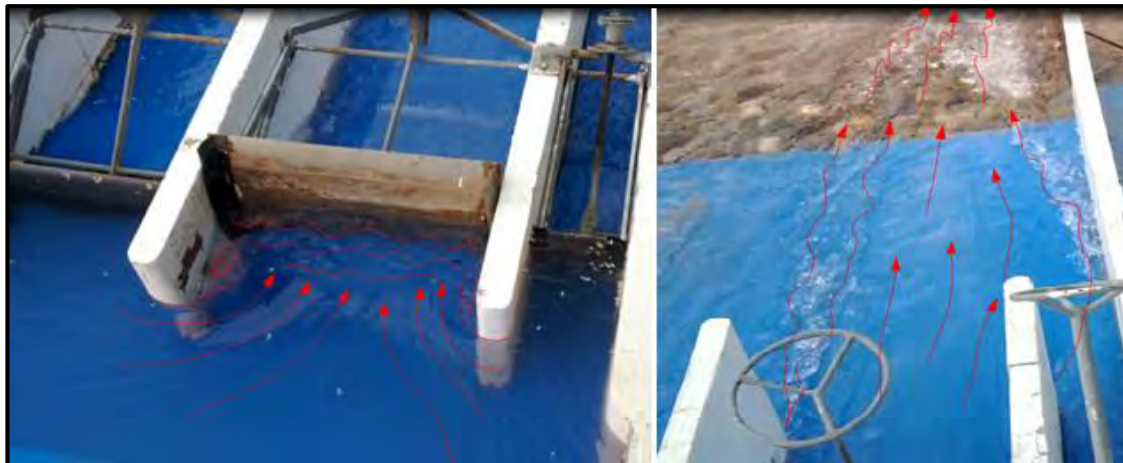


Figura 5.31. Comportamiento del flujo para $Q = 138.22 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

A. Tirantes

Los niveles de agua correspondientes se muestran a continuación en la tabla 5.13.

Tabla 5.13. Tirantes de agua (m) para $Q = 138.22 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1.

SECCIÓN	COMPUERTA 1		
	MI	EJE	MD
E1		4.96	
E2		4.95	
E3	4.75	4.94	4.81
E4	4.61	4.92	4.638
E7	1.63	1.67	1.35
E8	1.43	1.60	1.62
E9		1.26	
E10		1.02	
E11		0.62	

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

B. Velocidades

Tabla 5.14. Velocidades (m/s) para $Q = 138.22 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1.

SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	4.92	0.20H	0.98	3.70
		0.60H	2.95	3.67
		0.80H	3.94	3.75
E7	1.67	0.20H	0.33	
		0.60H	1.00	10.24
		0.80H	1.34	9.07
E8	1.60	0.20H	0.32	
		0.60H	0.96	10.33
		0.80H	1.28	8.30
E11	0.62	0.20H	0.12	
		0.60H	0.37	10.54
		0.80H	0.49	8.88

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.4.1.4 Ensayo con caudal = 159.68 m³/s

Para lograr el nivel de operación deseado de 1537.85 m.s.n.m. se necesitó de un caudal de 159.68 m³/s y la compuerta totalmente abierta. El nivel de agua en la sección de control aguas abajo fue de 1532.06 m.s.n.m.

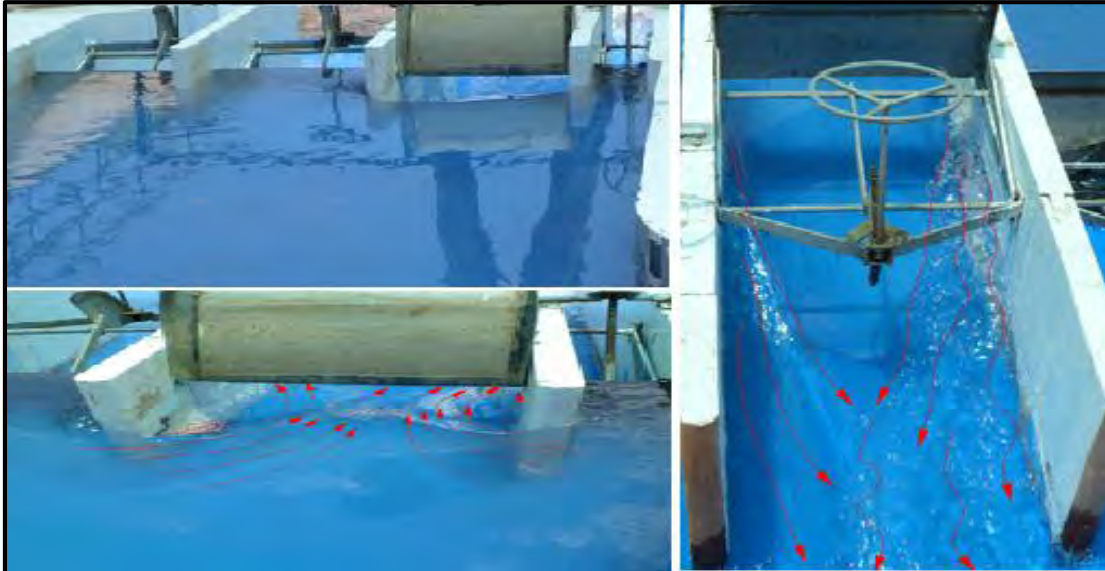


Figura 5.33. Comportamiento del flujo para $Q = 159.68 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

A. Tirantes

Los tirantes encontrados para el presente caudal fueron:

Tabla 5.15. Tirantes de agua (m) para $Q = 159.68 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1.

SECCIÓN	COMPUERTA 1		
	MI	EJE	MD
E1		4.92	
E2		4.89	
E3	4.36	4.87	4.83
E4	2.38	4.32	3.52
E7	1.81	2.25	1.48
E8	1.40	2.24	1.47
E9		1.44	
E10		1.27	
E11		1.33	

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

B. Velocidades

Para el presente caudal, gracias a los tirantes más altos, se lograron medir las velocidades a 0.8h en la mayoría de las secciones determinadas.

Tabla 5.16. Velocidades (m/s) para $Q = 159.68 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1.

SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	4.32	0.20H	0.86	4.77
		0.60H	2.59	4.52
		0.80H	3.46	4.33
E7	2.25	0.20H	0.45	9.95
		0.60H	1.35	9.92
		0.80H	1.80	8.82
E8	2.24	0.20H	0.45	9.80
		0.60H	1.34	10.02
		0.80H	1.79	9.41
E11	1.33	0.20H	0.27	
		0.60H	0.80	9.87
		0.80H	1.06	9.10

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

C. Erosión y topografía

Podemos apreciar mediante las curvas de nivel, que la mayor profundidad de la erosión ahora está más alejada del final de la plataforma.

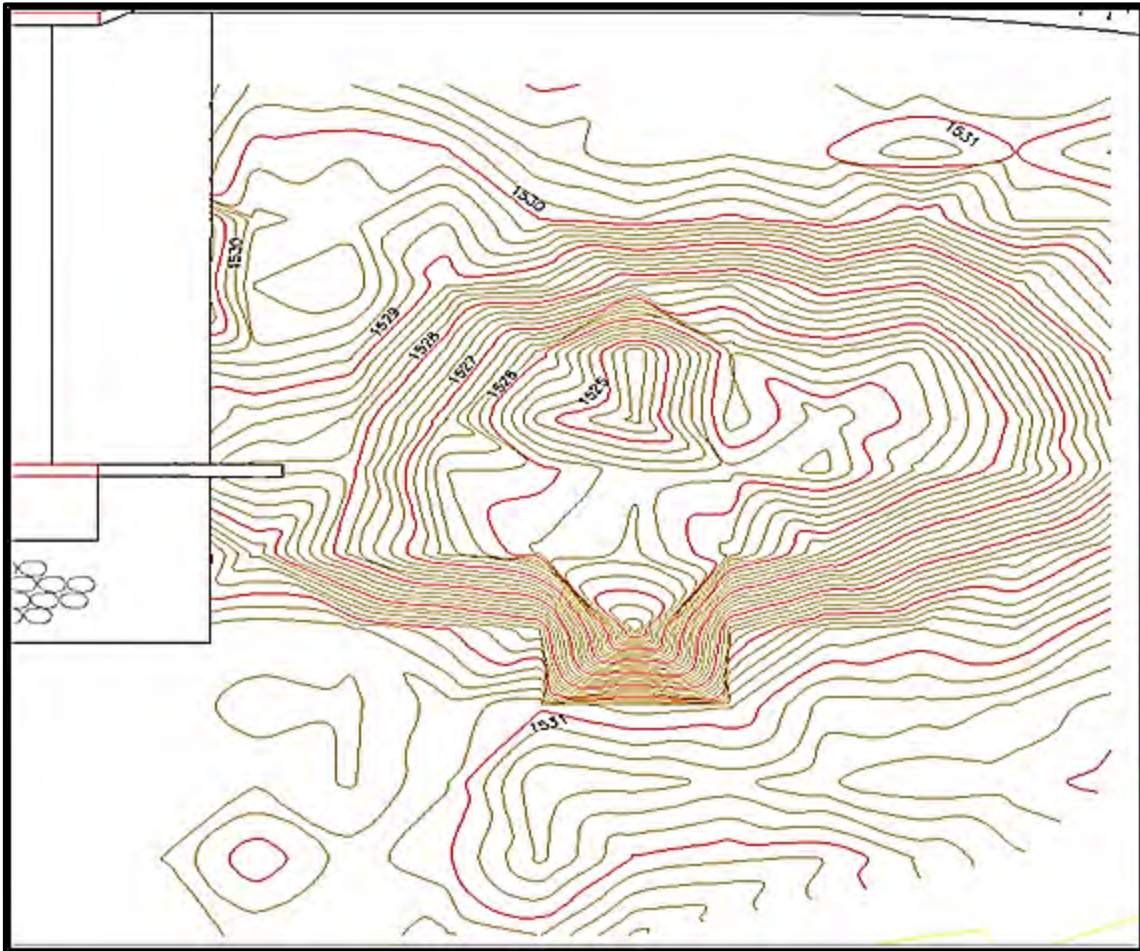


Figura 5.34. Curvas de nivel para erosión en ensayo $Q = 159.68 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.4.2 Ensayos para compuerta N° 2

5.4.2.1 Ensayo con caudal = 66 m³/s

Para lograr el nivel de operación deseado de 1537.85 m.s.n.m. se necesitó de un caudal de 66 m³/s y una abertura de 1 m. El nivel de agua en la sección de control aguas abajo fue de 1531.7 m.s.n.m.



Figura 5.35. Comportamiento del flujo para $Q = 66 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 2.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

A. Tirantes

Estos fueron los tirantes para el primer ensayo realizado con la compuerta N° 2:

Tabla 5.17. Tirantes de agua (m) para $Q = 66 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 2.

SECCIÓN	COMPUERTA 2		
	MI	EJE	MD
E1		4.95	
E2		4.96	
E3	4.97	4.97	4.96
E4	4.97	4.98	4.97
E7	0.90	0.68	0.79
E8	0.76	0.67	0.60
E9		0.58	
E10		0.59	
E11		0.62	

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

B. Velocidades

Las velocidades captadas para el presente caudal, son mayores en comparación a las medidas con un caudal muy similar para la compuerta N° 1.

Tabla 5.18. Velocidades (m/s) para $Q = 66 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 2.

SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	4.98	0.20H	1.00	2.01
		0.60H	2.99	1.29
		0.80H	3.98	1.16
E7	0.68	0.20H	0.14	
		0.60H	0.41	10.81
		0.80H	0.55	10.39
E8	0.67	0.20H	0.13	
		0.60H	0.40	10.45
		0.80H	0.53	10.21
E11	0.62	0.20H	0.12	
		0.60H	0.37	11.00
		0.80H	0.50	9.73

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

C. Erosión y topografía

Ahora se puede apreciar como la erosión más considerable se movió casi a la altura del eje del barraje móvil.

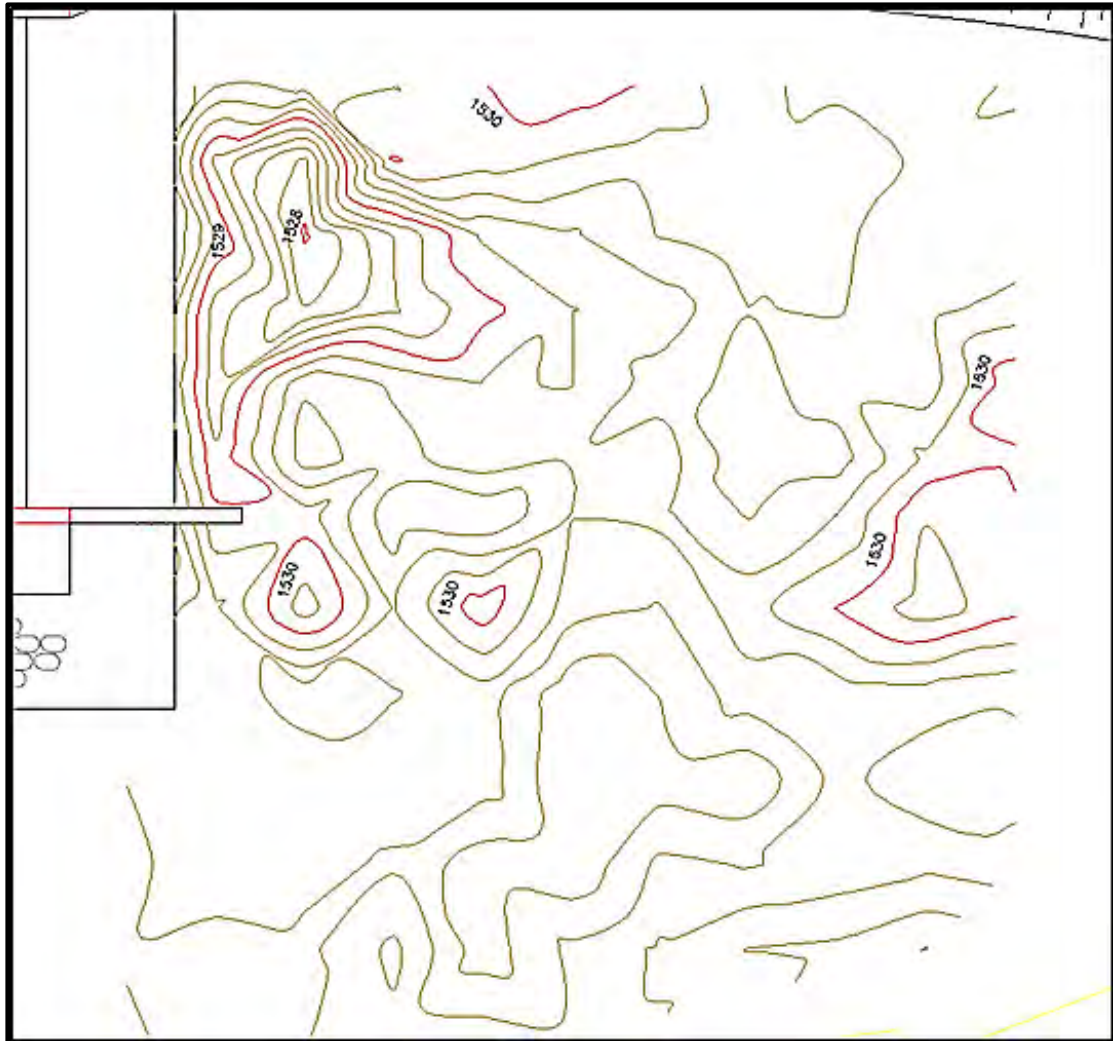


Figura 5.36. Curvas de nivel para erosión en ensayo $Q = 66 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 2.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.4.2.2 Ensayo con caudal = 106.55 m³/s

Para lograr el nivel de operación deseado de 1537.85 m.s.n.m. se necesitó de un caudal de 106.55 m³/s y una abertura de 2 m. El nivel de agua en la sección de control aguas abajo fue de 1531.9 m.s.n.m.



Figura 5.37. Comportamiento del flujo para Q = 106.55 m³/s. – Compuerta 2.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

A. Tirantes

Tabla 5.19. Tirantes de agua (m) para Q = 106.55 m³/s. – Compuerta 2.

SECCIÓN	COMPUERTA 2		
	MI	EJE	MD
E1		4.95	
E2		4.96	
E3	4.96	4.96	4.96
E4	4.97	4.98	4.97
E7	1.29	1.29	1.23
E8	1.29	1.33	1.02
E9		1.15	
E10		0.97	
E11		0.71	

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

B. Velocidades

Tabla 5.20. Velocidades (m/s) para $Q = 106.55 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 2.

SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	4.98	0.20H	1.00	3.44
		0.60H	2.99	2.25
		0.80H	3.98	2.04
E7	1.29	0.20H	0.26	
		0.60H	0.78	10.51
		0.80H	1.03	13.39
E8	1.33	0.20H	0.27	
		0.60H	0.80	10.68
		0.80H	1.06	9.76
E11	0.71	0.20H	0.14	
		0.60H	0.43	9.83
		0.80H	0.57	10.07

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

C. Erosión y topografía

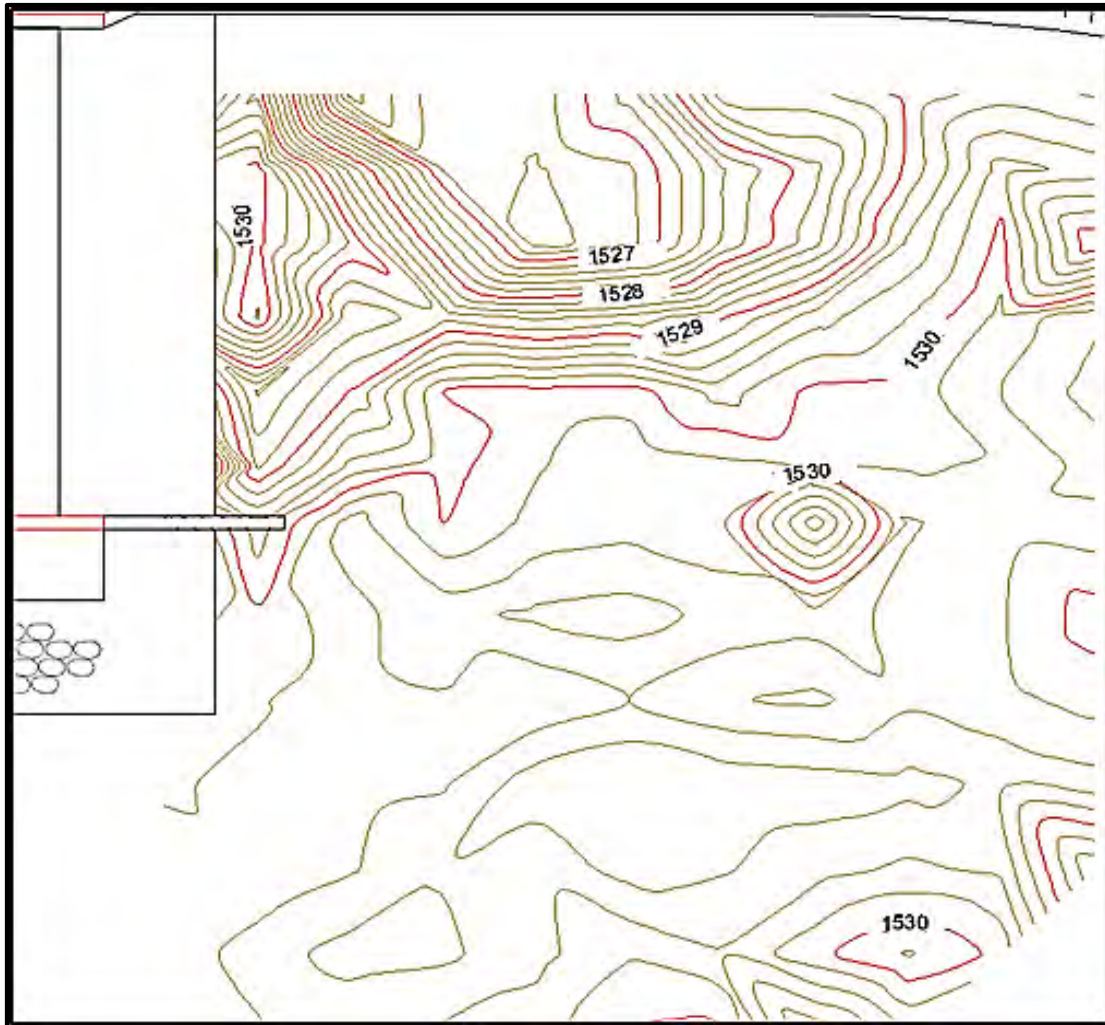


Figura 5.38. Curvas de nivel para erosión en ensayo $Q = 106.55 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 2.
Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.4.2.3 Ensayo con caudal = 148.95 m³/s

Para lograr el nivel de operación deseado de 1537.85 m.s.n.m. se necesitó de un caudal de 148.95 m³/s y una abertura de 3 m. El nivel de agua en la sección de control aguas abajo fue de 1532.02 m.s.n.m.



Figura 5.39. Comportamiento del flujo para $Q = 148.95 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 2.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

A. Tirantes

Tabla 5.21. Tirantes de agua (m) para $Q = 148.95 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 2.

SECCIÓN	COMPUERTA 2		
	MI	EJE	MD
E1		4.95	
E2		4.96	
E3	4.63	4.99	4.61
E4	4.29	4.79	4.28
E7	1.15	1.40	1.29
E8	1.21	1.36	1.10
E9		0.83	
E10		0.73	
E11		0.56	

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

B. Velocidades

Tabla 5.22. Velocidades (m/s) para $Q = 148.95 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 2.

SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	4.79	0.20H	0.96	4.55
		0.60H	2.87	3.81
		0.80H	3.83	3.34
E7	1.40	0.20H	1.12	
		0.60H	0.84	10.49
		0.80H	0.28	10.36
E8	1.36	0.20H	1.09	
		0.60H	0.81	10.51
		0.80H	0.27	10.50
E11	0.56	0.20H	0.45	
		0.60H	0.33	11.37
		0.80H	0.11	11.28

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

C. Erosión y topografía

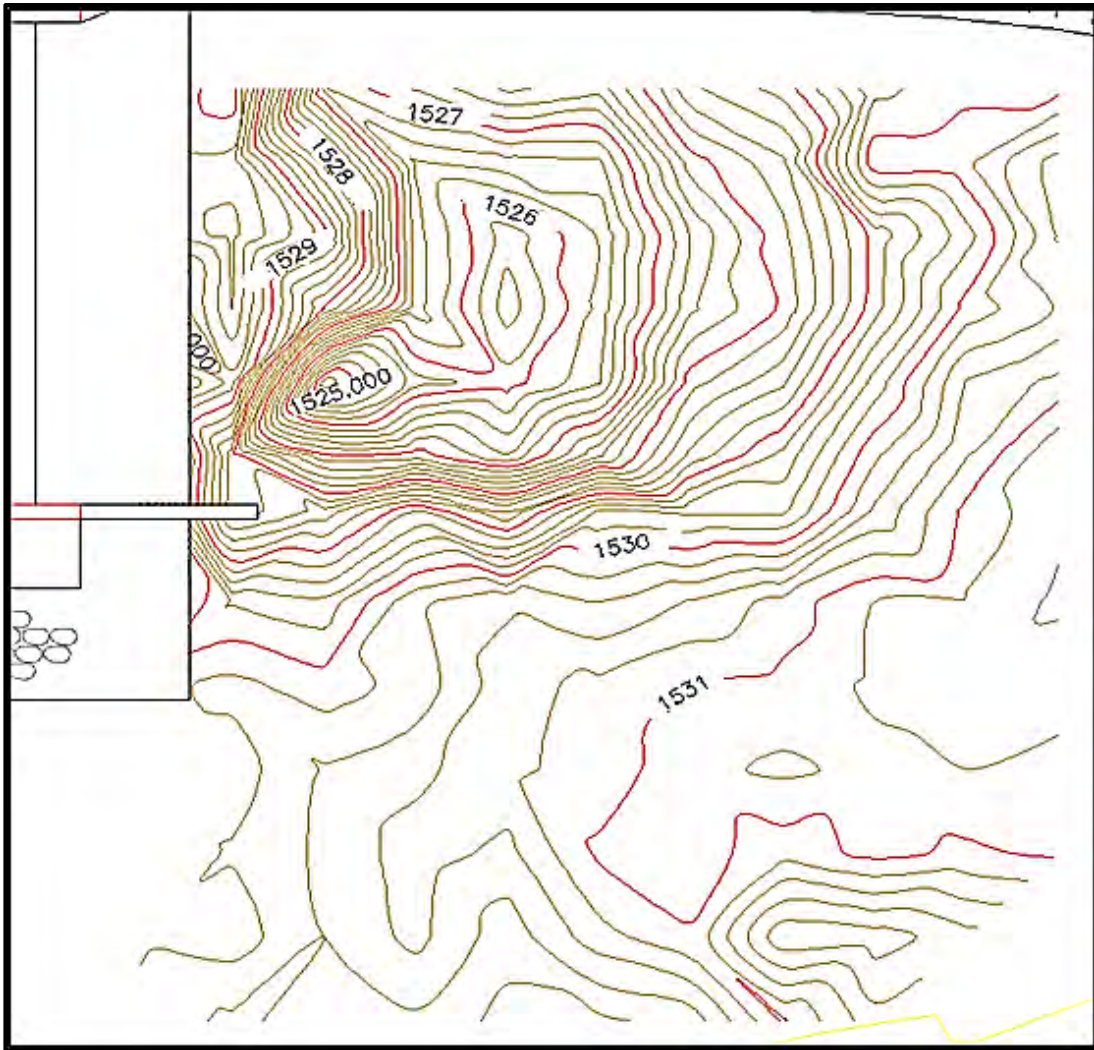


Figura 5.40. Curvas de nivel para erosión en ensayo $Q = 148.95 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 2.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.4.2.4 Ensayo con caudal = 164.65 m³/s

Para lograr el nivel de operación deseado de 1537.85 m.s.n.m. se necesitó de un caudal de 164.95 m³/s y con la compuerta N° 2 totalmente abierta. El nivel de agua en la sección de control aguas abajo fue de 1532.02 m.s.n.m.



Figura 5.41. Comportamiento del flujo para Q = 164.65 m³/s. – Compuerta 2.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

A. Tirantes

Tabla 5.23. Tirantes de agua (m) para Q = 164.65 m³/s. – Compuerta 2.

SECCIÓN	COMPUERTA 2		
	MI	EJE	MD
E1		4.95	
E2		4.842	
E3	4.42	4.662	4.614
E4	2.698	4.164	2.99
E7	1.392	1.588	1.402
E8	1.154	2.026	1.22
E9		1.014	
E10		0.754	
E11		0.502	

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

B. Velocidades

Tabla 5.24. Velocidades (m/s) para $Q = 164.65 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 2.

SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	4.16	0.20H	0.83	5.51
		0.60H	2.50	5.23
		0.80H	3.33	5.05
E7	1.59	0.20H	0.32	
		0.60H	0.95	9.97
		0.80H	1.27	9.89
E8	2.03	0.20H	0.41	
		0.60H	1.22	10.08
		0.80H	1.62	9.26
E11	0.50	0.20H	0.10	
		0.60H	0.30	12.42
		0.80H	0.40	10.80

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

C. Erosión y topografía

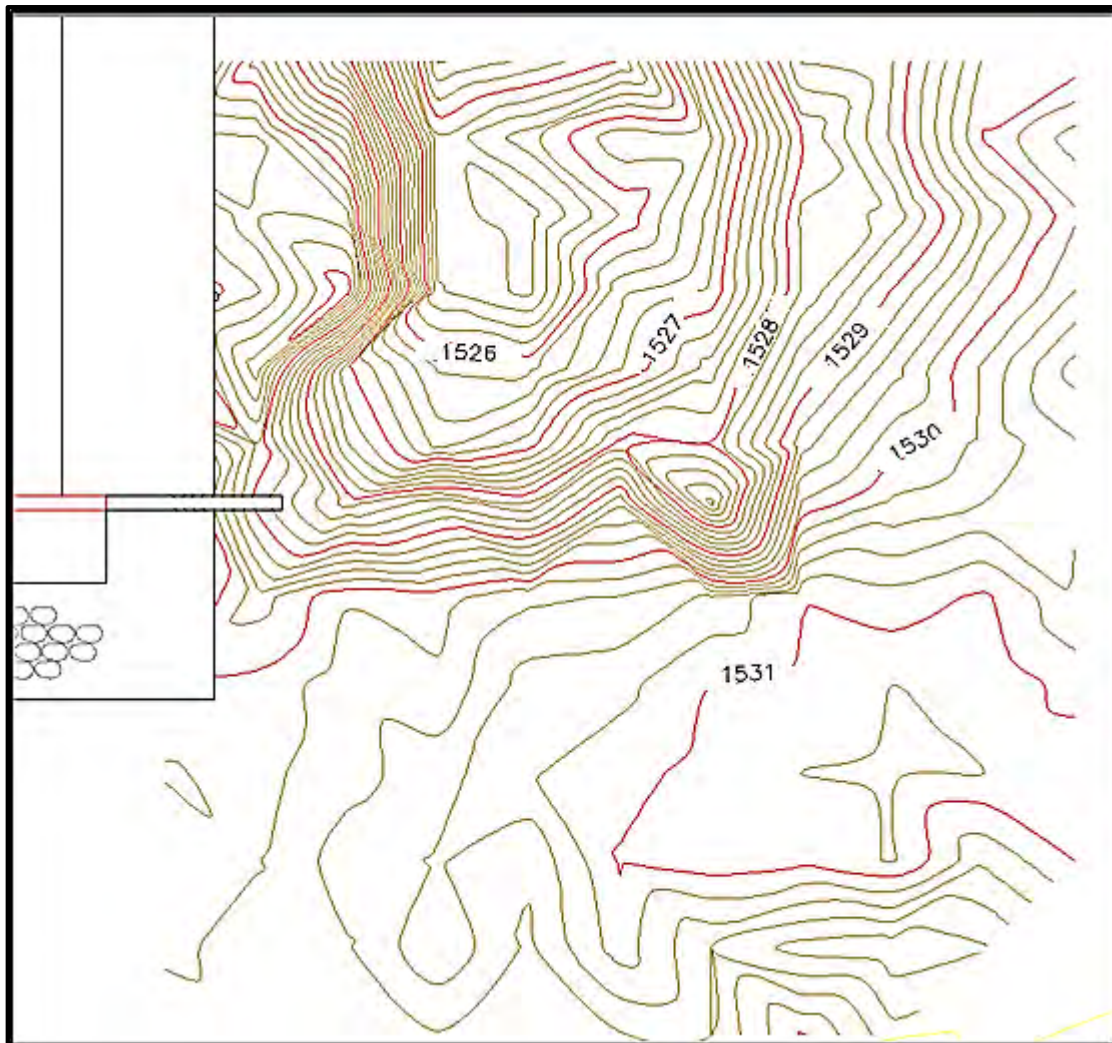


Figura 5.42. Curvas de nivel para erosión en ensayo $Q = 164.65 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 2.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.4.3 Ensayos para compuerta N° 3

5.4.3.1 Ensayo con caudal 66.44 m³/s

Para lograr el nivel de operación deseado de 1537.85 m.s.n.m. se necesitó de un caudal de 66.44 m³/s y una abertura de 1 m. El nivel de agua en la sección de control aguas abajo fue de 1531.7 m.s.n.m.



Figura 5.43. Comportamiento del flujo para $Q = 66.44 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 3.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

A. Tirantes

Tabla 5.25. Tirantes de agua (m) para $Q = 66.44 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 3.

SECCIÓN	COMPUERTA 3		
	MI	EJE	MD
E1		4.95	
E2		4.96	
E3	4.97	4.97	4.96
E4	4.97	4.98	4.97
E7	0.846	0.67	0.678
E8	0.804	0.646	0.592
E9		0.772	
E10		0.776	
E11		0.616	

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

B. Velocidades

Tabla 5.26. Velocidades (m/s) para $Q = 66.44 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 3.

SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	4.98	0.20H	1.00	2.07
		0.60H	2.99	1.37
		0.80H	3.98	1.16
E7	0.67	0.20H	0.13	
		0.60H	0.40	
		0.80H	0.54	11.67
E8	0.65	0.20H	0.13	
		0.60H	0.39	
		0.80H	0.52	10.73
E11	0.62	0.20H	0.12	
		0.60H	0.37	
		0.80H	0.49	9.70

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

C. Erosión y topografía



Figura 5.44. Curvas de nivel para erosión en ensayo $Q = 66.44 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 3.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.4.3.2 Ensayo con caudal = 102.18 m³/s

Para lograr el nivel de operación deseado de 1537.85 m.s.n.m. se necesitó de un caudal de 102.18 m³/s y una abertura de 2 m. El nivel de agua en la sección de control aguas abajo fue de 1531.9 m.s.n.m.

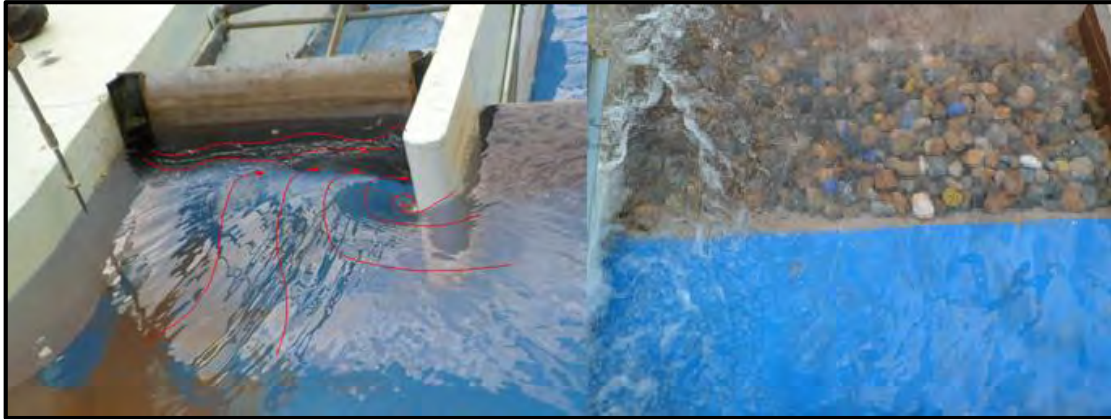


Figura 5.45. Comportamiento del flujo para $Q = 102.18 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 3.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

A. Tirantes

Tabla 5.27. Tirantes de agua (m) para $Q = 102.18 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 3.

SECCIÓN	COMPUERTA 3		
	MI	EJE	MD
E1		4.95	
E2		4.96	
E3	4.908	5.028	4.702
E4	5.084	5.136	4.75
E7	1.172	1.044	1.118
E8	1.188	1.11	1.334
E9		1.378	
E10		1.738	
E11		1.494	

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

B. Velocidades

Tabla 5.28. Velocidades (m/s) para $Q = 102.18 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 3.

SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	5.14	0.20H	1.03	3.11
		0.60H	3.08	2.27
		0.80H	4.11	1.91
E7	1.04	0.20H	0.21	
		0.60H	0.63	9.85
		0.80H	0.84	11.46
E8	1.11	0.20H	0.22	
		0.60H	0.67	11.31
		0.80H	0.89	11.20
E11	1.49	0.20H	0.30	
		0.60H	0.90	10.23
		0.80H	1.20	9.30

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

C. Erosión y topografía



Figura 5.46. Curvas de nivel para erosión en ensayo $Q = 102.18 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 3.
Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.4.3.3 Ensayo con caudal = 145.14 m³/s

Para lograr el nivel de operación deseado de 1537.85 m.s.n.m. se necesitó de un caudal de 145.14 m³/s y una abertura de 3 m. El nivel de agua en la sección de control aguas abajo fue de 1532.02 m.s.n.m.

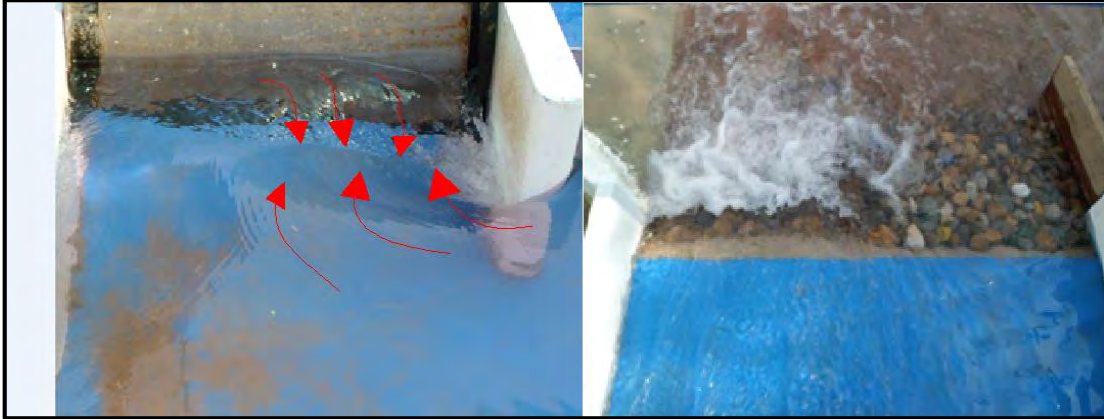


Figura 5.47. Comportamiento del flujo para Q = 145.14 m³/s. – Compuerta 3.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

A. Tirantes

Tabla 5.29. Tirantes de agua (m) para Q = 145.14 m³/s. – Compuerta 3.

SECCIÓN	COMPUERTA 3		
	MI	EJE	MD
E1		4.95	
E2		4.934	
E3	4.738	4.816	4.48
E4	4.82	4.86	4.5
E7	1.624	1.574	1.482
E8	1.586	1.712	1.454
E9		1.518	
E10		1.268	
E11		1.268	

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

B. Velocidades

Tabla 5.30. Velocidades (m/s) para $Q = 145.14 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 3.

SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	4.86	0.20H	0.97	4.46
		0.60H	2.92	3.61
		0.80H	3.89	3.33
E7	1.57	0.20H	0.31	
		0.60H	0.94	10.71
		0.80H	1.26	10.68
E8	1.71	0.20H	0.34	
		0.60H	1.03	10.68
		0.80H	1.37	10.68
E11	1.27	0.20H	0.25	
		0.60H	0.76	10.50
		0.80H	1.01	10.41

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

C. Erosión y topografía



Figura 5.48. Curvas de nivel para erosión en ensayo $Q = 145.14 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 3.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.4.3.4 Ensayo con caudal = 172.03 m³/s

Para lograr el nivel de operación deseado de 1537.85 m.s.n.m. se necesitó de un caudal de 172.03 m³/s y la compuerta N° 3 totalmente abierta. El nivel de agua en la sección de control aguas abajo fue de 1532.07 m.s.n.m.

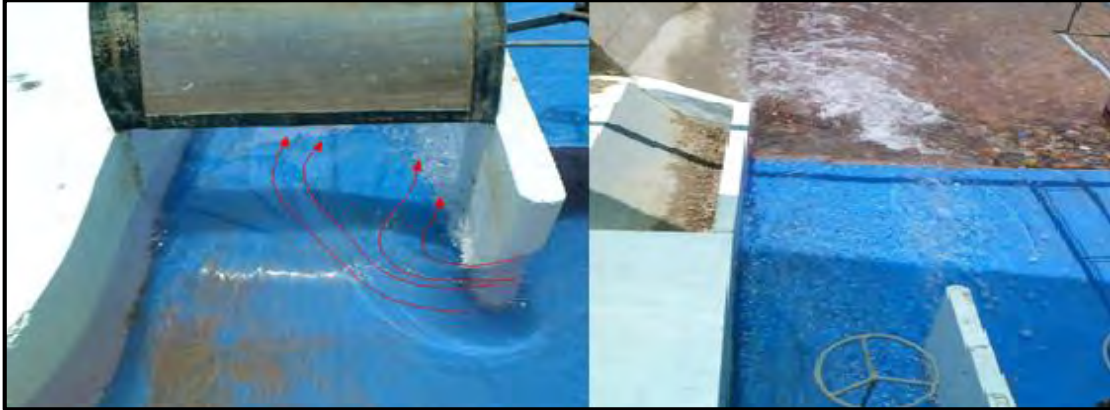


Figura 5.49. Comportamiento del flujo para $Q = 172.03 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 3.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

A. Tirantes

Tabla 5.31. Tirantes de agua (m) para $Q = 172.03 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 3.

SECCIÓN	COMPUERTA 3		
	MI	EJE	MD
E1		4.924	
E2		4.658	
E3	4.164	4.412	3.816
E4	3.3	3.906	3
E7	1.692	1.764	1.534
E8	1.522	2.266	1.94
E9		1.7	
E10		1.438	
E11		1.906	

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

B. Velocidades

Tabla 5.32. Velocidades (m/s) para $Q = 172.03 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 3.

SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	4.86	0.20H	0.97	5.52
		0.60H	2.92	5.55
		0.80H	3.89	5.42
E7	1.76	0.20H	0.35	
		0.60H	1.06	9.95
		0.80H	1.41	10.40
E8	2.27	0.20H	0.45	
		0.60H	1.36	10.05
		0.80H	1.81	9.28
E11	1.91	0.20H	0.38	
		0.60H	1.14	10.52
		0.80H	1.52	9.36

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

C. Erosión y topografía

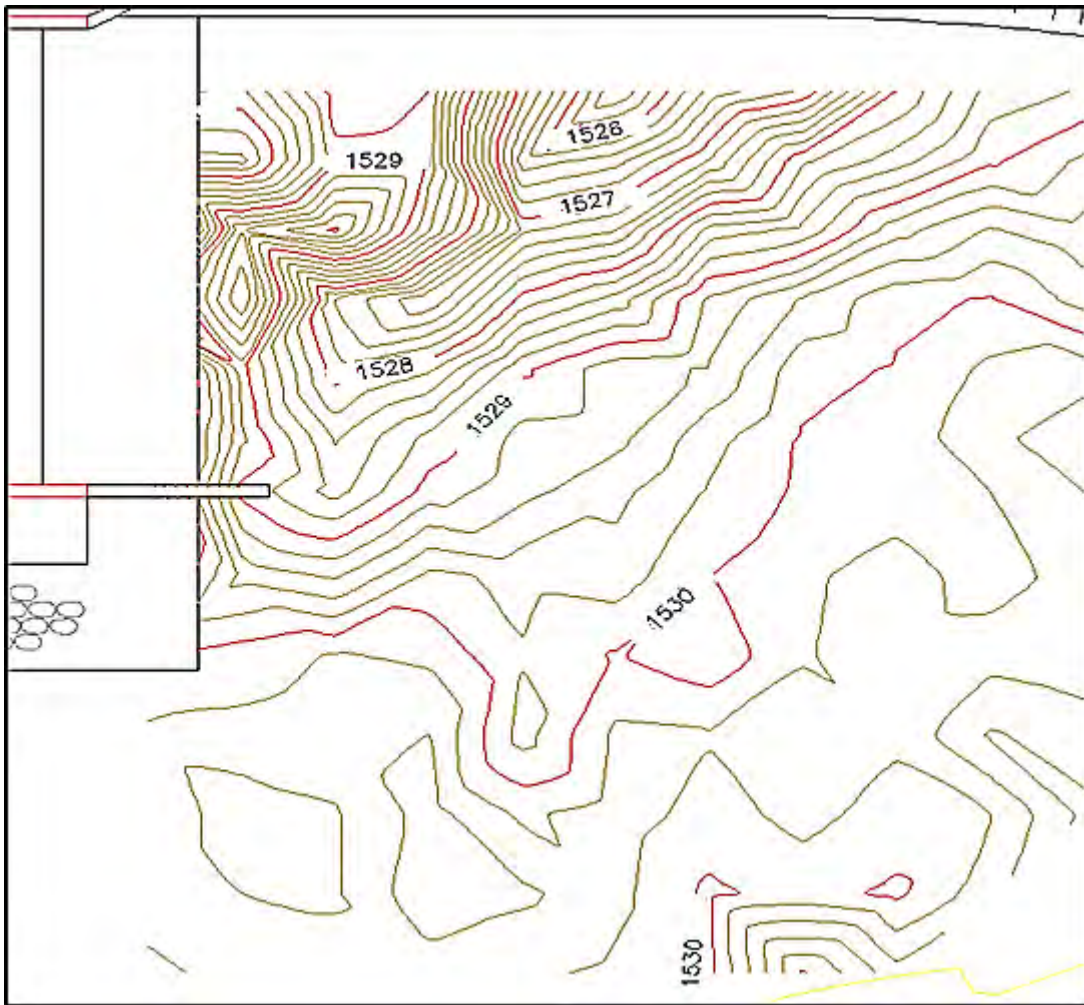


Figura 5.50. Curvas de nivel para erosión en ensayo $Q = 172.03 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 3.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.4.4 Ensayos para compuertas N° 1, 2 y 3 simultáneamente

5.4.4.1 Ensayo con caudal = 117 m³/s

Para lograr el nivel de operación deseado de 1537.85 m.s.n.m. se necesitó de un caudal de 117 m³/s y las compuertas N° 1, 2 y 3 con una abertura de 0.6 m. El nivel de agua en la sección de control aguas abajo fue de 1531.9 m.s.n.m.



Figura 5.51. Comportamiento del flujo para $Q = 117 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1, 2 y 3.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

A. Tirantes

Tabla 5.33. Tirantes de agua (m) para $Q = 117 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuertas 1, 2 y 3.

SECCIÓN	COMPUERTA 1			COMPUERTA 2			COMPUERTA 3		
	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
E1		4.95			4.95			4.95	
E2		4.96			4.96			4.96	
E3	4.97	4.97	4.96	4.97	4.97	4.96	4.97	4.97	4.96
E4	4.97	4.98	4.97	4.97	4.98	4.97	4.97	4.98	4.97
E7	0.924	0.658	0.85	0.758	0.708	0.676	0.612	0.462	0.59
E8	0.566	0.668	0.59	0.582	0.612	0.586	0.606	0.474	0.4
E9		0.618			0.48			0.45	
E10		1.164			0.516			0.578	
E11		1.164			0.56			0.486	

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

B. Velocidades

Tabla 5.34. Velocidades (m/s) para $Q = 117 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1, 2 y 3.

COMPUERTA 1				
SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	4.98	0.20H	1	1.48
		0.60H	2.99	0.7
		0.80H	3.98	0.75
E7	0.66	0.20H	0.13	
		0.60H	0.39	
		0.80H	0.53	
E8	0.67	0.20H	0.13	
		0.60H	0.4	
		0.80H	0.53	
E11	1.16	0.20H	0.23	
		0.60H	0.7	8.93
		0.80H	0.93	7.36
COMPUERTA 2				
SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	4.97	0.20H	0.99	1.19
		0.60H	2.98	0.85
		0.80H	3.98	0.78
E7	0.71	0.20H	0.14	
		0.60H	0.42	
		0.80H	0.57	
E8	0.61	0.20H	0.12	
		0.60H	0.37	
		0.80H	0.49	
E11	0.56	0.20H	0.11	
		0.60H	0.34	
		0.80H	0.45	
COMPUERTA 3				
SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	4.98	0.20H	1	1.24
		0.60H	2.99	0.82
		0.80H	3.98	0.64
E7	0.46	0.20H	0.09	
		0.60H	0.28	
		0.80H	0.37	
E8	0.47	0.20H	0.09	
		0.60H	0.28	
		0.80H	0.38	
E11	0.49	0.20H	0.1	
		0.60H	0.29	
		0.80H	0.39	

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

C. Erosión y topografía

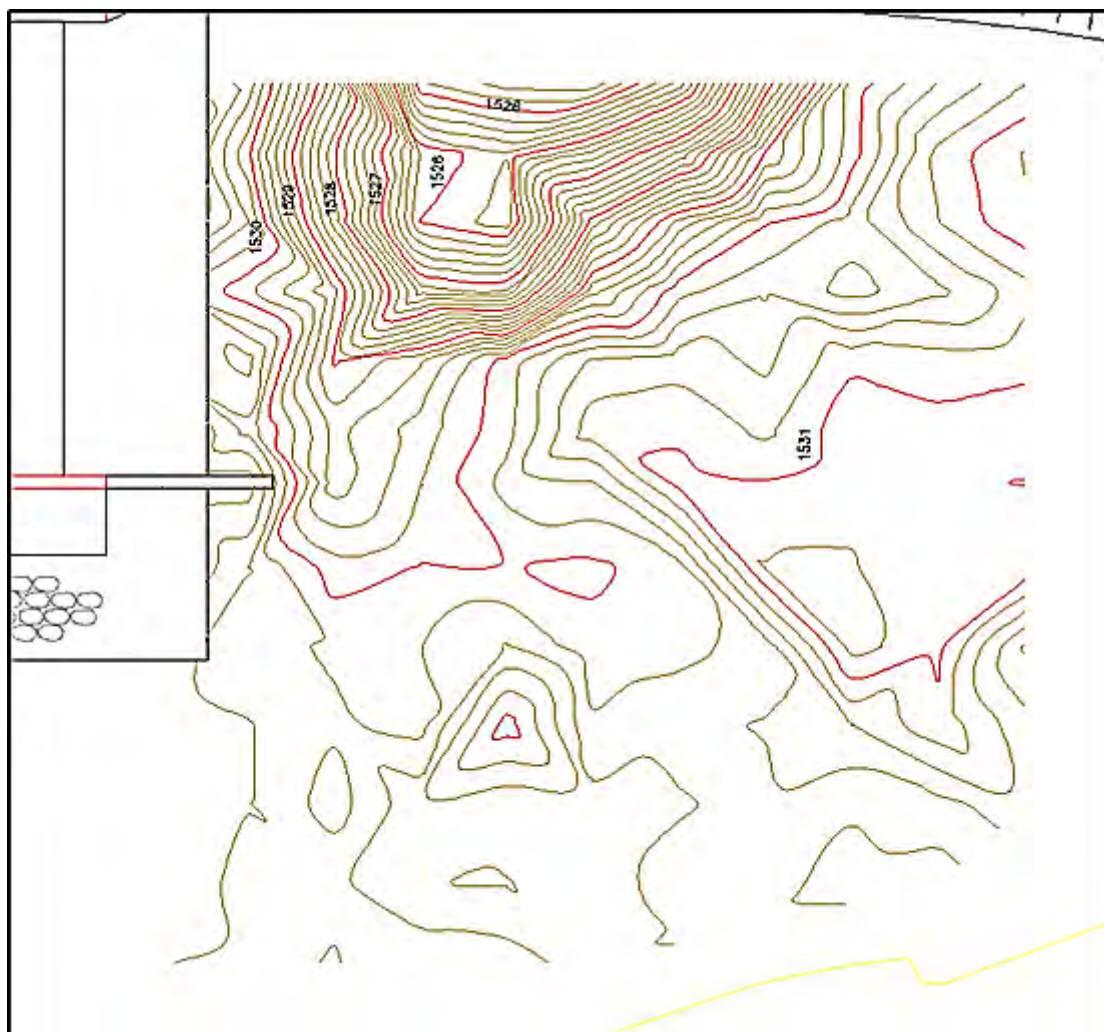


Figura 5.52. Curvas de nivel para erosión en ensayo $Q = 117 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1, 2 y 3.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.4.4.2 Ensayo con caudal = $308.5 \text{ m}^3/\text{s}$

Para lograr el nivel de operación deseado de 1537.85 m.s.n.m. se necesitó de un caudal de $308.5 \text{ m}^3/\text{s}$ y las compuertas N° 1, 2 y 3 con una abertura de 1.94 m. El nivel de agua en la sección de control aguas abajo fue de 1532.08 m.s.n.m.



Figura 5.53. Comportamiento del flujo para $Q = 308.5 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1, 2 y 3.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

A. Tirantes

Tabla 5.35. Tirantes de agua (m) para $Q = 308.5 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuertas 1, 2 y 3.

SECCIÓN	COMPUERTA 1			COMPUERTA 2			COMPUERTA 3		
	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
E1		4.95			4.95			4.95	
E2		4.96			4.96			4.96	
E3	4.97	4.97	4.96	4.97	4.97	4.96	4.97	4.97	4.96
E4	4.97	4.98	4.97	4.97	4.98	4.97	4.97	4.98	4.97
E7	1.408	1.158	1.268	1.412	1.328	1.246	1.402	1.168	0.984
E8	0.954	1.268	1.194	1.202	1.286	1.162	1.294	1.394	1.074
E9		1.098			1.066			1.206	
E10		0.87			0.926			1.194	
E11		0.566			0.728			1.118	

B. Velocidades

Tabla 5.36. Velocidades (m/s) para $Q = 308.5 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuertas 1, 2 y 3.

COMPUERTA 1				
SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	5.16	0.20H	1.03	3.20
		0.60H	3.09	2.09
		0.80H	4.13	1.46
E7	1.16	0.20H	0.23	
		0.60H	0.69	11.22
		0.80H	0.93	11.09
E8	1.27	0.20H	0.25	
		0.60H	0.79	10.97
		0.80H	1.01	10.90
E11	0.57	0.20H	0.11	
		0.60H	0.34	
		0.80H	0.45	
COMPUERTA 2				
SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	5.30	0.20H	1.06	3.15
		0.60H	3.18	2.06
		0.80H	4.24	1.76
E7	1.33	0.20H	0.27	
		0.60H	0.80	11.26
		0.80H	1.06	10.50
E8	1.29	0.20H	0.26	
		0.60H	0.77	11.04
		0.80H	1.03	11.16
E11	0.73	0.20H	0.15	
		0.60H	0.44	
		0.80H	0.5	
COMPUERTA 3				
SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	5.17	0.20H	1.03	3.31
		0.60H	3.10	2.03
		0.80H	4.14	1.20
E7	1.17	0.20H	0.23	
		0.60H	0.70	
		0.80H	0.93	11.20
E8	1.39	0.20H	0.28	
		0.60H	0.84	11.08
		0.80H	1.12	1.045
E11	1.12	0.20H	0.22	
		0.60H	0.67	10.54
		0.80H	0.89	10.55

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

C. Erosión y topografía

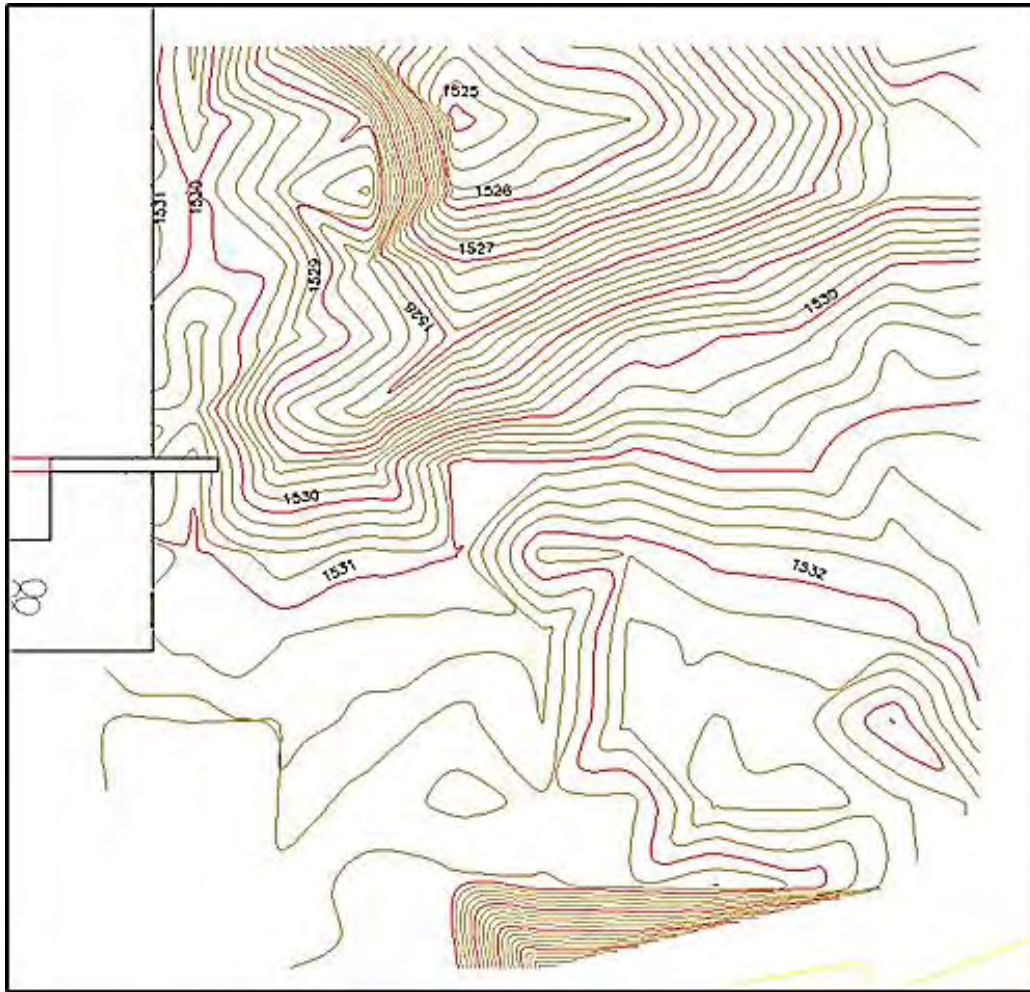


Figura 5.54 Curvas de nivel para erosión en ensayo $Q = 308.5 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1, 2 y 3.
Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.



Figura 5.55. Resultado de erosión para $Q = 308.5 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1, 2 y 3.
Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.4.4.3 Ensayo con caudal = 456.3 m³/s

Para lograr el nivel de operación deseado de 1537.85 m.s.n.m. se necesitó de un caudal de 456.3 m³/s y las compuertas N° 1, 2 y 3 con una abertura de 3.2 m. El nivel de agua en la sección de control aguas abajo fue de 1533.18 m.s.n.m.

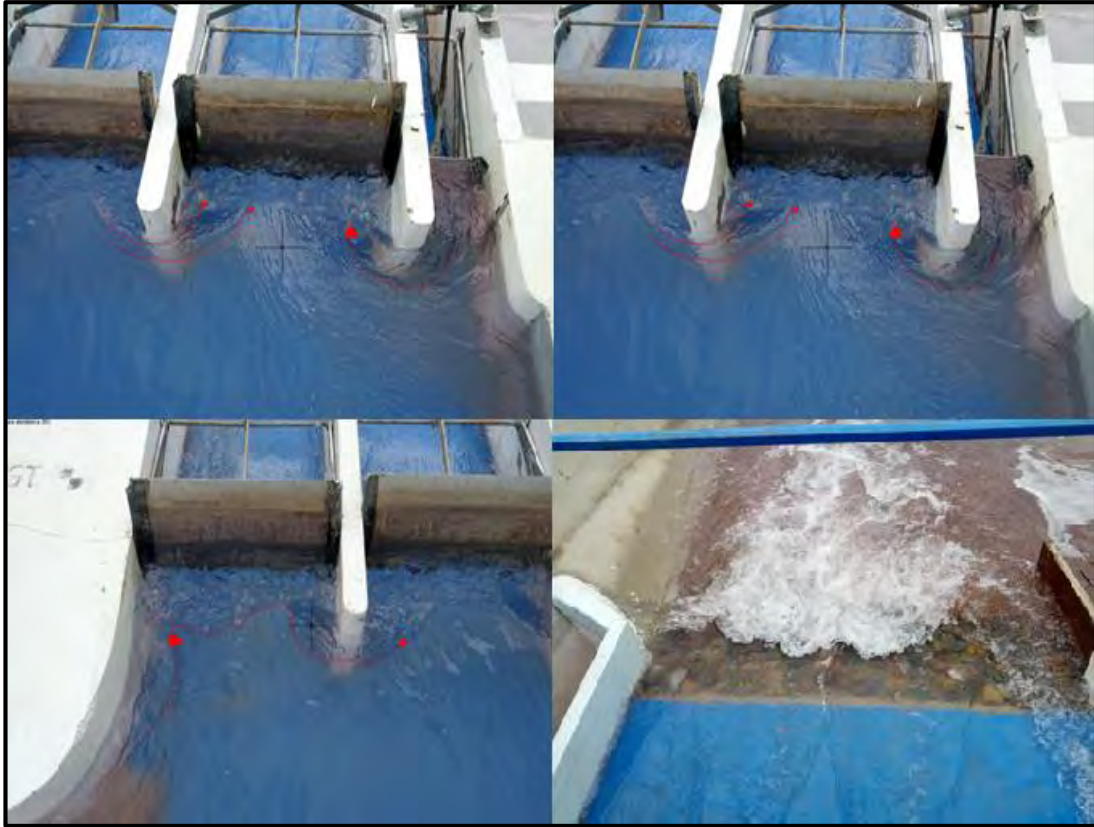


Figura 5.56. Comportamiento del flujo para $Q = 456.3 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1, 2 y 3.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

A. Tirantes

Tabla 5.37. Tirantes de agua (m) para $Q = 456.3 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuertas 1, 2 y 3.

SECCIÓN	COMPUERTA 1			COMPUERTA 2			COMPUERTA 3		
	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
E1		4.95			4.95			4.95	
E2		4.96			4.96			4.96	
E3	4.97	4.97	4.96	4.97	4.97	4.96	4.97	4.97	4.96
E4	4.97	4.98	4.97	4.97	4.98	4.97	4.97	4.98	4.97
E7	2.11	1.92	1.804	1.968	1.912	1.834	1.852	1.744	1.594
E8	1.602	1.988	1.842	1.82	1.784	1.712	1.74	1.81	1.692
E9		1.482			1.486			1.68	
E10		1.212			1.43			1.632	
E11		0.972			1.672			1.684	

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

B. Velocidades

Tabla 5.38. Velocidades para $Q = 456.3 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuertas 1, 2 y 3.

COMPUERTA 1				
SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	4.87	0.20H	0.97	4.35
		0.60H	2.92	3.97
		0.80H	3.90	3.68
E7	1.92	0.20H	0.38	
		0.60H	1.15	10.25
		0.80H	1.54	9.91
E8	1.99	0.20H	0.40	
		0.60H	1.19	9.99
		0.80H	1.59	10.03
E11	0.97	0.20H	0.19	
		0.60H	0.58	10.38
		0.80H	0.78	10.63
COMPUERTA 2				
SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	5.04	0.20H	1.01	4.07
		0.60H	3.03	3.47
		0.80H	4.04	3.19
E7	1.91	0.20H	0.38	
		0.60H	1.15	10.31
		0.80H	1.53	9.95
E8	1.78	0.20H	0.36	
		0.60H	1.07	10.27
		0.80H	1.43	10.17
E11	1.67	0.20H	0.33	
		0.60H	1.00	9.95
		0.80H	1.34	10.26
COMPUERTA 3				
SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	4.89	0.20H	0.98	4.32
		0.60H	2.94	3.76
		0.80H	3.91	3.02
E7	1.74	0.20H	0.35	
		0.60H	1.05	10.24
		0.80H	1.40	10.14
E8	1.81	0.20H	0.36	
		0.60H	1.09	10.27
		0.80H	1.45	10.01
E11	1.68	0.20H	0.34	
		0.60H	1.01	10.07
		0.80H	1.35	10.14

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

C. Erosión y topografía

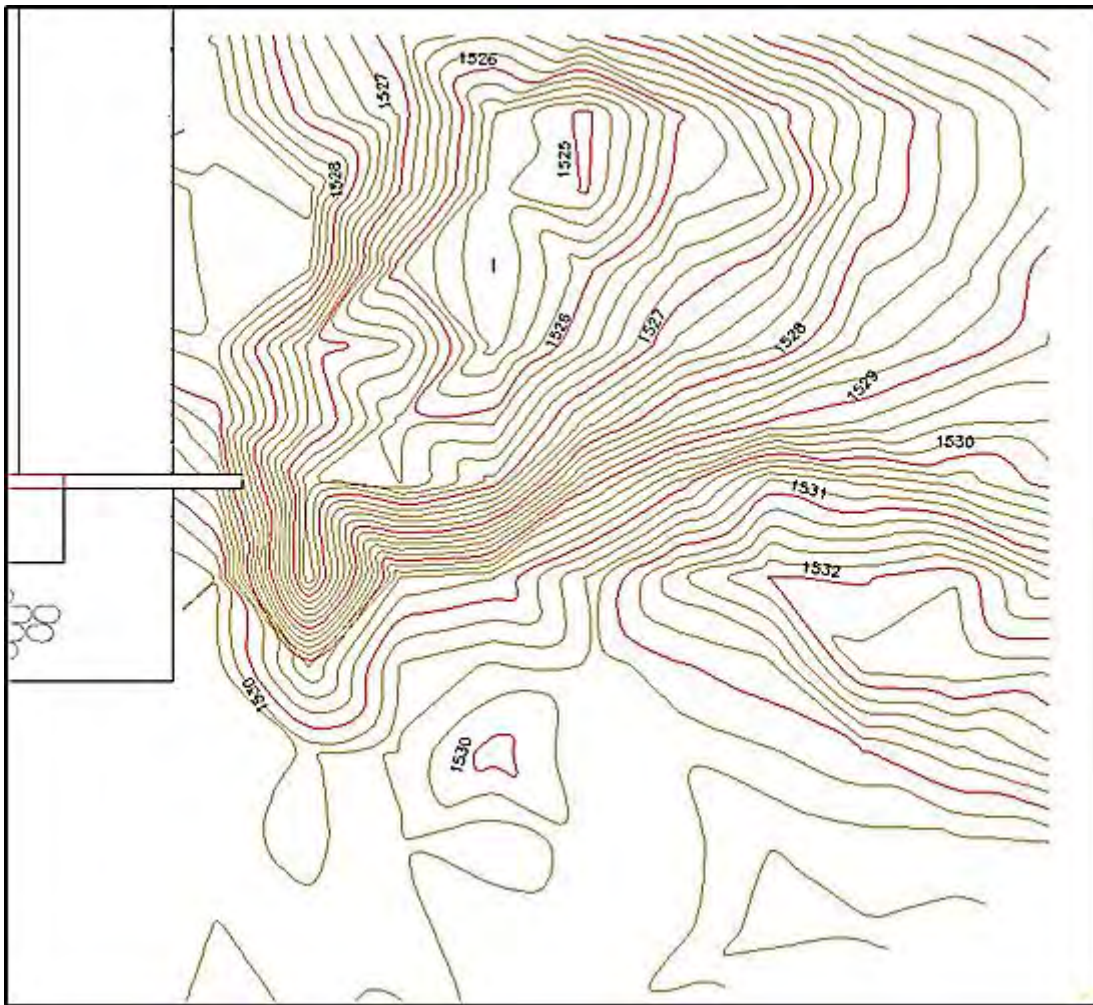


Figura 5.57. Curvas de nivel para erosión en ensayo $Q = 456.3 \text{ m}^3/\text{s}$. – Compuerta 1, 2 y 3.
Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.4.5 Ensayo para canal de limpia

5.4.5.1 Ensayo con caudal = 55 m³/s

Para lograr el nivel de operación deseado de 1537.85 m.s.n.m. se necesitó de un caudal de 55 m³/s y el canal de limpia totalmente abierto. El nivel de agua en la sección de control aguas abajo fue de 1531.5 m.s.n.m.



Figura 5.58. Comportamiento del flujo para Q = 55 m³/s. – Canal de Limpia.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

A. Tirantes

Tabla 5.39. Tirantes para Q = 55 m³/s. – Canal de limpia.

SECCIÓN	CANAL DE LIMPIA		
	MI	EJE	MD
E1		4.95	
E2		4.96	
E3	4.448	4.634	4.02
E4	2.962	3.462	3.874
E7	1.884	1.82	1.94
E8	1.856	1.896	1.648
E9		0.956	
E10		0.986	
E11		0.226	

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

B. Velocidades

Tabla 5.40. Velocidades para $Q = 55 \text{ m}^3/\text{s}$. – Canal de limpia.

CANAL DE LIMPIA				
SECCIÓN	H (m)	Posición	h (m)	Velocidad
E4	3.46	0.20H	0.69	5.68
		0.60H	2.08	5.66
		0.80H	2.77	5.68
E7	1.82	0.20H	0.36	
		0.60H	1.09	10.12
		0.80H	1.46	10.22
E8	1.90	0.20H	0.38	
		0.60H	1.14	10.51
		0.80H	1.52	10.60
E11	0.23	0.20H	0.05	
		0.60H	0.14	
		0.80H	0.18	

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

C. Erosión y topografía

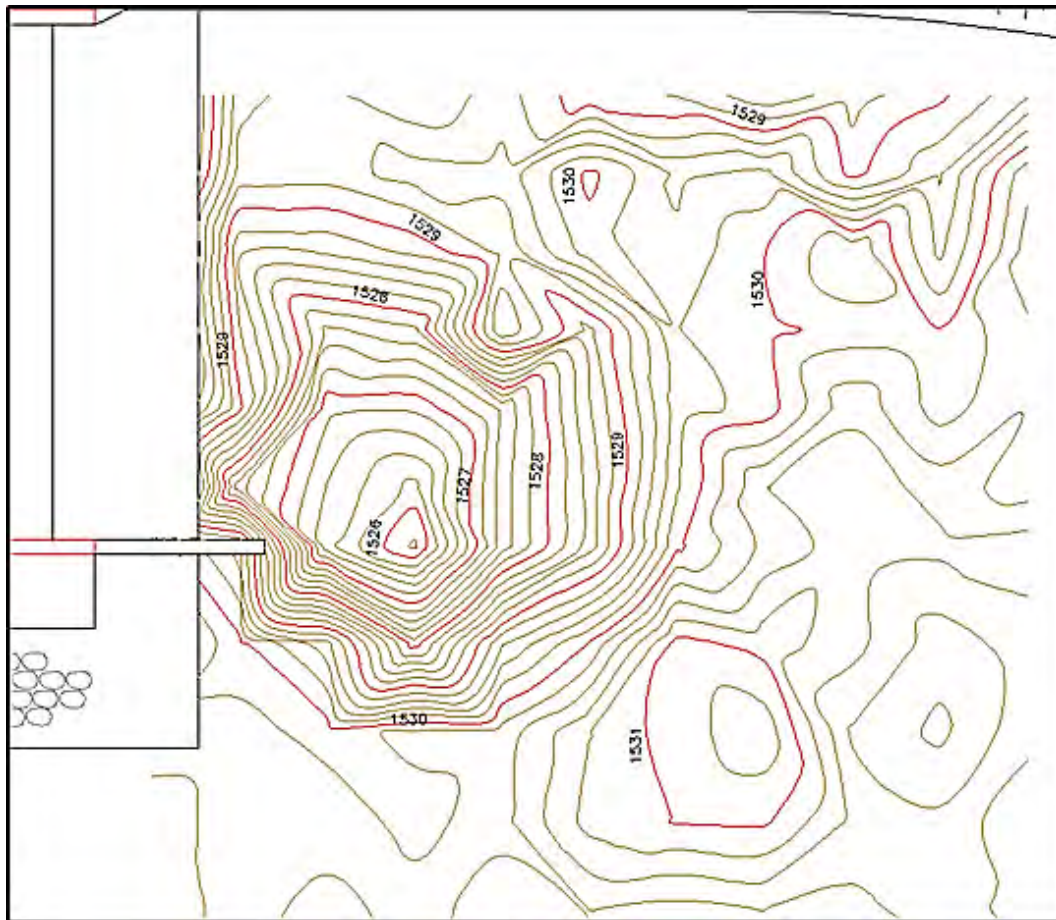


Figura 5.59. Curvas de nivel para erosión en ensayo $Q = 55 \text{ m}^3/\text{s}$. – Canal de limpia.

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura.

5.5 Análisis de resultados

5.5.1 Comparación de resultados entre el diseño original y el diseño definitivo

El diseño definitivo del modelo hidráulico no cuenta con uno de los estanques amortiguadores como los explicados en el apartado 2.4 por lo que se entiende que las velocidades sean muy similares a las registradas en el ensayo realizado con el diseño original.

Tabla 5.41. Cuadro comparativo de velocidades (m/s) para $Q = 456.3 \text{ m}^3/\text{s}$.

SECCIÓN	Diseño original			Diseño definitivo		
	Compuerta 1	Compuerta 2	Compuerta 3	Compuerta 1	Compuerta 2	Compuerta 3
E4	4.59	4.69	4.95	4.00	3.58	3.70
E7	9.51	10.20	10.00	10.08	10.13	10.19
E8	10.20	10.33	10.05	10.01	10.22	10.14
E11	10.18	10.53	10.18	10.51	10.11	10.11

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura. Elaboración propia.

La diferencia de los resultados se encuentra en el nivel de erosión encontrado en el lecho del río aguas abajo de la solera modificada la cual logró minimizarlos en gran magnitud.

Tabla 5.42. Cuadro comparativo de erosiones máximas (m) para $Q = 456.3 \text{ m}^3/\text{s}$.

SECCIÓN	Diseño original			Diseño definitivo		
	Compuerta 1	Compuerta 2	Compuerta 3	Compuerta 1	Compuerta 2	Compuerta 3
Erosión máxima	8.20	8.80	8.30	5.60	6.00	5.60

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura. Elaboración propia.

De esta manera se puede comprobar que si se logró disipar la energía a través del diseño definitivo y lograr que la erosión no afecte a las estructuras.

5.5.2 Comparación entre resultados teóricos esperados y resultados obtenidos en el modelo

Se calculó teóricamente el valor de la erosión máxima esperada para los caudales que fueron ensayados con el fin de diseñar correctamente la solera de protección. Para estos cálculos se aplicó la fórmula de Lacey:

$$D_s = 1.4859 * \left(\frac{q^2}{f} \right)^{1/3}$$

$$f = 1.75 * \sqrt{d_m}$$

Donde:

- D_s : Distancia entre fondo erosionado y el nivel de agua (m).
- q : Caudal unitario.
- d_m : Diámetro medio de las partículas (mm).

Estos valores teóricos obtenidos serán comparados en los siguientes apartados con los valores reales obtenidos en el modelo para los ensayos en los diversos caudales.

5.5.2.1 Ensayo para caudal = $117 \text{ m}^3/\text{s}$

Tabla 5.43. Cuadro comparativo de erosiones máximas (m) para $Q = 117 \text{ m}^3/\text{s}$.

SECCIÓN	Resultado teórico esperado			Resultado obtenido en el modelo		
	Compuerta 1	Compuerta 2	Compuerta 3	Compuerta 1	Compuerta 2	Compuerta 3
Erosión máxima	4.44	4.69	3.91	4.60	5.00	3.80

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura. Elaboración propia.

5.5.2.2 Ensayo para caudal = 308.5 m³/s

Tabla 5.44. Cuadro comparativo de erosiones máximas (m) para Q = 308.5 m³/s.

SECCIÓN	Resultado teórico esperado			Resultado obtenido en el modelo		
	Compuerta 1	Compuerta 2	Compuerta 3	Compuerta 1	Compuerta 2	Compuerta 3
Erosión máxima	4.86	4.97	3.9	5.40	5.60	4.00

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura. Elaboración propia.

5.5.2.3 Ensayo para caudal = 456.3 m³/s

Tabla 5.45. Cuadro comparativo de erosiones máximas (m) para Q = 456.3 m³/s.

SECCIÓN	Resultado teórico esperado			Resultado obtenido en el modelo		
	Compuerta 1	Compuerta 2	Compuerta 3	Compuerta 1	Compuerta 2	Compuerta 3
Erosión máxima	5.90	6.19	5.90	5.60	6.00	5.60

Fuente: Informe parcial N°3 – Modelo hidráulico de las obras de represamiento y captación del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del Alto Piura. Elaboración propia.

Los resultados que se esperaron gracias al cálculo teórico fueron muy parecidos a los obtenidos finalmente en los ensayos en el modelo.

Las erosiones máximas obtenidas van incrementando su magnitud conforme el caudal también aumenta, lo cual sería peligroso para nuestras estructuras, pero otra característica de la zona de erosión es que a partir de un incremento en el caudal de llegada, también incrementa la distancia entre la zona del fin de las estructuras y la zona donde ocurre la máxima erosión. En las Figuras 5.52, 5.54 y 5.57 se puede observar la zona crítica de erosión en las curvas de nivel de cota 1525 m.s.n.m. y como es de esperarse, esta zona va desplazándose aguas abajo por lo que a pesar de que la erosión aumente, las estructuras no se verán comprometidas.

Capítulo 6

Conclusiones

- Los valores encontrados de tirantes de agua y velocidades a lo largo de los distintos ensayos de la investigación fueron muy similares a los valores esperados. Esto se puede comprobar por las adecuadas dimensiones de las diversas estructuras dentro de la presa.
- Los valores de erosión para el diseño inicial del vertedero llegan cerca de los 7 m para caudales máximos, superando así la profundidad de la solera por lo que se decide rediseñarlo.
- La opción de una poza disipadora de aproximadamente 5 m de profundidad y 24 m de longitud, reduce en casi su totalidad las velocidades de la salida del vertedero, logrando así la disipación de energía adecuada. Ésta es considerada por el equipo de investigación como la mejor opción para el diseño de la presa, a pesar de no ser elegida por los diseñadores del proyecto.
- La alternativa elegida por el diseñador, denominada como diseño definitivo, consta de una plataforma horizontal en la cota 1531 m.s.n.m. de 35.5 m de largo y una solera de forma romboidal de 10 m de largo y 6 m de profundidad empleado en el modelo no logra disminuir las velocidades del agua, pero sí disminuye los valores de la erosión que se genera en el lecho del río gracias a la nueva distribución y mayor granulometría de la solera empleada.
- Con el diseño definitivo del vertedero se incrementan los niveles de erosión conforme el caudal aumenta, acercándose a los 6 m de profundidad en su punto más crítico para el caudal mayor. Este valor es similar a la profundidad del enrocado colocado, pero no afectará a las estructuras ya que las zonas erosionadas se encuentran alejadas de ellas y se alejan más con los incrementos de caudal.

- Los valores de erosión obtenidos en el modelo son muy similares a los valores teóricos esperados. Difieren entre ellos en un máximo de 10%.
- Se concluye que el diseño definitivo, cumplirá con las propiedades de disipación de energía requeridas para la seguridad de las estructuras, pero que no es la opción ideal que el equipo de investigación considera para el proyecto debido a que se puede lograr una mejor disipación con la implementación de una poza disipadora y disminuir tanto velocidades como erosiones, no sólo estas últimas como se da en este caso.

Bibliografía

- Biblioteca Virtual Universidad de Piura, archivo de usuario (nd) Recuperado de http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_123_183_81_1150.pdf.
- Consorcio Ingeniería Alto Piura (2012) Programa de Investigación del Modelo Hidráulico del Proyecto Alto Piura.
- Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2013) Informes parciales 1,2 y 3 del Modelo Físico del Proyecto Alto Piura.
- Planos e información general del proyecto.
- Peterka AJ (1984) Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators (8va) United States Department of the Interior: Bureau of reclamation
- Sitio Web del Proyecto Alto Piura – www.peihap.gob.pe.
- Dunkin WC et al. (1987) Design of Small Dams (3ra) United States Department of the Interior: Bureau of reclamation.
- Ven Te Chow (1994) Hidráulica de canales abiertos.

ANEXOS

ANEXO A

**Resultados de la calibración del
modelo hidráulico**

A.1 Caudal 308.4 m³/s

A.1.1 Niveles de agua

SECCIÓN	Niveles de agua (m.s.n.m.)			Tirante de agua (m)		
	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
7	1535.76	1535.40	1536.20	0.46	0.20	1.82
Eje	1532.18	1532.09	1532.34	1.84	1.87	2.30
27	1531.94	1532.08	1532.26	3.84	3.62	2.96

A.1.2 Velocidades

SECCIÓN	Velocidad (m/s)		
	MI	EJE	MD
7	0.00	0.00	5.99
Eje	0.44	5.58	1.44
27	3.10	0.55	0.62

A.2 Caudal 456.3 m³/s

A.2.1 Niveles de agua

SECCIÓN	Niveles de agua (m.s.n.m.)			Tirante de agua (m)		
	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
7	1536.22	1535.80	1536.66	0.92	0.60	2.28
Eje	1533.12	1533.27	1533.76	2.78	3.05	3.72
27	1533.20	1533.18	1533.18	5.10	4.72	3.88

A.2.2 Velocidades

SECCIÓN	Velocidad (m/s)		
	MI	EJE	MD
7	0.00	4.28	6.35
Eje	0.44	5.89	1.00
27	3.02	0.60	0.79

A.3 Caudal 527.1 m³/s

A.3.1 Niveles de agua

SECCIÓN	Niveles de agua (m.s.n.m.)			Tirante de agua (m)		
	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
7	1536.46	1536.60	1536.78	1.16	1.40	2.40
Eje	1533.58	1533.60	1533.84	3.24	3.38	3.80
27	1533.56	1533.64	1533.48	5.46	5.18	4.18

A.3.2 Velocidades

SECCIÓN	Velocidad (m/s)		
	MI	EJE	MD
7	0.00	5.86	6.66
Eje	0.46	5.84	1.18
27	3.12	0.98	0.74

A.4 Caudal 583.1 m³/s

A.4.1 Niveles de agua

SECCIÓN	Niveles de agua (m.s.n.m.)			Tirante de agua (m)		
	MI	EJE	MD	MI	EJE	MD
7	1536.50	1536.80	1537.00	1.20	1.60	2.62
Eje	1534.08	1534.00	1534.40	3.74	3.78	4.36
27	1533.90	1533.98	1533.88	5.80	5.52	4.58

A.4.2 Velocidades

SECCIÓN	Velocidad (m/s)		
	MI	EJE	MD
7	0.00	3.64	7.06
Eje	0.58	5.92	0.76
27	2.76	0.55	0.83

ANEXO B

Planos del proyecto