



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA Y ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN MÁXIMA EN CUENCO AMORTIGUADOR DEL PROYECTO CHAGLLA

Gustavo Carrasco-Aparicio

Piura, marzo de 2019

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

Carrasco, G. (2019). *Caracterización hidráulica y estimación de la erosión máxima en cuenco amortiguador del proyecto Chaglla* (Tesis para optar el título de Ingeniero Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una licencia

[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](#)

UNIVERSIDAD DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL



Caracterización hidráulica y estimación de la erosión máxima en cuenco amortiguador del
proyecto Chaglla

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Gustavo Alberto Carrasco Aparicio

Asesor: Dr. Ing. Jorge D. Reyes Salazar

Piura, Marzo 2019

*A mi familia, por su amor y apoyo constante.
A Jazmin, mi fiel compañera.
A Dios, por su infinita bondad.*

Prólogo

En el marco del Proyecto Central Hidroeléctrica Chaglla, la Constructora Norberto Odebrecht S.A. Sucursal Perú encargó al Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria (IHHS) de la Universidad de Piura la modelación física de la presa, la cual abarcó la evaluación de comportamiento hidráulico, verificación hidráulica, verificación de capacidad de purga y proceso de erosión aguas abajo de las estructuras.

El proyecto energético CH Chaglla está situado en el centro-este de Perú, en el departamento de Huánuco, y comprende una presa en el río Huallaga, un aliviadero de excedencias compuesto por tres túneles ubicados en el estribo izquierdo de la presa y una obra de toma –en concreto– empotrada en roca y ubicada próxima al vertedero, en la margen izquierda.

Al final de los túneles de vertedero se ha provisto una estructura terminal con salto de esquí como mecanismo de disipación de energía del caudal excedente. Parte de esta energía es disipada en el aire debido a la fricción y otra parte se disipa en el punto de impacto del chorro con el lecho aguas abajo, como resultado de la excavación de un gran agujero de erosión.

La mayoría de estudios acerca del proceso de erosión se realizan de manera experimental, debido a que los procesos físicos involucrados son relativamente complejos, y tienen como finalidad el desarrollo de ecuaciones empíricas que estimen –de manera cada vez más precisa– la máxima profundidad de erosión.

En este contexto, el presente estudio, sobre la caracterización hidráulica y la estimación de erosión máxima en cuenco amortiguador del proyecto Chaglla, pretende brindar a la academia datos de interés relacionados a la erosión medida en modelos, de modo que la precisión de las ecuaciones empíricas sea mejorada.

Este trabajo forma parte del grupo de investigaciones realizadas en torno a la modelación física del proyecto Chaglla, precedido por aquellas realizadas por Peña-Valdivia (2014) y Ramos-Cedano (2017) acerca del *Método de representación de la rugosidad de los túneles para el modelo físico de Chaglla* y el *Análisis de transporte de sedimentos en vertedero de excedencias del proyecto Chaglla*, respectivamente.

Resumen

La modelación física llevada a cabo por el IHHS comprendió un grupo de ensayos organizados en cinco series: (1) ensayos de calibración del modelo, (2) ensayos con lecho fijo, (3) ensayos con lecho móvil aguas abajo de la presa, (4) ensayos de verificación de la capacidad de purga y (5) ensayos de determinación de reglas de operación de las estructuras.

El marco de la presente investigación considera solo aquellos resultados obtenidos de los ensayos correspondientes a las series 2 y 3, teniendo como objetivo principal evaluar la eficiencia de las ecuaciones más utilizadas para estimar la erosión máxima en lecho no cohesivo debido al impacto de un chorro a la salida de un vertedero con salto de esquí.

En base al análisis de datos de erosión registrados en el modelo, se concluyó que la ecuación empírica propuesta por Chain, en 1973, es la más precisa para determinar la erosión máxima del proyecto. Asimismo, haciendo uso de técnicas de análisis dimensional y regresión lineal consistentes, se propuso una nueva ecuación para estimar la profundidad de erosión máxima, mejorando la estimación de la ecuación de Chain, inclusive.

Tabla de contenido

Introducción.....	1
Capítulo 1 Central Hidroeléctrica Chaglla	3
1.1. Características generales del proyecto.....	3
1.2. Información general.....	8
1.2.1. Características hidrológicas.....	8
1.2.2. Características sedimentológicas.....	8
1.2.3. Características de las estructuras.....	10
1.2.3.1. Obras de desvío.....	10
1.2.3.2. Obras de excedencias	11
1.2.3.3. Presa.....	12
1.2.3.4. Obra de toma.....	12
1.2.4. Características del modelo reducido	14
1.2.4.1. Área a modelar	14
1.2.4.2. Escala geométrica	14
1.2.4.3. Características generales del modelo	14
Capítulo 2 Descripción de los ensayos	17
2.1. Introducción.....	17
2.2. Descripción de los ensayos.....	17
2.2.1. Serie 1: Ensayos de calibración del modelo.....	17
2.2.2. Serie 2: Ensayos con lecho fijo	17
2.2.2.1. Serie 2A: Ensayos preliminares del aliviadero de excedencias, obra de toma y obra de desvío.....	17
2.2.2.2. Serie 2B: Ensayos de operación de las obras de desvío	21
2.2.2.3. Serie 2C: Ensayos de operación aislada del aliviadero de excedencias con aberturas parciales y simétricas de sus compuertas.....	22
2.2.2.4. Serie 2D: Ensayos de operación aislada del aliviadero de excedencias con aberturas totales de sus compuertas.....	22

2.2.2.5.	Serie 2E: Ensayos de operación aislada de cada uno de los aliviaderos con aberturas parciales y abertura total.....	23
2.2.3.	Serie 3: Ensayos con lecho móvil aguas abajo de la presa	24
2.2.4.	Serie 4: Ensayos de verificación de la capacidad de purga de sedimentos del aliviadero de excedencias y del ingreso de sedimentos por la toma	25
2.2.4.1.	Serie 4A: Ensayos de verificación de la capacidad de purga de sedimentos del aliviadero de demasías.....	25
2.2.4.2.	Serie 4B: Ensayos de verificación de la capacidad de purga de sedimentos del aliviadero de demasías y del ingreso de sedimentos por la toma.....	26
2.2.5.	Serie 5: Ensayos de determinación de reglas de operación de las estructuras..	26
Capítulo 3	Verificación hidráulica	27
3.1.	Modelación hidráulica.....	27
3.1.1.	Modelos hidráulicos.....	28
3.1.1.1.	Modelos físicos.....	28
3.1.1.2.	Modelos numéricos.....	28
3.1.2.	Semejanza hidráulica en modelos físicos	29
3.1.2.1.	Semejanza geométrica	29
3.1.2.2.	Semejanza cinemática.....	30
3.1.2.3.	Semejanza dinámica	31
3.1.3.	Análisis dimensional.....	32
3.1.3.1.	Modelos a semejanza de Froude.....	32
3.1.3.2.	Modelos a semejanza de Reynolds.....	33
3.1.3.3.	Modelos a semejanza de Weber	34
3.2.	Caracterización hidráulica en embalses	34
3.2.1.	Líneas de corriente y líneas de flujo	34
3.2.2.	Velocidades.....	35
3.2.2.1.	Distribución de velocidades en una sección de canal.....	35
3.2.2.1.	Medición de velocidades	36
3.2.3.	Teoría del chorro.....	37
3.2.3.1.	Vertedero Ogee como estructura de control	37
3.2.3.2.	Salto de esquí como estructura de disipación de energía	38
3.2.4.	Profundidad de erosión	40
3.2.4.1.	Estudios experimentales para el cálculo de la profundidad de erosión máxima (h_s) debido al impacto de un chorro a la salida de un vertedero en salto de esquí	40
3.2.4.2.	Análisis de eficiencia de las ecuaciones h_s	46

Capítulo 4 Caracterización de las condiciones generales de flujo del proyecto Chaglla	47
4.1. Introducción.....	47
4.2. Metodología de los ensayos.....	47
4.2.1. Condiciones de flujo.....	47
4.2.2. Presiones en los túneles de vertedero.....	47
4.2.2.1. Presiones en la entrada de los vertederos.....	48
4.2.2.2. Presiones en la salida de los vertederos.....	48
4.2.2.3. Presiones a lo largo del túnel.....	49
4.2.3. Niveles y velocidades.....	50
4.2.4. Caracterización del chorro a la salida de los túneles de vertedero.....	52
4.2.5. Descripción de vórtices.....	52
4.3. Serie 2A-2.....	53
4.3.1. Serie 2A-2, $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$	53
4.3.1.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$	53
4.3.1.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$	53
4.3.1.3. Análisis de resultados, Serie 2A-2, $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$	55
4.3.2. Serie 2A-2, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$	56
4.3.2.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$	56
4.3.2.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$	57
4.3.2.3. Análisis de resultados, Serie 2A-2, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$	59
4.3.3. Serie 2A-2, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$	62
4.3.3.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$	62
4.3.3.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$	62
4.3.3.3. Análisis de resultados, Serie 2A-2, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$	63
4.3.4. Serie 2A-2, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$	63
4.3.4.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$	63
4.3.4.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$	63
4.3.4.3. Análisis de resultados, Serie 2A-2, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$	63
4.3.5. Serie 2A-2, $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$	64
4.3.5.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$	64
4.3.5.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$	64
4.3.5.3. Análisis de resultados, Serie 2A-2, $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$	66
4.3.6. Serie 2A-2, $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$	69
4.3.6.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$	69
4.3.6.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$	69

4.3.6.3.	Análisis de resultados, Serie 2A-2, Q = 3621 m ³ /s	69
4.3.7.	Serie 2A-2, Q = 4000 m ³ /s	70
4.3.7.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, Q = 4000 m ³ /s	70
4.3.7.2.	Resultados del ensayo, Serie 2A-2, Q = 4000 m ³ /s	70
4.3.7.3.	Análisis de resultados, Serie 2A-2, Q = 4000 m ³ /s	70
4.3.8.	Serie 2A-2, Q = 4500 m ³ /s	70
4.3.8.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, Q = 4500 m ³ /s	70
4.3.8.2.	Resultados del ensayo, Serie 2A-2, Q = 4500 m ³ /s	71
4.3.8.3.	Análisis de resultados, Serie 2A-2, Q = 4500 m ³ /s	75
4.3.9.	Serie 2A-2, Q = 5000 m ³ /s	75
4.3.9.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, Q = 5000 m ³ /s	75
4.3.9.2.	Resultados del ensayo, Serie 2A-2, Q = 5000 m ³ /s	75
4.3.9.3.	Análisis de resultados, Serie 2A-2, Q = 5000 m ³ /s	76
4.3.10.	Serie 2A-2, Q = 5630 m ³ /s	76
4.3.10.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, Q = 5630 m ³ /s	76
4.3.10.2.	Resultados del ensayo, Serie 2A-2, Q = 5630 m ³ /s	76
4.3.10.3.	Análisis de resultados, Serie 2A-2, Q = 5630 m ³ /s	80
4.3.11.	Análisis de resultados de la Serie 2A-2	83
4.3.11.1.	Curva de descarga de las estructuras	83
4.3.11.2.	Velocidades	84
4.3.11.3.	Chorro	86
4.4.	Serie 2A-3	86
4.4.1.	Serie 2A-3, Q = 30.9 m ³ /s	86
4.4.1.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2A-3, Q = 30.9 m ³ /s	86
4.4.1.2.	Resultados del ensayo, Serie 2A-3, Q = 30.9 m ³ /s	86
4.4.1.3.	Análisis de resultados, Serie 2A-3, Q = 30.9 m ³ /s	88
4.4.2.	Serie 2A-3, Q = 154.2 m ³ /s	89
4.4.2.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2A-3, Q = 154.2 m ³ /s	89
4.4.2.2.	Resultados del ensayo, Serie 2A-3, Q = 154.2 m ³ /s	89
4.4.2.3.	Análisis de resultados, Serie 2A-3, Q = 154.2 m ³ /s	90
4.4.3.	Análisis de resultados de la Serie 2A-3	91
4.5.	Serie 2A-4	91
4.5.1.	Condiciones de los ensayos	91
4.5.2.	Resultados de los ensayos	91
4.5.3.	Análisis de resultados de la Serie 2A-4	92

4.6.	Serie 2C	92
4.6.1.	Condiciones de los ensayos.....	92
4.6.2.	Resultados de los ensayos	92
4.6.3.	Análisis de resultados de la Serie 2C	92
4.7.	Serie 2E	95
4.7.1.	Condiciones de los ensayos.....	95
4.7.2.	Resultados de los ensayos	95
4.7.3.	Análisis de resultados de la Serie 2E	95
4.7.3.1.	Curva de descarga de las estructuras	95
4.7.3.2.	Velocidades.....	99
4.7.3.3.	Chorro	99
	Capítulo 5 Erosión en poza disipadora	101
5.1.	Introducción.....	101
5.2.	Objetivo de la investigación	101
5.3.	Modificaciones en las estructuras.....	101
5.3.1.	Modificación de las gradas.....	101
5.3.2.	Sedimentos en poza disipadora	103
5.4.	Metodología de los ensayos.....	104
5.4.1.	Condiciones para cada ensayo.....	104
5.4.2.	Presiones.....	104
5.4.3.	Caracterización del flujo de descarga de los túneles.....	104
5.4.4.	Erosión de la poza disipadora.....	104
5.5.	Resultados de la Serie 3.....	105
5.5.1.	Serie 3, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$	105
5.5.1.1.	Condiciones del ensayo, Serie 3, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$	105
5.5.1.2.	Resultados del ensayo, Serie 3, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$	105
5.5.1.3.	Análisis de resultados, Serie 3, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$	109
5.5.2.	Serie 3, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$	109
5.5.2.1.	Condiciones del ensayo, Serie 3, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$	109
5.5.2.2.	Resultados del ensayo, Serie 3, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$	109
5.5.2.3.	Análisis de resultados, Serie 3, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$	113
5.5.3.	Serie 3, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$	113
5.5.3.1.	Condiciones del ensayo, Serie 3, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$	113
5.5.3.2.	Resultados del ensayo, Serie 3, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$	113
5.5.3.3.	Análisis de resultados, Serie 3, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$	117

5.5.4.	Serie 3, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$	117
5.5.4.1.	Condiciones del ensayo, Serie 3, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$	117
5.5.4.2.	Resultados del ensayo, Serie 3, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$	117
5.5.4.3.	Análisis de resultados, Serie 3, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$	121
5.5.5.	Serie 3, $Q = 2068 \text{ m}^3/\text{s}$	121
5.5.5.1.	Condiciones del ensayo, Serie 3, $Q = 2068 \text{ m}^3/\text{s}$	121
5.5.5.2.	Resultados del ensayo, Serie 3, $Q = 2068 \text{ m}^3/\text{s}$	121
5.5.5.3.	Análisis de resultados, Serie 3, $Q = 2068 \text{ m}^3/\text{s}$	122
5.5.6.	Serie 3, $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$	122
5.5.6.1.	Condiciones del ensayo, Serie 3, $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$	122
5.5.6.2.	Resultados del ensayo, Serie 3, $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$	122
5.5.6.3.	Análisis de resultados, Serie 3, $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$	123
5.5.7.	Serie 3, $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$	123
5.5.7.1.	Condiciones del ensayo, Serie 3, $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$	123
5.5.7.2.	Resultados del ensayo, Serie 3, $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$	123
5.5.7.3.	Análisis de resultados, Serie 3, $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$	123
5.6.	Análisis de resultados de la Serie 3	124
5.6.1.	Curva de descarga de las estructuras	124
5.6.2.	Predicción de la profundidad de erosión	124
5.6.3.	Comparación de resultados experimentales con aquellos calculados usando las ecuaciones de profundidad de erosión	126
5.6.4.	Propuesta de una nueva ecuación para estimar la profundidad de erosión máxima	128
	Conclusiones y recomendaciones.....	131
	Conclusiones	131
	Recomendaciones.....	132
	Referencias bibliográficas	133
	Anexos.....	135
A1.	Proceso constructivo del modelo.....	137
A1.1.	Proceso constructivo del cauce de aproximación	137
A1.2.	Proceso constructivo de los vertederos	139
A1.3.	Proceso constructivo aguas abajo	148
A2.	Resultados Serie 2A-2	150
A2.1.	Resultados del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$	150
A2.1.1.	Niveles y velocidades	150
A2.1.2.	Condiciones de flujo.....	152

A2.2.	Resultados del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$	154
A2.2.1.	Niveles y velocidades	154
A2.2.2.	Condiciones de flujo	156
A2.3.	Resultados del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$	158
A2.3.1.	Niveles y velocidades	158
A2.3.2.	Condiciones de flujo	160
A3.	Resultados de la Serie 2A-4	162
A3.1.	Serie 2A-4, $Q = 354 \text{ m}^3/\text{s}$	162
A3.1.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2A-4, $Q = 354 \text{ m}^3/\text{s}$	162
A3.1.2.	Resultados del ensayo, Serie 2A-4, $Q = 354 \text{ m}^3/\text{s}$	162
A3.2.	Serie 2A-4, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$	165
A3.2.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2A-4, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$	165
A3.2.2.	Resultados del ensayo, Serie 2A-4, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$	165
A3.3.	Serie 2A-4, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$	168
A3.3.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2A-4, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$	168
A3.3.2.	Resultados del ensayo, Serie 2A-4, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$	168
A3.4.	Serie 2A-4, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$	171
A3.4.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2A-4, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$	171
A3.4.2.	Resultados del ensayo, Serie 2A-4, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$	171
A4.	Resultados Serie 2C.....	174
A4.1.	Serie 2C, abertura de compuertas 0.25 m.....	174
A4.1.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de 0.25 m.....	174
A4.1.2.	Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de 0.25 m	174
A4.2.	Serie 2C, abertura de compuertas 0.50 m.....	177
A4.2.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de 0.50 m.....	177
A4.2.2.	Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de 0.50 m	177
A4.3.	Serie 2C, abertura de compuertas 1 m.....	180
A4.3.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 1 m	180
A4.3.2.	Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 1 m.....	180
A4.4.	Serie 2C, abertura de compuertas 2 m.....	183
A4.4.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 2 m	183
A4.4.2.	Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 2 m.....	183
A4.5.	Serie 2C, abertura de compuertas 4 m.....	186
A4.5.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 4 m	186
A4.5.2.	Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 4 m.....	186

A4.6.	Serie 2C, abertura de compuertas 6 m	189
A4.6.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 6 m.....	189
A4.6.2.	Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 6 m	189
A4.7.	Serie 2C, abertura de compuertas 8 m	192
A4.7.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 8 m.....	192
A4.7.2.	Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 8 m	192
A4.8.	Serie 2C, abertura de compuertas 9 m	195
A4.8.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 9 m.....	195
A4.8.2.	Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 9 m	195
A4.9.	Serie 2C, abertura de compuertas 10 m	198
A4.9.1.	Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 10 m.....	198
A4.9.2.	Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 10 m	198
A5.	Resultados de la Serie 2E	201
A5.1.	Aberturas parciales.....	201
A5.1.1.	Serie 2E, abertura de compuerta 0.25 m.....	201
A5.1.2.	Serie 2E, abertura de compuerta 0.50 m.....	207
A5.1.3.	Serie 2E, abertura de compuerta 1 m.....	213
A5.1.4.	Serie 2E, abertura de compuerta 2 m.....	219
A5.1.5.	Serie 2E, abertura de compuerta 4 m.....	225
A5.1.6.	Serie 2E, abertura de compuerta 6 m.....	231
A5.1.7.	Serie 2E, abertura de compuerta 8 m.....	237
A5.1.8.	Serie 2E, abertura de compuerta 9 m.....	243
A5.1.9.	Serie 2E, abertura de compuerta 10 m.....	249
A5.2.	Aberturas totales	255
A5.2.1.	Serie 2E, abertura aislada total de compuerta, $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$	255
A5.2.2.	Serie 2E, abertura aislada total de compuerta, $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$	258
A5.2.3.	Serie 2E, abertura aislada total de compuerta, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$	261
A5.2.4.	Serie 2E, abertura aislada total de compuerta, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$	264
A5.2.5.	Serie 2E, abertura aislada total de compuerta, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$	267
A5.2.6.	Serie 2E, abertura aislada total de compuerta, $Q = 1595 \text{ m}^3/\text{s}$	270
A5.2.7.	Serie 2E, abertura aislada total de compuerta, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$	273
A5.2.8.	Serie 2E, abertura aislada total de compuerta, $Q = 2068 \text{ m}^3/\text{s}$	276

Introducción

En ingeniería, una presa tiene por objetivo embalsar el agua de un cauce fluvial y así elevar su nivel con la finalidad de derivarla para su aprovechamiento en campos de cultivo, para el control de avenidas o, entre otras razones, para la producción de energía eléctrica a través de una central hidroeléctrica. Habitualmente, una presa es provista de estructuras de control para liberar el caudal excedente a su capacidad de embalse. El vertedero Ogee es una de las estructuras más utilizadas como estructura de control. Por otro lado, el salto de esquí es la única estructura terminal que se utiliza para disipar la energía de caudales excedentes con velocidades superiores a 20 m/s. La estimación de la erosión debido al impacto del flujo excedente es determinante en el diseño de una presa, debido al daño que esta puede generar al pie de las estructuras.

La presente tesis tiene como objetivo estimar la máxima profundidad de erosión en el cuenco amortiguador del proyecto Chaglla, en base a los estudios realizados y resultados obtenidos en un modelo físico a escala 1:50.

En el primer capítulo se presenta un resumen de las especificaciones técnicas del proyecto Central Hidroeléctrica Chaglla –desarrolladas por Intertechne–, las cuales incluyen las características de las estructuras, hidrología y sedimentos, así como las características del modelo físico.

En el segundo capítulo se describen detalladamente las condiciones para cada serie de ensayos, tales como: caudal, abertura y nivel de embalse. Asimismo, se hace referencia a aquellos datos que deben ser registrados: líneas de flujo, niveles, velocidades, etc.

En el tercer capítulo se hace una revisión de los principales conceptos teóricos asociados a la verificación y caracterización hidráulica en modelos físicos, haciendo especial énfasis en el fenómeno de erosión producido aguas abajo de una estructura hidráulica.

En el cuarto capítulo se verificaron las condiciones generales de flujo y se construyeron las curvas de descarga correspondientes, con la finalidad de garantizar la consistencia del modelo.

Finalmente, en el quinto capítulo se analizaron los datos de erosión experimental obtenidos en el modelo y se propone una ecuación para estimar la profundidad de erosión máxima del proyecto.

Capítulo 1

Central Hidroeléctrica Chaglla

La información descrita en el presente capítulo está basada en las especificaciones técnicas referidas a los estudios hidráulicos en modelo reducido del proyecto Central Hidroeléctrica Chaglla. Dichas especificaciones fueron desarrolladas por la consultora Intertechne y enviadas al Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria (IHHS), laboratorio encargado de la modelación física.

1.1. Características generales del proyecto

El proyecto energético CH Chaglla está situado en el centro-este de Perú, en el departamento de Huánuco. La presa está ubicada en las coordenadas UTM W 408 440 y S 8 928 080 y la casa de máquinas en W 402 721 y S 8 938 794 (ver Figura 1).

Este proyecto comprende una presa en el Río Huallaga, ubicada a 1.8 km aguas arriba de la desembocadura de la quebrada Lluto, con un túnel de aducción de aproximadamente 15 km de largo, con chimenea de equilibrio, y una casa de máquinas externa a 2.6 km aguas abajo de la desembocadura de la quebrada Chimao (ver Figuras 2, 3, 4 y 5).

La presa proyectada es de enrocamiento con cara de concreto de más de 200 m de altura y 273 m de longitud de cresta, en una porción del valle bastante encañonado. La restitución de las avenidas será hecha por el vertedero de excedencias compuesto por tres túneles ubicados en la margen izquierda diseñados para descargar la avenida máxima probable (CMP), con pico de 6527 m³/s, considerando la laminación en el embalse desde la elevación 1196 m.s.n.m. (NAMO) hasta los 1202.23 m.s.n.m.; para tales consideraciones el caudal máximo efluente a través del vertedero alcanza el valor de 5630 m³/s aproximadamente. Los túneles presentan una longitud media de 750 m, sin considerar sus estructuras de entrada y salida, ni sus respectivas transiciones a las mismas. Los túneles no serán revestidos y presentan una sección transversal compuesta, con altura y ancho aproximados de 14.50 y 13 m, respectivamente. El control de los caudales es hecho por compuertas segmento de fondo ubicadas en la salida de los túneles. Las compuertas presentan el umbral en la elevación 1152.50 m.s.n.m. y poseen 11 m de ancho y 11 m de altura. En la entrada de los túneles se dispone de estructuras para la instalación de una compuerta ataguía para mantenimiento e inspección.

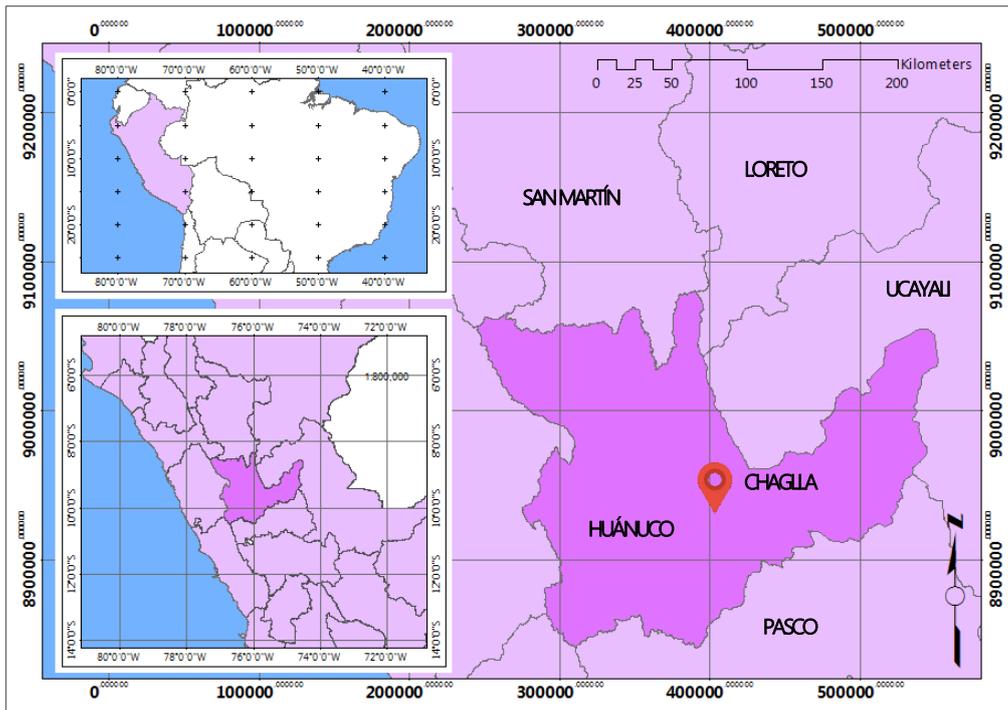


Figura 1. Mapa de ubicación del proyecto Chaglla

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Vista aguas abajo del embalse – Proyecto Chaglla

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Vista horizontal de la zona –encañonada– del proyecto Chaglla

Fuente: Elaboración propia.

La toma de agua está ubicada cerca del vertedero; por lo tanto, el canal de aducción es el mismo que el de aproximación al vertedero. La causa de la proximidad de las estructuras es la necesidad de reducción de ingreso de sedimentos en el circuito de generación. La toma de agua será integrada al túnel de aducción, a ser construido con sección herradura con diámetro de 8 m, altura de 7.6 m y longitud de 15.329 km; el túnel está dividido en tramos con diferentes declividades que varían de 0.5 y 5 %. A lo largo de él serán excavadas tres ventanas de acceso. Después de la quebrada Chimao estará ubicada una chimenea de equilibrio (Figura 4) con 373 m de altura hasta el piso del túnel, con salida por un túnel de acceso que será usado durante la operación.

La casa de máquinas será implantada a cielo abierto, con 2 unidades generadoras accionadas por turbinas del tipo Francis con una potencia instalada de 450 MW. Además de la casa de máquinas principal será construida una pequeña central hidroeléctrica (PCH) al pie de la presa, en su margen izquierda, aprovechándose el caudal ecológico. La aducción será por una toma de agua, empotrada al lado de la entrada del vertedero, y la conducción de agua será a través de un túnel con 3 m de ancho y 4 m de altura, seguida de una tubería de 1.2 m de diámetro ubicada en la ladera. La PCH alojará una unidad generadora del tipo Francis.

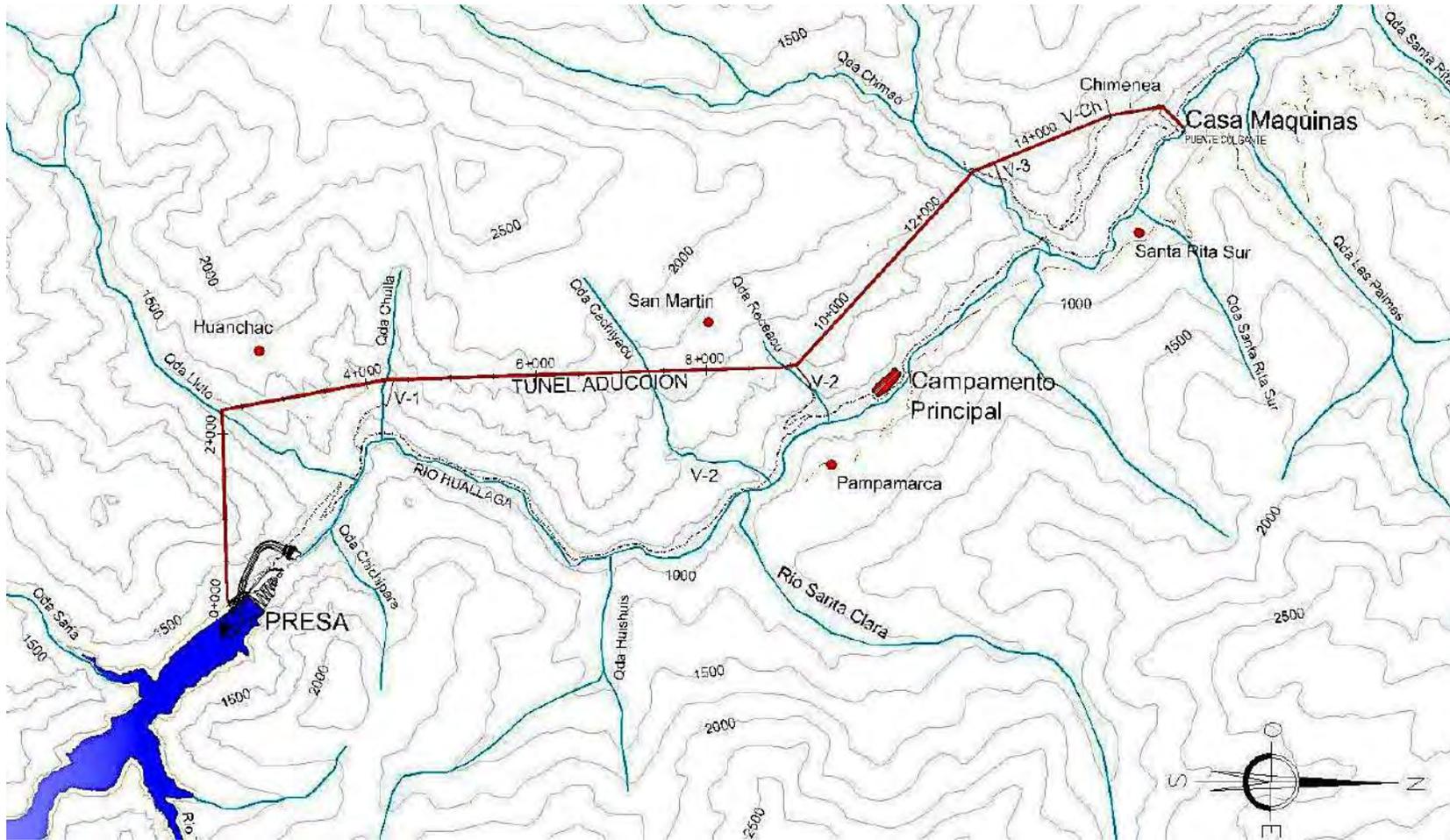


Figura 4. Planta general del proyecto Central Hidroeléctrica Chaglla

Fuente: Intertechne (2012)

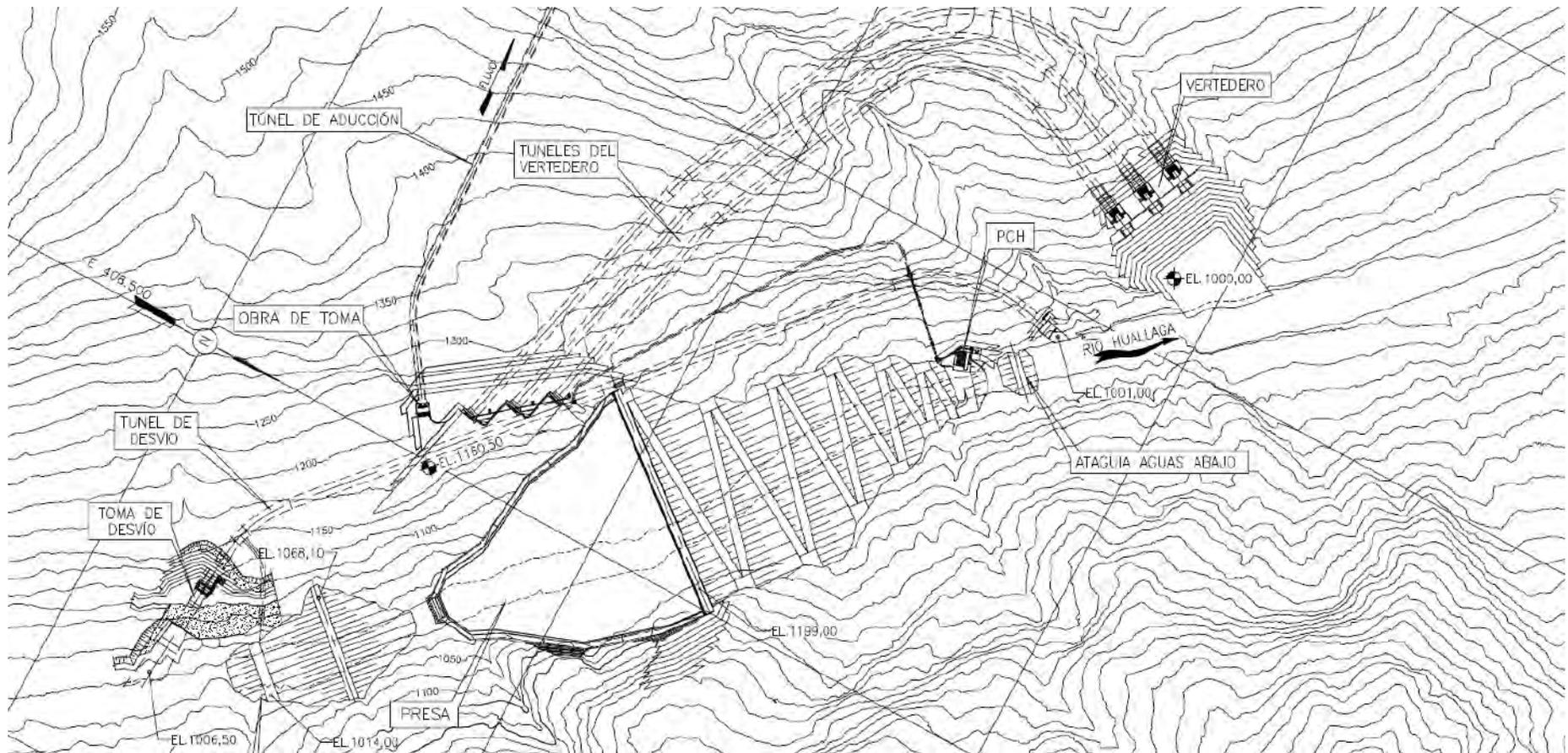


Figura 5. Características generales del proyecto

Fuente: Intertechne (2012)

1.2. Información general

1.2.1. Características hidrológicas

En la Tabla 1 se presentan los valores de los caudales de avenidas, en la zona del eje de presa proyectado.

TR (años)	Caudal (m ³ /s)
2	641
5	1023
10	1276
15	1418
25	1595
50	1832
100	2068
200	2302
500	2611
1000	2845
10000	3621

Fuente: Intertechne (2012)

Asimismo, en la Tabla 2 se presentan los valores de las duraciones de caudales medios mensuales, en la zona del eje de presa proyectado.

1.2.2. Características sedimentológicas

En la Figura 6, se muestra la curva granulométrica representativa del material de fondo del prototipo que deberá ser representada y reproducida en el modelo.

Con referencia al material en suspensión se deberá tener en cuenta la siguiente composición granulométrica:

- $D > 0.62$ mm: 5% (arena gruesa)
- 0.062 mm $< D < 0.62$ mm: 42% (arena fina)
- 0.004 mm $< D < 0.062$ mm: 31% (limo)
- 0.004 mm $> D$: 2% (arcilla)

Tabla 2.

Duración de caudales medios mensuales

Duración	Caudal (m³/s)
5%	354.1
10%	295.8
15%	265.7
20%	242.2
25%	217.8
30%	201.1
35%	174.9
40%	153.5
45%	132.4
50%	119.0
55%	101.8
60%	85.7
65%	71.9
70%	61.3
75%	52.5
80%	46.7
85%	42.8
90%	38.9
95%	33.6

Fuente: Intertechne (2012)

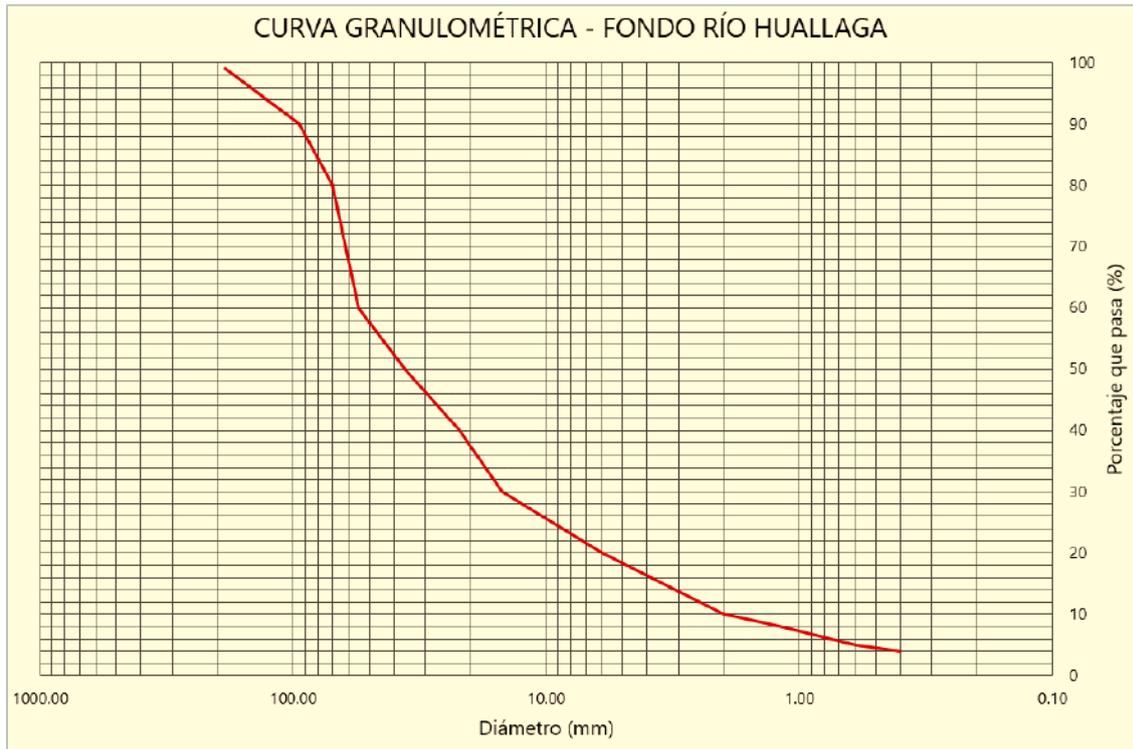


Figura 6.

Curva granulométrica de fondo – Río Huallaga. Fuente: Intertechne.

Fuente: Intertechne (2012)

1.2.3. Características de las estructuras

1.2.3.1. Obras de desvío

El esquema de desvío ha sido dimensionado para un caudal de 1832 m³/s, correspondiente a una avenida con 50 años de recurrencia.

Para el desvío del río Huallaga será construido un túnel ubicado en la margen izquierda que tendrá una longitud aproximada de 1126 m, con los pisos de los portales de entrada y salida ubicada en las elevaciones 1004.00 m.s.n.m. y 1000.00 m.s.n.m., respectivamente. El túnel presenta una sección arco-rectángulo con 12.50 m de ancho y 12.50 m de altura.

Para posibilitar el cierre del túnel después de la construcción de la presa, se ha diseñado una estructura de control en una posición intermedia del túnel donde se instalarán las compuertas de cierre que serán manejadas a partir de una plataforma ubicada en la elevación 1060.00 m.s.n.m. En la estructura de control están previstas dos aberturas –con dos ranuras cada una– para la instalación de las compuertas. Se prevé el cierre con dos compuertas deslizantes y una compuerta con ruedas.

Agua arriba del portal de entrada del túnel está dispuesto el canal de entrada con una longitud aproximada de 58 m, con elevaciones variando entre 1006.50 y 1004.00 m.s.n.m. El canal de salida del túnel de desvío tiene un trazado horizontal –a 1000.00 m.s.n.m. – y 15 m de ancho.

El túnel de desvío ha sido diseñado para tener capacidad de descargar el caudal de $1832 \text{ m}^3/\text{s}$, con el nivel de agua aguas arriba de la presa en la elevación 1066.50 m.s.n.m. Así, la cota de la corona de la ataguía aguas arriba queda en la elevación 1068 m.s.n.m. Considerándose que el nivel natural del río Huallaga aguas abajo de la presa para el caudal de $1832 \text{ m}^3/\text{s}$ se encuentra en la elevación 1008.50 m.s.n.m. , la cota de cresta de la ataguía agua abajo se ha definido en la elevación 1009.50 m.s.n.m.

La ataguía aguas arriba tendrá un desarrollo de cerca de 140 m y altura máxima de 64 m , aproximadamente, a partir del terreno natural. La ataguía aguas abajo tendrá un desarrollo de 50 m y una altura aproximada de 8 m .

En términos hidráulicos la curva de descarga del túnel de desvío fue calculada a través de la consideración de un coeficiente n de Manning igual a $0.03 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ para las paredes no revestidas del túnel. Además, se consideró una pérdida de carga en la entrada del túnel equivalente al 50% de la altura de velocidad del flujo en esta sección. La pérdida de carga en las curvas del túnel fue estimada equivalente a 25% de la altura de velocidad del flujo.

Para el caudal de diseño la velocidad en el túnel de desvío es de aproximadamente 13.1 m/s , mientras que en la sección de las compuertas la velocidad es del orden de 18 m/s .

1.2.3.2. Obras de excedencias

La descarga de las avenidas se hará por un aliviadero de excedencias compuesto por tres túneles ubicados en el estribo izquierdo. El aliviadero fue diseñado para descargar un caudal máximo de $5630 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde al caudal máximo efluente, del paso de la avenida máxima probable (CMP) a través del embalse, considerando el amortecimiento de la misma entre las elevaciones 1196 y 1202.23 m.s.n.m. , aproximadamente.

Los túneles del aliviadero presentan longitudes aproximadas de 647.87 m , 749.94 m y 852.02 m , respectivamente, lo que resulta en una longitud promedio de 750 m . Los túneles presentan sección compuesta de 14.5 m de altura y 13 m de ancho, aproximadamente, siendo revestidos con concreto lanzado donde la calidad de la roca requiera este tratamiento.

El control del flujo se hace por compuertas segmento de fondo ubicadas al final de la estructura. Las compuertas radiales presentan 11 m de ancho y 11 m de altura con umbral en la elevación 1152.50 m.s.n.m. Para el mantenimiento de las compuertas e inspecciones de los túneles se presentan en la entrada de las mismas estructuras de cierre donde se instalarán compuertas ataguía. Las compuertas ataguía tienen 12 m de ancho y 15 m de altura con un umbral en la elevación de 1061.00 m.s.n.m.

Aguas abajo de la estructura de control, a la salida de los túneles, la conducción de los caudales vertidos es hecha por un tramo corto de rápida con longitud aproximada de 26 m con una cubeta deflectora con radio de 25 m y ángulo de inclinación de 15° .

En términos hidráulicos la capacidad de descarga del aliviadero fue obtenida teóricamente a través de los cálculos de pérdida de carga a lo largo de los túneles. En este cálculo se consideró un coeficiente de Strickler de 35 y se consideraron coeficientes de pérdida de carga localizada en la entrada, transición de salida y en las curvas de 0.25, 0.02 y 0.10, respectivamente. Adicionalmente, se consideró para la estructura de control –en la salida del túnel– un coeficiente de descarga de orificio de 0.85. Se considera que este coeficiente es conservador debido a que las condiciones de aproximación de la estructura de las compuertas radiales son bastante favorables.

El umbral de las compuertas segmento en la salida del túnel se ha establecido en la elevación 1152.50 m.s.n.m., que conlleva a velocidades altas del flujo aguas abajo de las compuertas.

Aguas abajo de la cubeta hay una excavación con fondo en la elevación 1000.00 m.s.n.m. Esta excavación tiene la finalidad de que caudales descargados frecuentemente no impacten directamente en el macizo rocoso aguas abajo.

1.2.3.3. Presa

La presa es de enrocado con cara de concreto, posee altura máxima aproximada de 200 m y una longitud de cresta de 273 m, la cual está ubicada en la elevación 1202 m.s.n.m., complementada por un parapeto de concreto con 1 m de altura. Ver figura 7.

El talud aguas arriba posee una inclinación de 1V:1.40H y los taludes aguas abajo poseen inclinaciones de 1V:1.30H y 1V:1.25H, entre las bermas de acceso de 10 m de ancho. La cresta de la presa tiene 11.20 m de ancho.

1.2.3.4. Obra de toma

La obra de toma será una estructura en concreto, empotrada en la roca y ubicada próxima al vertedero, en la margen izquierda. Su fundación será sobre roca en la elevación 1180 m.s.n.m. y la estructura se extiende hasta el piso de operación en la elevación 1199 m.s.n.m. La estructura tendrá un único emboque con dos aberturas conectadas con el túnel de aducción.

En la estructura de toma serán instaladas dos rejas metálicas de protección, dos compuertas planas de dos elementos con ruedas cada una y un puente grúa para la operación y mantenimiento de los equipamientos.

Cada una de las rejas será del tipo móvil y tendrá 12.32 m de alto –medidos en el plano de la reja– por 5.00 m de ancho, y su solera está ubicada en la elevación 1181.50 m.s.n.m.

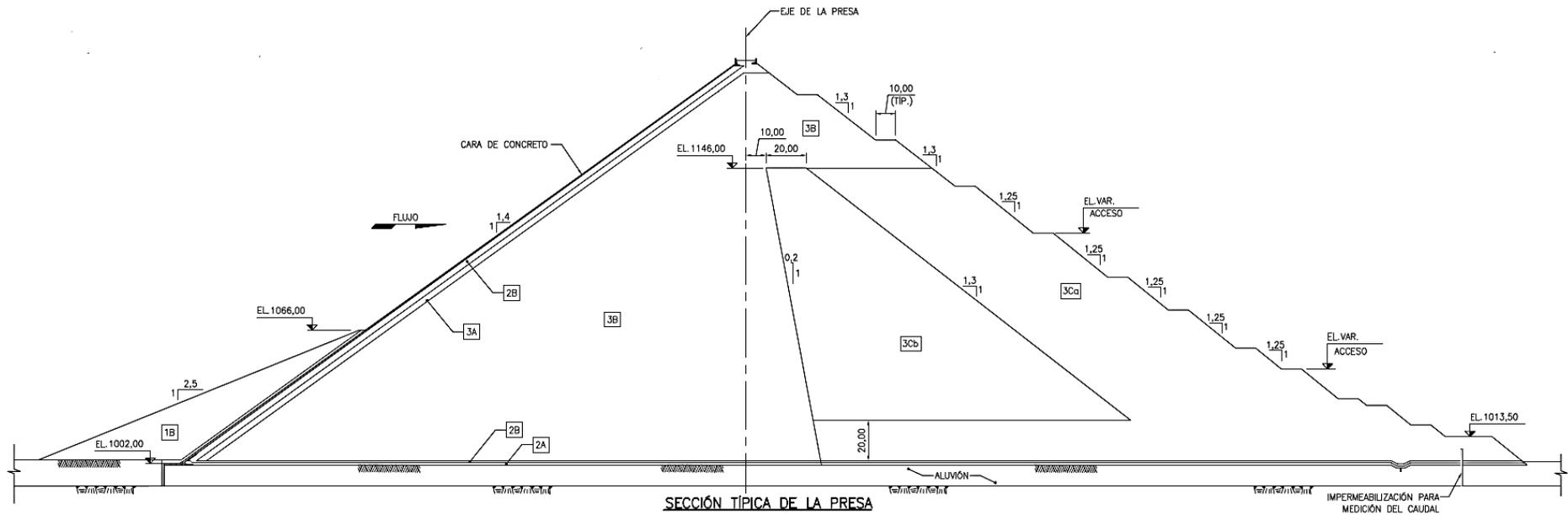


Figura 7. Sección típica de la presa – Proyecto Chaglla

Fuente: Intertechne (2012)

Cada una de las compuertas con ruedas tendrá 7.35 m de altura por 4.00 m de ancho y su solera se ubica en la elevación 1181.50 msnm; además, serán compuestas de dos elementos cada una, siendo uno de ellos almacenado en el tope de su ranura y el otro sobre el piso de operación de la toma, en la elevación 1199 m.s.n.m.

1.2.4. Características del modelo reducido

1.2.4.1. Área a modelar

El modelo debió comprender un área de implantación suficiente para representar adecuadamente las condiciones de aproximación y restitución del flujo en las estructuras que comprende el arreglo establecido.

Tomando en cuenta los objetivos del estudio, el área a modelar comprendió una longitud aproximada de 1900 m aguas arriba y 1350 m aguas abajo del eje de presa proyectado sobre el río Huallaga. Con referencia al ancho del modelo, este quedó definido a fin de poder representar por lo menos la cota 1200 m.s.n.m., en el tramo aguas arriba; y en el tramo aguas abajo, por lo menos hasta la cota 1020 m.s.n.m. Originalmente fue solicitada la modelación de 1900 m aguas arriba y 900 m aguas abajo del eje de presa proyectado, sin embargo, al efectuarse los ensayos referentes a las obras de desvío del río, se vio necesario ampliar el cauce modelado aguas abajo con la finalidad de poder obtener adecuadas condiciones de borde en el modelo. La decisión de ampliación del cauce de modelación fue tomada en coordinación con el cliente (Odebrecht Perú Ingeniería y Construcción – OPIC) y el laboratorio (IHHS).

Se modelaron todas las estructuras comprendidas en el área anteriormente descrita, incluyendo: obras de desvío (ataguías y túnel de desvío), vertederos de excedencias y obra de toma. Respecto a esta última, solo se modeló su ingreso hacia el túnel de aducción, debiéndose emplear válvulas que generasen la misma pérdida de carga que la aducción completa.

1.2.4.2. Escala geométrica

El modelo reducido fue construido con una escala geométrica no distorsionada de 1:50, basada en los criterios de similitud de Froude (ver más en 3.1.3.1). La escala fue establecida a fin de poder cumplir cabalmente los objetivos planteados de la investigación.

1.2.4.3. Características generales del modelo

El modelo reducido fue conformado inicialmente en lecho móvil, con la finalidad de obtener una conformación natural de erosión del fondo del mismo. En este sentido, obtenida la estabilización de erosión, se procedió a conformar el lecho fijo correspondiente, para la posterior calibración del

modelo, en base a curvas de descarga proporcionadas oportunamente por el diseñador.

Las pruebas y ensayos programados fueron efectuados tanto en lecho rígido como en lecho móvil. Los ensayos con lecho móvil se efectuaron en zonas localizadas, donde era requerido analizar fenómenos específicos, utilizando preferentemente materiales granulares no cohesivos.

Las estructuras de conducción, tales como: túneles de los vertederos, túnel de desvío (y su ventana de acceso) y túnel de aducción (longitud parcial), se modelaron en acrílico transparente, a fin de poder visualizar la ocurrencia de los diversos fenómenos del flujo. La conformación topográfica, la presa, ataguías y demás estructuras se modelaron con cemento, acero y similares.

Se colocó una compuerta al final del modelo con finalidad de mantener las condiciones de borde en la última sección modelada.

Sobre la modelación de sedimentos, cabe mencionar que los resultados que se obtuvieron fueron de carácter cualitativo, debido a que es imposible hacer cumplir simultáneamente las escalas de traslación del flujo y de sedimentos. Asimismo, debido a la escala, los sedimentos en suspensión no pudieron ser representados, mientras que los del fondo sí pudieron representarse en su mayor parte. Por otro lado, para la interpretación de resultados de erosión a la salida del vertedero, se asume que la erosión final de equilibrio es independiente del tamaño del sedimento.

A pedido de la supervisión, el modelo fue diseñado para condiciones de alimentación del orden de $6000 \text{ m}^3/\text{s}$; a pesar de que el vertedero debía tener una capacidad para caudales efluentes de $5630 \text{ m}^3/\text{s}$, como máximo, debía considerarse la posibilidad de hacer verificaciones para caudales más elevados.

Finalmente, además de la calibración del cauce del río, se consideró una calibración previa de los túneles de aliviadero y de desvío –en tramos rectilíneos ensayados por separado–, de modo que la pérdida continua de energía sea compatible con los valores considerados en el diseño. Una vez establecido el patrón de rugosidades de los túneles, estos fueron impuestos en los túneles del modelo, incluyendo –ahora sí– curvas y estructuras. De este modo se pudieron cuantificar las capacidades de descarga de los túneles, independientemente de las metodologías de estimación teóricas existentes.

Capítulo 2

Descripción de los ensayos

2.1. Introducción

La modelación física comprendió un grupo de ensayos organizados en 5 series, presentadas en la Tabla 3, en base a las especificaciones técnicas del proyecto.

2.2. Descripción de los ensayos

2.2.1. Serie 1: Ensayos de calibración del modelo

Esta serie de ensayos, indicados en la Tabla 4, tuvo por objetivo realizar una calibración adecuada de la rugosidad del cauce y verificar las características del arrastre de sedimentos de fondo, según los supuestos de cálculo adoptados. Estos ensayos se efectuaron sin estructuras.

Se obtuvieron los siguientes datos:

- Niveles de agua.
- Velocidades del flujo.
- Pendientes energéticas (sin estructuras).

2.2.2. Serie 2: Ensayos con lecho fijo

2.2.2.1. Serie 2A: Ensayos preliminares del aliviadero de excedencias, obra de toma y obra de desvío

A través de estos ensayos se verificaron las condiciones generales del flujo. Asimismo, en coordinación con la supervisión, se realizaron cambios en la configuración geométrica de las estructuras. Todos los ensayos se describen en las Tablas 5, 6, 7 y 8.

Tabla 3. Serie de ensayos correspondientes a la modelación física del proyecto Chaglla

Serie	Descripción	Observación	
Serie 1	Ensayos de calibración del modelo	-	
Serie 2A	Serie 2A-1	Ensayos preliminares de las obras de desvío	-
	Serie 2A-2	Ensayos preliminares del aliviadero de excedencias	Ensayos correspondientes a la presente investigación
	Serie 2A-3	Ensayos preliminares de la obra de toma	
	Serie 2A-4	Ensayos preliminares de la operación conjunta de toma y aliviadero	
Serie 2B	Ensayos de operación de las obras de desvío	-	
Serie 2 Ensayos con lecho fijo	Serie 2C	Ensayos de operación aislada del aliviadero de excedencias con aberturas parciales y simétricas de sus compuertas	Ensayos correspondientes a la presente investigación
	Serie 2D	Ensayos de operación aislada del aliviadero de excedencias con aberturas totales de sus compuertas	Ensayos no realizados
	Serie 2E	Ensayos de operación aislada de cada uno de los túneles del aliviadero de excedencias con aberturas parciales	Ensayos correspondientes a la presente investigación
	Serie 3	Ensayos con lecho móvil aguas abajo de la presa	Ensayos correspondientes a la presente investigación
	Serie 4	Ensayos de verificación de la capacidad de purga de sedimentos del aliviadero de excedencias y del ingreso de sedimentos por la toma	-
Serie 5	Ensayos de determinación de reglas de operación de las estructuras	-	

Fuente: Intertechne (2012)

Tabla 4. Ensayos de la serie 1: Calibración del modelo

Serie	Caudal (m³/s)
1	120
	300
	641
	1276
	1832
	3621

Fuente: Intertechne (2012)

Tabla 5. Ensayos de la serie 2A-1: Obras de desvío

Serie	Caudal (m³/s)
2A-1	120
	300
	641
	1276
	1832
	2845
	3621

Fuente: Intertechne (2012)

Debido a la escala del modelo y a los límites establecidos, no se contempló la modelación total del circuito de generación (túnel de aducción) sino que se empleó un dispositivo de regulación de caudal (válvula) a fin de simular la pérdida de carga que –teóricamente– debió presentarse en la serie 2A-3: 4.02 m. y 41.09 m., respectivamente.

Tabla 6.		Ensayos de la serie 2A-2: Aliviadero de excedencias		
Serie	Caudal total (m ³ /s)	Caudal toma (m ³ /s)	Vertedero	Nivel (msnm)
2A-2	120	Toma cerrada	Compuertas de los vertederos completamente abiertas	El correspondiente al caudal
	300			
	641			
	1832			
	2845			
	3621			
	4000			
	4500			
	5000			
	5630			

Fuente: Intertechne (2012)

Tabla 7.		Ensayos de la serie 2A-3: Obra de toma		
Serie	Caudal total (m ³ /s)	Caudal toma (m ³ /s)	Vertedero	Nivel (msnm)
2A-3	30.94	Toma abierta	Compuertas cerradas	NAMO 1196
	152.72	Toma abierta		

Fuente: Intertechne (2012)

Tabla 8.		Ensayos de la serie 2A-4: Operación conjunta de la toma y aliviadero		
Serie	Caudal total (m ³ /s)	Caudal toma (m ³ /s)	Vertedero	Nivel (msnm)
2A-4	354.1	152.72	Compuertas de los vertederos con aberturas simétricas y parciales	NAMO 1196
	641	152.72		
	1276	152.72		
	1832	152.72		

Fuente: Intertechne (2012)

2.2.2.2. Serie 2B: Ensayos de operación de las obras de desvío

Los ensayos correspondientes a la serie 2B son los que se muestran en la Tabla 9. Se obtuvieron los siguientes datos:

- Curva de descarga del túnel de desvío, considerando la calibración de la rugosidad del túnel ($K_S = 33$).
- Condiciones generales del flujo de aproximación y de restitución en el túnel de desvío.
- Perfil de tirantes de agua en el túnel de desvío.
- Funcionamiento hidráulico de ataguías, que permitiera verificar niveles del agua, velocidades del flujo y condiciones generales del flujo.
- Verificación específica de la recirculación del flujo aguas abajo de la presa (ataguías aguas abajo).
- Verificación específica de las condiciones del flujo probable a través de la ventana de acceso al túnel de desvío (principalmente a la entrada y salida), en relación a la formación de recirculaciones.
- Presiones en la estructura de control desvío (puntos más críticos en términos de cavitación-ranuras por ejemplo), así como también a la entrada y salida de la ventana de acceso al túnel. El diseñador propuso una disposición mínima de los piezómetros a ser instalados en el modelo.
- Registro de las condiciones generales del flujo a través de observaciones visuales, fotografías y video.

Tabla 9. Ensayos de la serie 2B: Operación de las obras de desvío

Serie	Ventana de acceso	Caudal (m ³ /s)
2B	Con tapón	40
		641
		1276
		1832
	Sin tapón	120
		300
		641
		1276
		1832

Fuente: Intertechne (2012)

2.2.2.3. Serie 2C: Ensayos de operación aislada del aliviadero de excedencias con aberturas parciales y simétricas de sus compuertas

Se realizaron los ensayos señalados en la Tabla 10, obteniendo los siguientes datos:

- Curva de descarga del aliviadero de excedencias, considerando la calibración de la rugosidad de los túneles ($K_S = 35$).
- Condiciones generales del flujo de aproximación y de restitución.
- Perfiles de los tirantes y/o niveles de agua en el aliviadero.
- Presiones en la estructura de control, rápida y cubeta deflectora.
- Verificación específica de la recirculación del flujo aguas abajo de la presa con mediciones de niveles de agua y velocidades.
- Velocidades del flujo en la región de aproximación de la estructura.
- Registro de la ocurrencia de vórtices junto a la estructura con descripción detallada: fotografías y video.
- Registro de las condiciones generales del flujo a través de observaciones visuales: fotografías y video.

Tabla 10. Ensayos de la serie 2C: Operación aislada del aliviadero de excedencias con aberturas parciales y simétricas de sus compuertas

Serie	Abertura (m)	Nivel (msnm)	Caudal (m ³ /s)
2C	0.25	Faja de niveles comprendida entre el NAMI (1995) y NAMO (1996)	El correspondiente a cada nivel
	0.50		
	1.00		
	2.00		
	4.00		
	6.00		
	8.00		
	9.00		
	10.00		

Fuente: Intertechne (2012)

2.2.2.4. Serie 2D: Ensayos de operación aislada del aliviadero de excedencias con aberturas totales de sus compuertas

Debido a la cantidad de ensayos ya efectuados –a la fecha– de la Serie 2A-2 (ensayos preliminares del aliviadero de excedencias), y sobre todo por el nivel de detalle considerado, se creyó conveniente eliminar la presente

serie de ensayos; esta decisión fue tomada en coordinación con el cliente (Odebrecht Perú Ingeniería y Construcción) y el laboratorio responsable (IHHS).

2.2.2.5. Serie 2E: Ensayos de operación aislada de cada uno de los aliviaderos con aberturas parciales y abertura total

Se realizaron ensayos indicados en la Tabla 11.

Tabla 11.		Ensayos de la serie 2E: Operación aislada de cada uno de los túneles con aberturas parciales	
Serie	Abertura (m)	Nivel (msnm)	Caudal (m ³ /s)
2E	0.25	Faja de niveles comprendida entre el NAMI (1995) y NAMO (1996)	El correspondiente a cada nivel
	0.50		
	1.00		
	2.00		
	4.00		
	6.00		
	8.00		
	9.00		
	10.00		
	Total		

Fuente: Intertechne (2012)

Se obtuvieron los siguientes datos:

- Curva de descarga de cada uno de los aliviaderos con aberturas parciales y abertura total.
- Condiciones generales del flujo de aproximación y de restitución.
- Perfiles de los tirantes y/o niveles de agua en el aliviadero.
- Presiones en la estructura de control, rápida y cubeta deflectora.
- Verificación específica de la recirculación del flujo aguas abajo de la presa con medición de niveles de agua y velocidades.
- Para los caudales bajos, se verificaron las condiciones de incidencia del chorro en el talud de excavación aguas abajo. Para cada uno de los aliviaderos se determinó el caudal límite (en función de la abertura de compuerta) para que no ocurra dicha incidencia en el talud. Este efecto se verificó para el embalse en la elevación 1196 m.s.n.m.

- Velocidades del flujo en la región de aproximación de la estructura.
- Registro de la ocurrencia de vórtices junto a la estructura con descripción detallada: fotografías y video.
- Registro de las condiciones generales del flujo a través de observaciones visuales: fotografías y video.

Para la serie de ensayos con aberturas totales de las compuertas –de cada uno de los aliviaderos–, deberán ser ensayados los siguientes caudales: 40 m³/s, 120 m³/s, 354.1 m³/s, 641 m³/s, 1276 m³/s, 1832 m³/s y 2068 m³/s.

2.2.3. Serie 3: Ensayos con lecho móvil aguas abajo de la presa

Esta serie de ensayos, detallada en la Tabla 12, tuvo por objetivo evaluar los efectos erosivos aguas abajo de la presa, causados el chorro a la salida del aliviadero de excedencias. Los ensayos con fondo móvil se hicieron con materiales granulares no cohesivos. Asimismo, los ensayos de cada grupo tuvieron que ser hechos secuencialmente, es decir, la configuración del cauce erosionado en un ensayo se mantuvo como condición inicial del ensayo con caudal mayor.

Antes del inicio de cada ensayo, el nivel aguas abajo se ajustó de acuerdo a la curva de descarga proporcionada por INTT, mostrada en la ecuación 2.1:

$$NA = 0.11055Q^{0.55929} + 994.10 \quad \text{Ec. 2.1}$$

donde: $NA = \text{nivel de agua, en m}$
 $Q = \text{caudal, en m}^3/\text{s}$

Para los caudales más bajos existe la tendencia de que el chorro incida en el talud de la pre excavación aguas abajo del vertedero, siendo que en estas condiciones los ensayos con fondo móvil no cohesivo no serán representativos; en dichas condiciones se evaluaron únicamente las condiciones de incidencia del chorro en el talud. Para caudales mayores, los ensayos con fondo móvil fueron hechos según la metodología descrita líneas arriba.

Una malla de 55 puntos fue instalada sobre la zona de análisis, a fin de identificar con mayor precisión el posicionamiento de las erosiones presentadas en el lecho del río.

Se obtuvieron los siguientes datos:

- Análisis de la incidencia del chorro de descarga del aliviadero.
- Levantamiento de la configuración resultante de la erosión después de cada ensayo, a través de fotos con indicación de las curvas de nivel y perfiles batimétricos.
- Niveles y velocidades del flujo aguas abajo en la sección 68.

Tabla 12. Ensayos de la serie 3: Lecho móvil aguas debajo de la presa

Serie	Caudal (m ³ /s)	Nivel (msnm)	Abertura
3	300	Según la curva de descarga	La correspondiente a cada nivel
	641		
	1276		
	1832		
	2068		
	2845		
	3621		

Fuente: Intertechne (2012)

2.2.4. Serie 4: Ensayos de verificación de la capacidad de purga de sedimentos del aliviadero de excedencias y del ingreso de sedimentos por la toma

Esta serie tuvo por objetivo estudiar la capacidad de purga de sedimentos del aliviadero de excedencias y analizar cualitativamente la posibilidad del ingreso de sedimentos en suspensión por la obra de toma. Para la realización de estas investigaciones, se verificó también la conformación del cono de llamada que se forma al ingreso de dichas estructuras.

2.2.4.1. Serie 4A: Ensayos de verificación de la capacidad de purga de sedimentos del aliviadero de demasías

Estos ensayos fueron hechos con material granular (arena/gravilla) para la simulación del sedimento, que se ajusta a la curva granulométrica especificada. Los ensayos preliminares de esta serie fueron conducidos con la participación del diseñador. Los resultados de cada ensayo antecedente permitieron el replanteo de ensayos posteriores, de manera que las especificaciones de cada ensayo posterior se cambiaron para así modelar las mejores condiciones para la purga de sedimentos.

Se obtuvieron los siguientes datos:

- Condiciones generales de flujo en el embalse.
- Nivel de los sedimentos depositados a lo largo de los túneles para cada abertura ensayada.
- Concentración de sedimentos en la salida de los túneles.
- Registro de la incidencia del chorro de descarga de los túneles, a través de observaciones visuales: fotografías y video.
- Estimación de la capacidad de purga (cuantificación temporal del volumen purgado) para diferentes caudales y condiciones iniciales.

Los ensayos fueron agrupados en sub-series según sus condiciones iniciales para una configuración de fondo de embalse sedimentado horizontalmente en la elevación 1180 m.s.n.m. (elevación de fondo de la obra de la toma).

2.2.4.2. Serie 4B: Ensayos de verificación de la capacidad de purga de sedimentos del aliviadero de demasías y del ingreso de sedimentos por la toma

Estos ensayos tenían los mismos objetivos que los de la serie 4A, además de la verificación del ingreso de sedimentos por la toma.

Se obtuvieron los siguientes datos:

- Condiciones generales de flujo en el embalse para diferentes configuraciones de lecho sedimentado.
- Nivel de los sedimentos depositados a lo largo del túnel 3 para cada abertura ensayada.
- Concentración de sedimentos en la salida del chorro y descarga de la bocatoma.
- Verificación cualitativa del ingreso de sedimentos por la toma para diferentes configuraciones de fondo del embalse colmatado.
- Velocidades del flujo en la región de aproximación de la estructura.
- Registro de la incidencia del chorro de descarga del túnel 3, a través de observaciones visuales: fotografías y video.
- Estimación de la capacidad de purga (cuantificación temporal del volumen purgado) para diferentes caudales y condiciones iniciales.

Se usaron las siguientes configuraciones de cauce:

- Configuración de fondo de embalse sedimentado horizontalmente en la elevación 1180 m.s.n.m. (elevación de fondo de la obra de toma).
- Configuración de fondo de embalse sedimentado horizontalmente en la elevación 1194 m.s.n.m.

2.2.5. Serie 5: Ensayos de determinación de reglas de operación de las estructuras

En base a los números ensayos realizados en series anteriores, se evaluaron las mejores condiciones de operación de las estructuras de toma y aliviaderos. Así, fueron propuestas –en coordinación con el diseñador, consultores, laboratorio y clientes– las reglas de operación de las estructuras.

Un pequeño número de ensayos adicionales fueron realizados con el objetivo de optimizar el establecimiento de las reglas de operación.

Capítulo 3

Verificación hidráulica

En el presente capítulo se hace una revisión de los principales conceptos teóricos asociados a la verificación y caracterización hidráulica en el modelo reducido Central Hidroeléctrica PH Chaglla, entre otros: modelación hidráulica, semejanza hidráulica, análisis dimensional, líneas de corriente, líneas de flujo, distribución vertical de velocidades y erosión en cuenco amortiguador.

3.1. Modelación hidráulica

En 1993, Vergara, en su libro sobre técnicas de modelación en hidráulica, manifiesta que:

Muchos de los fenómenos que ocurren en la naturaleza en el campo de la hidráulica son tan complejos que no es fácil tratarlos únicamente con métodos matemáticos, sino que es conveniente recurrir al empleo de técnicas experimentales, como herramientas en la obtención de soluciones prácticas aplicadas a problemas de ingeniería en general. Algunas de estas aplicaciones son sobre movimiento de sedimentos, erosión y sedimentación de cauces, control de avenidas, obras de toma, conducción de agua a presión, etc. [...]

En hidráulica, un modelo corresponde a un sistema que simula un objeto real llamado prototipo, el cual procesa cierta información de entrada y la presenta de forma adecuada para emplearse en el diseño y operación de múltiples obras de ingeniería civil.

Por tanto, un modelo físico a escala reducida representa a escala al objeto real o prototipo, tal como un fenómeno, una estructura o una máquina, cumpliendo ciertas condiciones matemáticas definidas.

En la actualidad, se dispone de técnicas avanzadas en la modelación física de fenómenos hidráulico que, aunadas al desarrollo de instrumentos de medición y equipos generadores de fenómenos a escala, permiten predecir con alto grado de certidumbre lo que pueda ocurrir en el prototipo y, por tanto, se obtienen óptimos resultados en los aspectos de funcionalidad, estabilidad y economía de las estructuras por construir, justificando ampliamente la utilización de modelos hidráulicos.

En general, se puede afirmar que los modelos hidráulicos se clasifican en dos grandes grupos: físicos y numéricos, cuyas características se presentan a continuación.

3.1.1. Modelos hidráulicos

3.1.1.1. Modelos físicos

Vergara (1993) señala que "el uso de modelos físicos a escala reducida implica que éstos deben ser semejantes al prototipo, para lo cual deben satisfacerse las leyes de similitud (o semejanza) geométrica, cinemática o dinámica", según sea el caso. Agrega Rocha (1985) que "la existencia de estos criterios de similitud es lo que nos permitirá obtener resultados extrapolables al prototipo. Si no se cumple el criterio de semejanza adecuado el modelo sería inútil".

De acuerdo a las características propias de la modelación, Vergara (1933) explica que:

Los modelos físicos se pueden clasificar como geoméricamente semejantes o geoméricamente distorsionados. Así, cuando en un modelo físico las escalas de magnitudes lineales horizontales, verticales e inclinadas son iguales, se dice que el modelo es geoméricamente semejante; mientras que, cuando existen por lo menos dos escalas de líneas diferentes, por ejemplo, una para longitudes horizontales y otra para longitudes verticales, el modelo será geoméricamente distorsionado.

Por otro lado, cuando la construcción con fronteras es requerida, los modelos físicos se pueden clasificar como modelos de contorno fijo o modelos de contorno móvil. Los modelos de contorno fijo son aquellos que se emplean para reproducir fenómenos donde la variación de niveles y las velocidades de flujo son parámetros determinantes, como es el caso de proyectos de control de avenidas. En contraste, los modelos de contorno móvil son utilizados cuando la deformabilidad de la sección es determinante.

3.1.1.2. Modelos numéricos

Un modelo numérico, según Vergara (1993), se define como "un conjunto de hipótesis y relaciones de las variables (ecuaciones) que describen un fenómeno, que conduce a un problema matemático que es necesario resolver mediante apropiadas técnicas matemáticas".

Un ejemplo de modelo numérico sería la ecuación que da la relación entre los tirantes antes y después de un salto hidráulico en función del número de Froude incidente de la corriente. Para llegar a esta fórmula, tan empleada, ha sido necesario aceptar un gran número de simplificaciones e hipótesis, entre otras: (1) el flujo es bidimensional y (2) se desprecia tanto el peso del fluido como la fricción con el contorno (Rocha, 1985).

En la mayoría de casos, las ecuaciones que rigen los fenómenos físicos a considerar no pueden resolverse analíticamente, por lo que es necesario emplear métodos aproximados mediante un proceso computacional, tales como: elementos finitos y diferencias finitas, entre otros (Vergara, 1993).

Actualmente, la modelación numérica en ingeniería está siendo muy utilizada debido a su gran versatilidad, rapidez y alcance; sin embargo, el desarrollo de investigaciones de gran complejidad exige la implementación de software y tecnología de última generación, siendo económicamente menos ventajoso respecto a la modelación física. Al respecto, Rocha (1985) concluye que "los resultados de un modelo físico no pueden comprenderse desligándolos del modelo numérico que se pretende representar. Los resultados de ambos modelos son los personajes de un diálogo permanente. Si la comunicación se interrumpe los resultados se vuelven brumosos y frágiles".

3.1.2. Semejanza hidráulica en modelos físicos

Tal como se señaló en 3.1.1.1, en hidráulica, la experimentación en modelos físicos reducidos tiene su base en la aplicación de un conjunto de leyes de semejanza –derivadas del análisis dimensional– que son dependientes de los parámetros que gobiernan el comportamiento de un fluido. Así, se dice que un modelo físico es representativo del prototipo cuando ambos son mecánicamente semejantes, es decir, cuando existe semejanza geométrica, cinemática y/o dinámica, entre ambos.

Con base en lo expuesto por Chereque (1987) y Canizales (1988), en sus apuntes sobre mecánica de fluidos y teoría de modelos de obras hidráulicas a superficie libre, a continuación, se resumen aquellas relaciones que garantizan la semejanza geométrica, cinemática y dinámica, entre modelo y prototipo.

3.1.2.1. Semejanza geométrica

Existe semejanza geométrica entre modelo y prototipo cuando las relaciones entre dimensiones homólogas son iguales. Un modelo y un prototipo son geoméricamente semejantes si todas las dimensiones del cuerpo en cada una de las direcciones de los ejes coordenados se relacionan mediante la misma escala, tal como se muestra en la Figura 8.

Por ejemplo, una longitud en el modelo puede obtenerse multiplicando su longitud homóloga en el prototipo por un valor fijo que es la escala lineal (ver ecuación 3.1):

$$\frac{L_m}{L_p} = L_e \quad \text{Ec. 3.1}$$

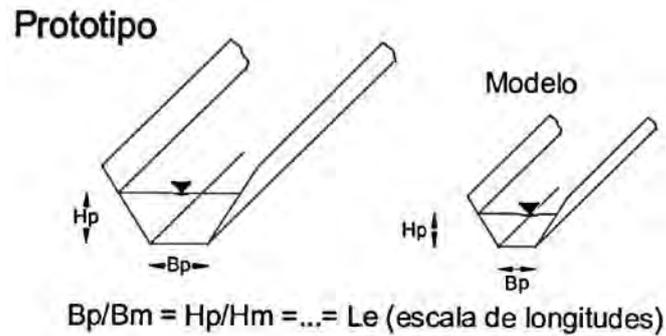


Figura 8. Semejanza geométrica entre modelo y prototipo

Fuente: Echávez, G. (1996)

Del mismo modo se pueden obtener las escalas de áreas y volúmenes, tal como se indica en las ecuaciones 3.2 y 3.3:

$$A_e = \frac{A_m}{A_p} = \frac{(L_m)^2}{(L_p)^2} = (L_e)^2 \quad \text{Ec. 3.2}$$

$$V_e = \frac{V_m}{V_p} = \frac{(L_m)^3}{(L_p)^3} = (L_e)^3 \quad \text{Ec. 3.3}$$

3.1.2.2. Semejanza cinemática

Existe semejanza cinemática entre modelo y prototipo si las trayectorias de partículas homólogas son geoméricamente semejantes y si las relaciones entre las velocidades de partículas homólogas son iguales. Ver Figura 9.

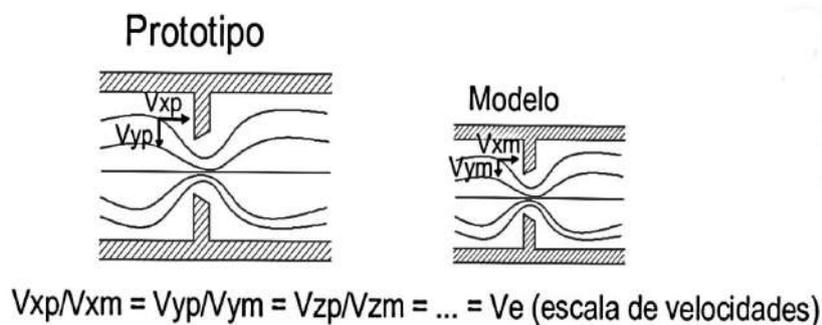


Figura 9. Semejanza cinemática entre modelo y prototipo

Fuente: Echávez, G. (1996)

Así, la escala cinemática se define según la ecuación 3.4:

$$v_e = \frac{v_m}{v_p} = \frac{L_m/T_m}{L_p/T_p} = \frac{L_m T_p}{L_p T_m} = \frac{L_e}{T_e} \quad \text{Ec. 3.4}$$

El cumplimiento de este tipo de semejanza obliga a que haya semejanza geométrica; cuando ambas se cumplen, las direcciones de flujo en puntos homólogos del prototipo y modelo son semejantes, es decir, la forma de las líneas de corriente es la misma en modelo y prototipo.

Además, puesto que hay una escala de velocidades y de tiempos, se podrá determinar una escala de aceleraciones. Por lo tanto, al medirse tiempos, velocidades y aceleraciones en cualquier punto del modelo, se pueden conocer los tiempos, velocidades y aceleraciones en puntos homólogos del prototipo.

3.1.2.3. Semejanza dinámica

Entre modelo y prototipo, semejantes geométrica y cinemáticamente, existe semejanza dinámica cuando las relaciones entre las fuerzas homólogas son iguales. Ver Figura 10.

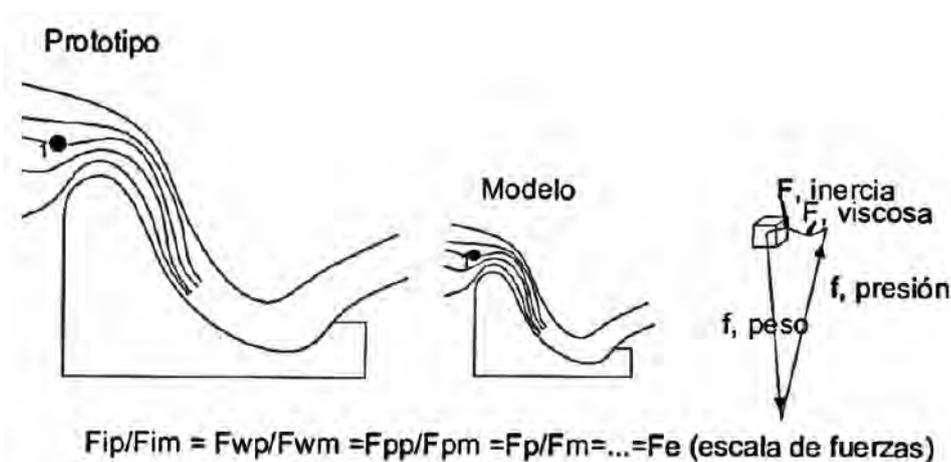


Figura 10.

Semejanza dinámica entre modelo y prototipo

Fuente: Echávez, G. (1996)

Las fuerzas que actúan sobre una partícula de fluido pueden ser debido a la viscosidad, gravedad, presión, compresión y tensión superficial. Así, la semejanza dinámica implica que se cumpla la ecuación 3.5:

$$\frac{F_{vm}}{F_{vp}} = \frac{F_{gm}}{F_{gp}} = \frac{F_{pm}}{F_{pp}} = \dots = F_e \quad \text{Ec. 3.5}$$

Cuando se ensaya un modelo hidráulico se estudian únicamente las fuerzas predominantes. Afortunadamente, en la mayoría de los problemas con líquidos llega a predominar solo una fuerza entre las mencionadas, a parte de la fuerza de inercia. La consideración de aquella fuerza predominante se hace a través de un parámetro adimensional. Los parámetros adimensionales más conocidos en hidráulica son los que se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Parámetros adimensionales para la semejanza dinámica		
Número	Fuerza predominante	Parámetro
Reynolds	Viscosidad	$R_e = \frac{VL}{\nu}$
Froude	Gravedad	$F = \frac{V}{\sqrt{gL}}$
Euler	Presión	$E_\mu = \frac{\rho V^2}{p}$
Mach	Compresibilidad	$M = \frac{V}{\sqrt{E/\rho}}$
Weber	Tensión superficial	$W = \frac{\rho LV^2}{\sigma}$

Fuente: Chereque, W. (1987)

3.1.3. Análisis dimensional

En modelación hidráulica se verifican principalmente tres tipos de semejanza dinámica: Froude, Reynolds y Weber. Las condiciones exigidas por cada parámetro, tomadas de lo expuesto por Canzales en 1988, se detallan a continuación.

3.1.3.1. Modelos a semejanza de Froude

El número de Froude se usa como criterio de semejanza en la prueba de modelos de canales, vertederos, salto hidráulico, compuertas, ondas, etc., donde el efecto viscoso es escaso y la fuerza de gravedad es la más importante.

El parámetro adimensional de Froude (o simplemente número de Froude) se obtiene de la relación entre las fuerzas de inercia y gravitatorias, tal como se muestra en la ecuación 3.6:

$$F = \sqrt{\frac{ma}{mg}} = \sqrt{\frac{\rho L^2 V^2}{\rho L^3 g}} = \sqrt{\frac{V^2}{gL}} = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Así, por ejemplo, cuanto menor es el F mayor es el efecto de la gravedad. Entonces, aquellos fenómenos gobernados por las fuerzas de gravedad pueden ser modelados considerando la condición de semejanza dinámica $F_m = F_p$, es decir, debe verificarse la compatibilidad de la ecuación 3.7:

$$\frac{V_e}{\sqrt{g_e L_e}} = 1 \quad \text{Ec. 3.7}$$

Este tipo de modelos –a semejanza de Froude– no garantiza que las demás relaciones de fuerzas sean idénticas, por lo tanto, los efectos de escala no despreciables deberían ser considerados en la interpretación de resultados.

3.1.3.2. Modelos a semejanza de Reynolds

Cuando en un escurrimiento la viscosidad del líquido gobierna o interviene en forma predominante en el fenómeno a estudiar, se dice que se encuentra bajo la condición de Reynolds.

El número de Reynolds se obtiene de la relación entre las fuerzas de inercia y viscosas (ver ecuación 3.8):

$$R_e = \frac{ma}{\tau A} = \frac{ma}{\mu \frac{dV}{dy} A} = \frac{\rho L^2 V^2}{\mu \frac{V}{L} L^2} = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad \text{Ec. 3.8}$$

Así, aquellos fenómenos gobernados por las fuerzas de viscosidad pueden ser modelados si se satisface la ecuación 3.9:

$$\frac{V_e L_e}{\nu_e} = 1 \quad \text{Ec. 3.9}$$

Esta condición la deben cumplir los modelos en los cuales se estudia el empuje y sustentación de cuerpos sumergidos en un flujo, flujos laminares y de transición en tuberías, medidores de gasto, transiciones en conductos, etc.

3.1.3.3. Modelos a semejanza de Weber

La condición de Weber se utiliza en problemas relacionados con la tensión superficial, tales como: modelos marítimos, ondas capilares en pequeños canales, movimiento capilar en suelos, etc. En general, los modelos a semejanza de Weber se emplean muy poco en modelos hidráulicos.

3.2. Caracterización hidráulica en embalses

3.2.1. Líneas de corriente y líneas de flujo

En sus apuntes sobre mecánica de fluidos, Torres (s.f.) explica la diferencia entre líneas de corriente y líneas de flujo:

La trayectoria o camino que sigue una partícula de fluido en movimiento se denomina línea de flujo. Si cada partícula que pasa por un determinado punto sigue la misma línea de flujo que las partículas anteriores se dice que el flujo es estacionario. En un flujo estacionario la velocidad en cada punto permanece constante en el tiempo, aunque la velocidad de la partícula puede cambiar al moverse de un punto a otro y se puede verificar que $\frac{d\vec{v}}{dt} = 0$. En un flujo no estacionario se verifica que $\frac{d\vec{v}}{dt} \neq 0$.

Una línea de corriente es una curva que sigue la dirección del vector velocidad en cada punto del fluido. En régimen estacionario las líneas de corriente coinciden con las líneas de flujo, es decir, las líneas de corriente no se pueden cruzar. Si el flujo es no estacionario, una partícula puede seguir una línea de corriente en un instante y luego seguir una línea de corriente distinta.

En general, un flujo se puede clasificar como estacionario o no estacionario, uniforme o no uniforme, laminar o turbulento.

Así, se dice que un fluido se puede caracterizar cuando se está en condiciones de conocer el cambio de posición de una partícula y la variación de la velocidad en un punto. Para verificar el cambio de posición de una partícula se pueden utilizar distintas sustancias como partículas brillantes o tinte, tanto en la superficie como en el fondo del fluido.

Por otro lado, las velocidades se pueden cuantificar según se indica en 3.2.2.

3.2.2. Velocidades

3.2.2.1. Distribución de velocidades en una sección de canal

La caracterización de distribución de velocidades para fines de la presente investigación fue realizada con base en lo expuesto por Chow en 1994, quien señala que:

Debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción a lo largo de las paredes de un canal, las velocidades no están uniformemente distribuidas en la sección de un canal. La máxima velocidad medida en canales normales a menudo ocurre por debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05 a 0.25 de profundidad; cuanto más cerca de las bancas, más profundo se encuentra este máximo. La Figura 11 ilustra el modelo general de la distribución de velocidades para varias secciones horizontales y verticales en un canal con sección rectangular y las curvas de igual velocidad de la sección transversal. Los modelos generales para la distribución de velocidades en diferentes secciones del canal con otras formas se ilustran en la Figura 12.

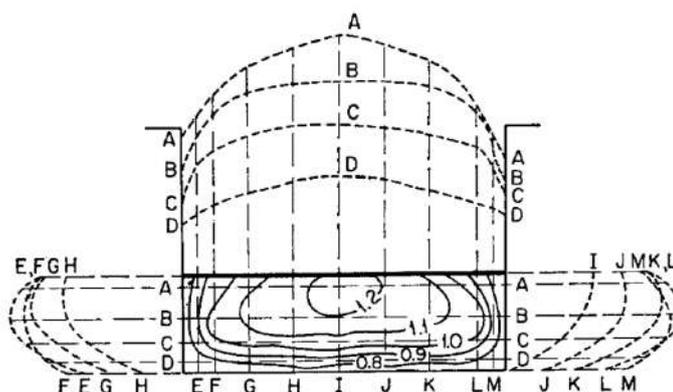


Figura 11. Distribución de velocidades en un canal rectangular

Fuente: Chow, V. T. (1994)

La distribución de velocidades en una sección de canal depende también de otros factores, como una forma inusual de la sección, la rugosidad del canal y la presencia de curvas. En una corriente ancha, rápida y poco profunda o en un canal muy liso, la velocidad máxima por lo general se encuentra en la superficie libre. La rugosidad del canal causa un incremento en la curvatura de la curva de distribución vertical de velocidades (ver Figura 13). En una curva, la velocidad se incrementa de manera sustancial en el lado convexo, debido a la acción centrífuga del flujo. Contrario a la creencia usual, el viento en la superficie tiene muy poco efecto en la distribución de velocidades.

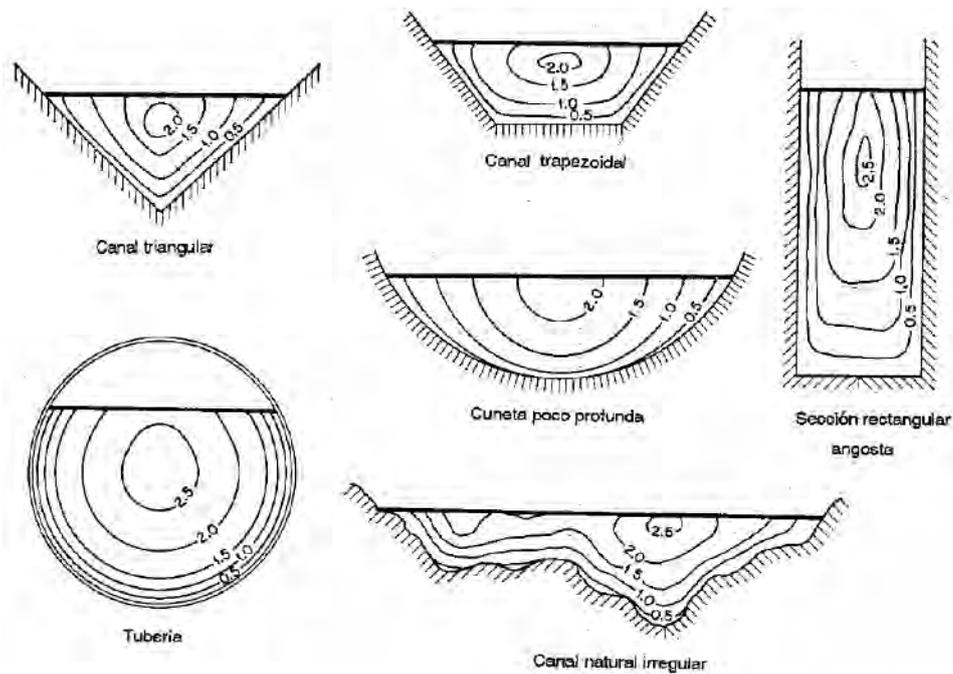


Figura 12. Curvas típicas de velocidades en diferentes secciones de canal.

Fuente: Chow, V. T. (1994)

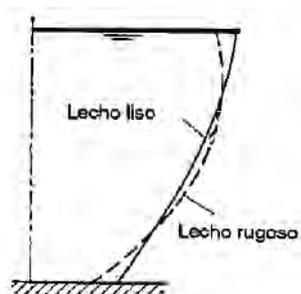


Figura 13. Efecto de la rugosidad en la distribución de velocidades en un canal abierto.

Fuente: Chow, V. T. (1994)

3.2.2.1. Medición de velocidades

La metodología utilizada para la medición de velocidades y el correspondiente aforo de caudales siguió lo señalado por Chow (1994):

De acuerdo con el procedimiento para el aforo de corrientes del U.S. Geological Survey, la sección transversal del canal se divide en franjas verticales por medio de un determinado número de verticales sucesivas, y las velocidades medias en las verticales se determinan midiendo la velocidad a 0.6 de la profundidad de cada vertical, o tomando el promedio de las velocidades a 0.2 y 0.8 de la profundidad, cuando se requieran resultados más confiables [...] El promedio de las velocidades medias en cualesquiera dos verticales

adyacentes multiplicado por el área entre las verticales da el caudal a través de esa franja vertical de la sección transversal. La suma de los caudales a través de todas las franjas es el caudal total. La velocidad media de toda la sección es, por consiguiente, igual al caudal total dividido por el área completa.

3.2.3. Teoría del chorro

Cuando el agua corre a través de una obra hidráulica, esta lleva consigo una gran cantidad de energía debido a las altas presiones y velocidades, causando –en muchos casos– erosión en el lecho del río, en el pie de la presa o en las estructuras de conducción. De ahí la necesidad de implementar estructuras de control de caudal y estructuras de disipación de energía, entre las cuales resaltan el vertedero Ogee y el salto de esquí, respectivamente.

3.2.3.1. Vertedero Ogee como estructura de control

Niño y Duarte (2004), en sus notas de clase sobre la introducción a la mecánica de fluidos, señalan que:

Un vertedero tipo Ogee, como el mostrado en la Figura 14, es una estructura hidráulica de control utilizada para evacuar el caudal excedente en un embalse.

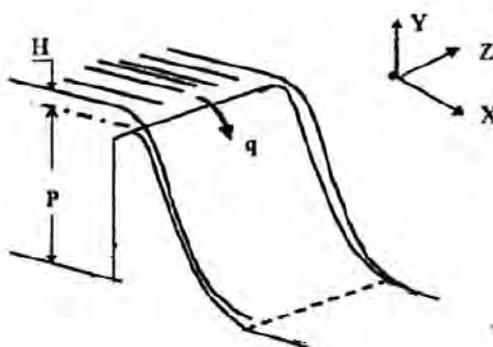


Figura 14.

Vertedero tipo Ogee

Fuente: Niño, J. y Duarte, C. (2004)

Así, utilizando el teorema Pi de Buckingham, se puede determinar el caudal evacuado por el vertedero, según la ecuación 3.10:

$$q = c\sqrt{g}H^{3/2} \quad \text{Ec. 3.10}$$

Donde el coeficiente c es función de determinados parámetros adimensionales, cuya determinación se realiza por medio de pruebas o ensayos de laboratorio.

Por otro lado, muchas veces, al final del vertedero, la descarga fluye con una elevada energía. En este sentido, esta energía se podría disipar mediante una estructura terminal en salto de esquí o en un depósito amortiguador.

3.2.3.2. Salto de esquí como estructura de disipación de energía

Minaya (2005), en su investigación sobre la erosión en lecho no cohesivo debido al impacto de un chorro a la salida de un vertedero con salto de ski expone que:

Para disipar la energía de una descarga y disminuir los efectos de erosión se consideran estructuras terminales que permitan proyectar el flujo (chorro) lo más lejos posible del pie de la estructura. Estas estructuras son conocidas como deflectores terminales o trampolines.

Un salto de esquí es una estructura de tipo deflector, la cual impone un cambio en la dirección con la que sale el flujo de la estructura de vertedero, arrojando el chorro al aire para luego caer en un punto determinado. Una pequeña cantidad de energía es disipada por la fricción a través del deflector. Además, durante su viaje a través del aire, el chorro se expande debido a la masa de aire que entra en contacto con el chorro, disipándose otra porción de energía. Finalmente, la disipación total de la energía se completa en el colchón de agua del cuenco.

Los parámetros geométricos requeridos para el diseño de un deflector o flip bucket son: el radio r del trampolín, la altura mínima $h_{mín}$ del labio del trampolín, el ángulo θ_0 de la trayectoria ubicado al final del trampolín y el alineamiento planimétrico del trampolín (ver Figura 15).

Las experiencias sugieren que el radio del trampolín sea al menos cuatro veces el tirante máximo del flujo que se desarrolla antes de salir del trampolín.

La altura mínima $h_{mín}$ es la requerida por el trampolín para asegurar que el flujo siga la curvatura del trampolín y viene dada por la ecuación 3.11:

$$h_{mín} = r - r \cos(\phi - \arctan s) \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde $\phi = \arctan \frac{[y(2r-y)]^{\frac{1}{2}}}{r-y}$ es el mínimo ángulo de la deflexión y s es la pendiente del vertedero adjunta al trampolín.

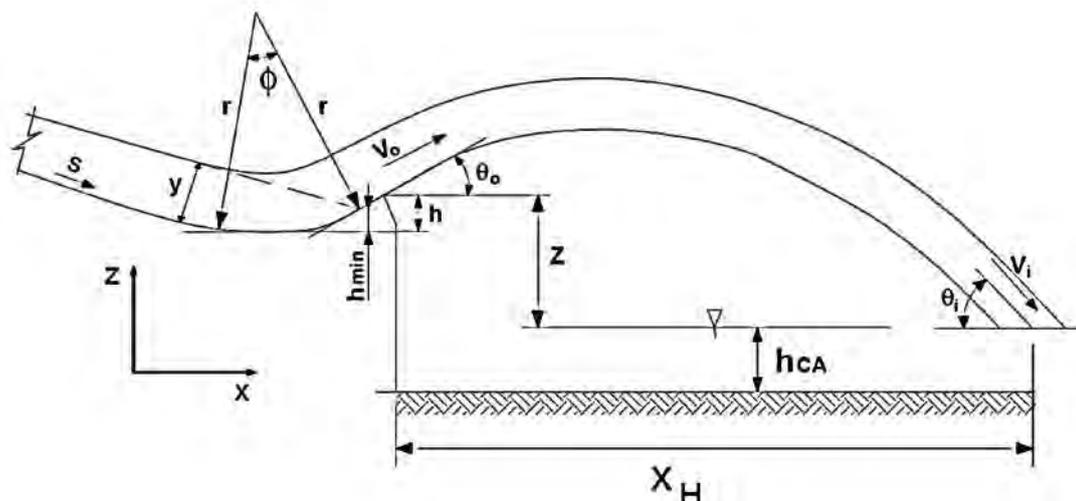


Figura 15. Variables de la trayectoria de un chorro

Fuente: Minaya, E. (2015)

El ángulo de la trayectoria es el ángulo que hace el labio del esquí respecto a la horizontal. Este ángulo es un factor determinante en la distancia de la trayectoria del chorro y de las características hidráulicas en el área de impacto. Un ángulo igual a 45° generaría la máxima distancia horizontal de la trayectoria del chorro.

La altura requerida h del labio de esquí, medida desde la parte inferior de la curvatura del trampolín, de modo que satisfaga la trayectoria deseada, puede ser determinada por la ecuación 3.12:

$$h = r - r \cos \theta_0 \quad \text{Ec. 3.2}$$

La distancia horizontal X_H de la trayectoria del chorro depende de la velocidad del flujo V_0 en el momento que sale del trampolín, del ángulo de la trayectoria θ_0 y de la distancia vertical z que existe entre el labio del trampolín y la superficie del colchón de agua. Este valor es determinado por la ecuación 3.13:

$$X_H = \frac{V_0^2}{2g} \sin 2\theta_0 + 2 \cos \theta_0 \left[\frac{V_0^2}{2g} \left(\frac{V_0^2}{2g} \sin^2 \theta_0 + z \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Cuando el valor de z es igual a cero, la ecuación se reduce a:

$$X_H = \frac{V_0^2}{2g} \sin 2\theta_0 \quad \text{Ec. 3.4}$$

Finalmente, el ángulo θ_i que hace el chorro en el momento del impacto con la superficie del colchón de agua es descrito por la ecuación 3.15:

$$\theta_i = \arctan \left[\sec \theta_0 \left(\sin^2 \theta_0 + \frac{z}{V_0^2/2g} \right)^{1/2} \right] \quad \text{Ec. 3.5}$$

La ecuación 3.15 se reduce a $\theta_i = \theta_0$ cuando z es igual a cero.

3.2.4. Profundidad de erosión

3.2.4.1. Estudios experimentales para el cálculo de la profundidad de erosión máxima (h_s) debido al impacto de un chorro a la salida de un vertedero en salto de esquí

A lo largo de los años se han desarrollado múltiples ecuaciones para predecir la profundidad de erosión h_s debida al impacto de chorros libres aguas debajo de las presas, con o sin estructuras terminales en salto de esquí.

Algunas ecuaciones, recopiladas y agrupadas por Heng, Tingsanchali y Suetsugi (2013), con base en Mason y Arumugam (1985), tienen una representación común, tal como se muestra en la ecuación 3.16.

$$h_s = K \frac{q^x H^y}{d^z} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Donde $q(m^3/s/m)$ es la descarga unitaria del chorro, $H(m)$ es la diferencia entre el nivel del embalse y el salto de esquí, $d(m)$ es el diámetro característico del material en el lecho, k es una constante, y x, y, z son los exponentes de q, H, d , respectivamente. En la Tabla 14 se muestran los valores de los coeficientes usados en la ecuación 3.16, según el autor.

Tabla 14. Valores de K, x, y, z para el cálculo de la profundidad de erosión h_s según la ecuación 3.6

N°	Nombre	Año	K	x	y	z	d
1	Schoklitsch	1932	0.521	0.57	0.20	0.32	d_{90}
2	Veronese (A)	1937	0.202	0.54	0.225	0.42	d_m
3	Veronese (B)	1937	1.90	0.54	0.225	0	–
4	Eggenburger	1944	1.44	0.60	0.50	0.40	d_{90}
5	Hartung	1959	1.40	0.64	0.36	0.32	d_{85}
6	Franke	1960	1.13	0.67	0.50	0.50	d_{90}
7	Damle (A)	1966	0.652	0.50	0.50	0	–
8	Damle (B)	1966	0.543	0.50	0.50	0	–
9	Damle (C)	1966	0.362	0.50	0.50	0	–
10	Chee and Padiyar	1969	2.126	0.67	0.18	0.063	d_m
11	Bisaz and Tschopp	1972	2.76	0.50	0.25	1.00	d_{90}
12	Chee and Kung	1974	1.663	0.60	0.20	0.10	d_m
13	Martin (B)	1975	1.50	0.60	0.10	0	–
14	Tarimovich	1978	0.633	0.67	0.25	0	–
15	Machado	1980	1.35	0.50	0.3145	0.0645	d_{90}
16	SOFRELEC	1980	2.30	0.60	0.10	0	–
17	INCYTH	1981	1.413	0.50	0.25	0	–
18	Suppasri	2007	0.15	0.38	0.75	0	–

Fuente: Modificado por Heng, Tingsanchali y Suetsugi (2013) de Mason y Arumugan (1985)

Otras 10 ecuaciones que predicen el valor de h_s , utilizando estructuras diferentes a la ecuación 3.16, se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Ecuaciones para el cálculo de la profundidad de erosión h_s diferentes a la ecuación 3.6

N°	Nombre	Año	Fórmula
19	Jaeger	1939	$h_s = 0.6q^{0.5}H^{0.25}(h/d_m)^{0.333}$
20	Mikhalev	1960	$h_s = \frac{1.804q \sin \theta_T}{1 - 0.215 \cos \theta_T} \left(\frac{1}{d_{90}^{0.33} h^{0.50}} - \frac{1.126}{H} \right)$
21	Rubinstein	1965	$h_s = h + 0.19 \left(\frac{H+h}{d_{90}} \right)^{0.75} \left(\frac{q^{1.20}}{H^{0.47} h^{0.33}} \right)$
22	Mirskhulava	1967	$h_s = \left(\frac{0.97}{\sqrt{d_{90}}} - \frac{1.35}{\sqrt{H}} \right) \frac{q \sin \theta_T}{1 - 0.175 \cos \theta_T} + 0.25h$
23	Martin (A)	1973	$h_s = 0.14N - 0.75 \frac{h^2}{N} + 1.7h ; N = (Q^3 H^{1.5} / d_m^2)^{1/7}$
24	Mason (A)	1985	$h_s = 3.27 \frac{q^{0.60} H^{0.05} h^{0.15}}{g^{0.30} d^{0.10}}$
25	Mason (B)	1989	$h_s = 3.39 \frac{q^{0.60} (1 + \beta)^{0.30} h^{0.16}}{g^{0.30} d^{0.06}}$
26	Veronese modificado	1994	$h_s = 1.90h^{0.225} q^{0.54} \sin \theta_T$
27	Hoffmans	1998	$h_s = c_{2v} \sqrt{\frac{qu_T \sin \theta_T}{g}}$
28	Liu	2005	$h_s = \sqrt{h^2 + k_t^2 \frac{q\sqrt{H}}{\sqrt{g}}} ; h_s = t_T \sin \theta_T \left(\frac{k_e^2}{k_t^2} \right)^{1/m}$

$d_m(m)$ es el diámetro medio del material en el lecho

$\theta_T(^{\circ})$ es el ángulo de incidencia del chorro, medido desde la horizontal

$d_{90}(m)$ es el diámetro característico para el cual el 90% del material es más fino

$g(m/s)$ es la aceleración de la gravedad

β es la relación aire/agua

$u_T(m/s)$ es la velocidad del chorro cuando impacta en el colchón de agua

c_{2v} es el coeficiente relacionado a d_{90}

k_t es un factor hidráulico

k_e es un coeficiente de erosión

$t_T(m)$ es el espesor del chorro en el punto de impacto

m es el coeficiente relacionado a la profundidad del colchón de agua

Fuente: Heng, Tingsanchali y Suetsugi (2013)

En 2008, Alias, Mohamed, Ghazali y Noor, en su investigación titulada *Impact of takeoff angle of bucket type energy dissipater on scour hole*, evaluaron distintos modelos de vertedero con diferentes ángulos de despegue: 10, 20, 30, 45 y 60°, limitando su investigación al uso de 8 ecuaciones: Veronese, Yildiz & Uzupek, Mason & Arumugam (2), Martin, Damle, Chain y Schoklitsch, cuyas características se amplían a continuación.

Según Alias, Mohamed, Ghazali y Noor (2008):

Veronese, en 1937, propuso que la profundidad de erosión podría calcularse según la ecuación 3.17 (N° 3 en la Tabla 14):

$$h_s + h_0 = 1.90q^{0.54}H^{0.225} \quad \text{Ec. 3.7}$$

donde: h_s = profundidad de erosión
 h_0 = profundidad del colchón de agua
 H = carga de agua
 q = caudal unitario

Por otro lado, agregan que Yildiz, en 1994, consideró que la ecuación de Veronese fue desarrollada para casos en los cuales el ingreso del chorro al colchón de agua es bastante cercano al ángulo vertical, lo cual podría ocurrir en vertederos de presas de arco. De este modo, sugirió que la profundidad de erosión podría estar dada por la ecuación 3.18 (N° 26 en Tabla 15):

$$h_s + h_0 = 1.32q^{0.54}H^{0.225} \cos \alpha \quad \text{Ec. 3.8}$$

donde: h_s = profundidad de erosión
 h_0 = profundidad del colchón de agua
 H = carga de agua
 q = caudal unitario
 α = ángulo de incidencia, medido desde la vertical

En contraste con Veronese, señalan que la ecuación de Mason y Arumugam (1985) incluyen el diámetro característico d del material. Este factor representa adecuadamente la variación de las propiedades de los materiales encontrados en el lecho. Esta ecuación (3.19) estuvo basada en una investigación exhaustiva que incluyó una serie completa de estudios en modelos a escala y prototipos.

$$h_s + h_0 = k \frac{g^x H^y h_0^w}{g^v d^z} \quad \text{Ec. 3.9}$$

donde: h_s = profundidad de erosión
 h_0 = profundidad del colchón de agua
 g = aceleración de la gravedad
 H = carga de agua
 d = diámetro característico del material (d_{90})
 $k = (6.42 - 3.1H^{0.10})$
 $x = (0.60 - H/300); y = (0.15 + H/200)$
 $w = 0.15; v = 0.30; z = 0.10$

Asimismo, indican que Mason y Arumugam también propusieron la ecuación 3.20 (N° 24 en Tabla 15) para vertederos:

$$h_s + h_0 = 3.27q^{0.6}H^{0.05}h_0g^{-0.3}d_m^{-0.1} \quad \text{Ec. 3.10}$$

donde: h_s = profundidad de erosión
 h_0 = profundidad del colchón de agua
 H = carga de agua
 q = caudal unitario
 g = aceleración de la gravedad
 d_m = diámetro medio del material

Adicionalmente, manifiestan que Martin, en 1975, propuso la ecuación 3.21 (N° 13 en Tabla 14) para la predicción de la profundidad de erosión aguas abajo de un aliviadero con salto de esquí, mediante observaciones en prototipo:

$$h_s + h_0 = 1.5q^{0.6}Z_2^{0.1} \quad \text{Ec. 3.11}$$

donde: h_s = profundidad de erosión
 h_0 = profundidad del colchón de agua
 q = caudal unitario
 Z_2 = diferencia de elevaciones entre el nivel del embalse y el borde superior del salto de esquí

También exponen que Damle, en 1966, usó la información obtenida de modelos y prototipos para presas de India, con saltos de esquí, y propuso la ecuación 3.22 con un mejor ajuste:

$$h_s + h_0 = 0.55(qH)^{0.5} \quad \text{Ec. 3.12}$$

donde: h_s = profundidad de erosión
 h_0 = profundidad del colchón de agua
 H = carga de agua
 q = caudal unitario

Al igual que Martin, los autores revelan que, basado en datos de prototipo, en presas de Taiwan, Chain, en 1973, propuso la ecuación 3.23:

$$h_s + h_0 = 1.18q^{0.51}H^{0.235} \quad \text{Ec. 3.13}$$

donde: h_s = profundidad de erosión
 h_0 = profundidad del colchón de agua
 H = carga de agua
 q = caudal unitario

Finalmente, detallan que Schoklitsch propuso la ecuación para 3.24 calcular la profundidad de erosión:

$$d_s = S + h_d = 4.75 \frac{H^{0.2}q^{0.5}}{d_{90}^{0.32}} \quad \text{Ec. 3.14}$$

donde: S = profundidad de erosión
 h_d = profundidad del colchón de agua
 H = carga de agua
 q = caudal unitario
 d_{90} = diámetro característico del material

Estas propuestas estuvieron basadas principalmente en investigaciones en modelos y prototipos, ajustándose mejor al propósito de la presente investigación.

3.2.4.2. Análisis de eficiencia de las ecuaciones h_s

Siguiendo lo propuesto por Heng, Tingsanchali y Suetsugi (2013), la eficiencia de cada ecuación h_s será evaluada con el NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency), que es el indicador más confiable para medir la dispersión entre series. Con un NSE superior a 0.50, la eficiencia de la ecuación utilizada es considerada más que satisfactoria.

Junto con el NSE, el error cuadrático medio (RMSE) y el error porcentual medio absoluto (MAPE) serán empleados para completar el análisis de eficiencia de cada ecuación.

La ecuación h_s más representativa será aquella que contenga el valor más alto de NSE y los valores más bajos de RMSE y MAPE.

Los indicadores NSE, RMSE y MAPE se calculan según las ecuaciones 3.24, 3.25 y 3.26, respectivamente:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{avg})^2} \quad \text{Ec. 3.15}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad \text{Ec. 3.16}$$

$$MAPE = 100 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \quad \text{Ec. 3.17}$$

Donde x_i es el h_s experimental, x_{avg} es el valor promedio experimental, y_i es el valor estimado de h_s con cada ecuación y n es el número de ensayos.

Capítulo 4

Caracterización de las condiciones generales de flujo del proyecto Chaglla

4.1. Introducción

Con la finalidad de garantizar la consistencia del modelo físico y la fidelidad de los resultados obtenidos se realizaron los ensayos correspondientes a las series 2A-2, 2A-3 y 2A-4, 2C y 2E.

4.2. Metodología de los ensayos

En el presente capítulo se describe el comportamiento hidráulico de las obras de excedencias y de la obra de toma para diversos caudales. Para ello se han elaborado cuadros de flujo que contienen información sobre los niveles de agua, velocidades y presiones.

Para un mejor análisis se procedió a investigar estructura por estructura, de ahí que la descripción de los ensayos y sus resultados se presenten tal como se procedió.

La incorporación de modificaciones en las estructuras ha sido considerada en caso fuese necesario.

4.2.1. Condiciones de flujo

Para caracterizar las líneas de corriente se vertió tinte tanto en la margen izquierda como derecha, y al centro del embalse, en diferentes secciones aguas arriba y aguas abajo. Los ensayos fueron registrados mediante videos y fotos.

4.2.2. Presiones en los túneles de vertedero

Las presiones han sido medidas en la entrada, a lo largo del túnel, a la salida y en los muros del salto de esquí. La ubicación de los piezómetros se muestra en las Figuras 16, 17 y 18.

4.2.2.1. Presiones en la entrada de los vertederos

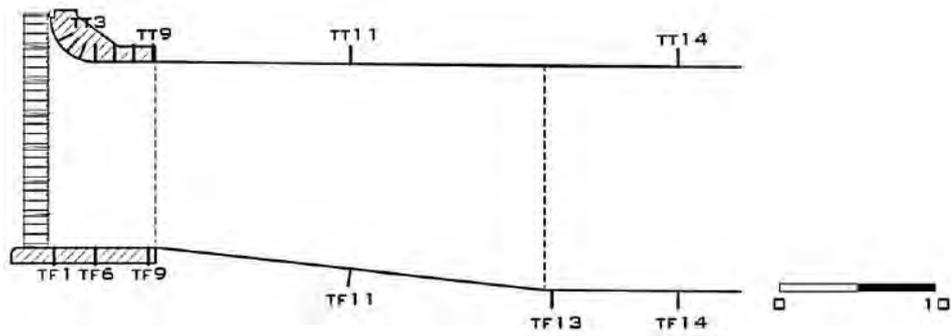


Figura 16. Ubicación de piezómetros de fondo y de techo en la entrada de los túneles

Fuente: Intertechne (2012)

4.2.2.2. Presiones en la salida de los vertederos

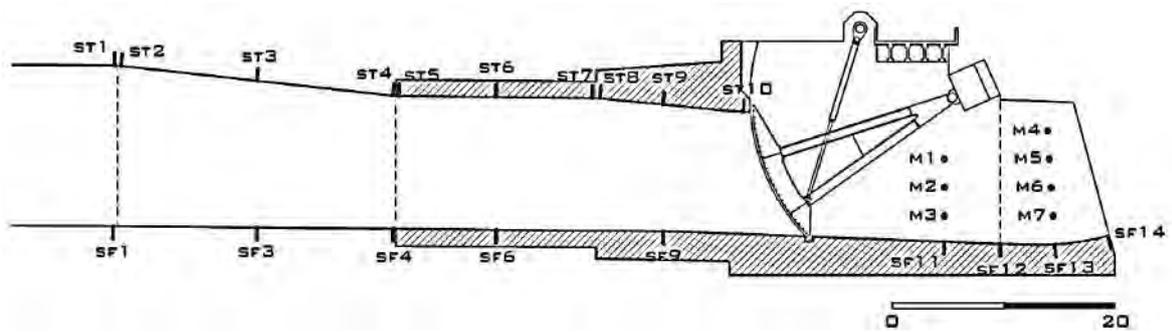
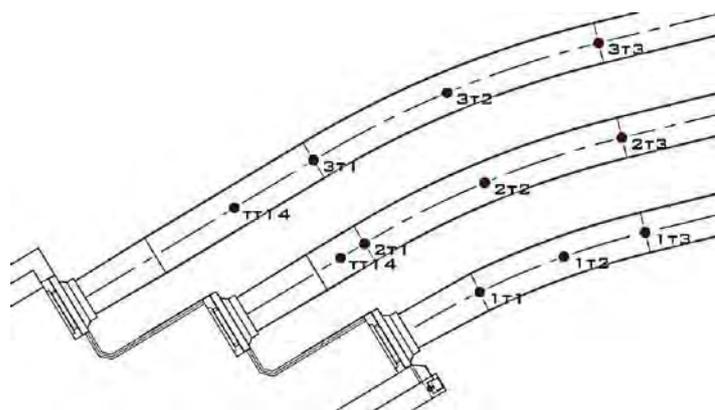


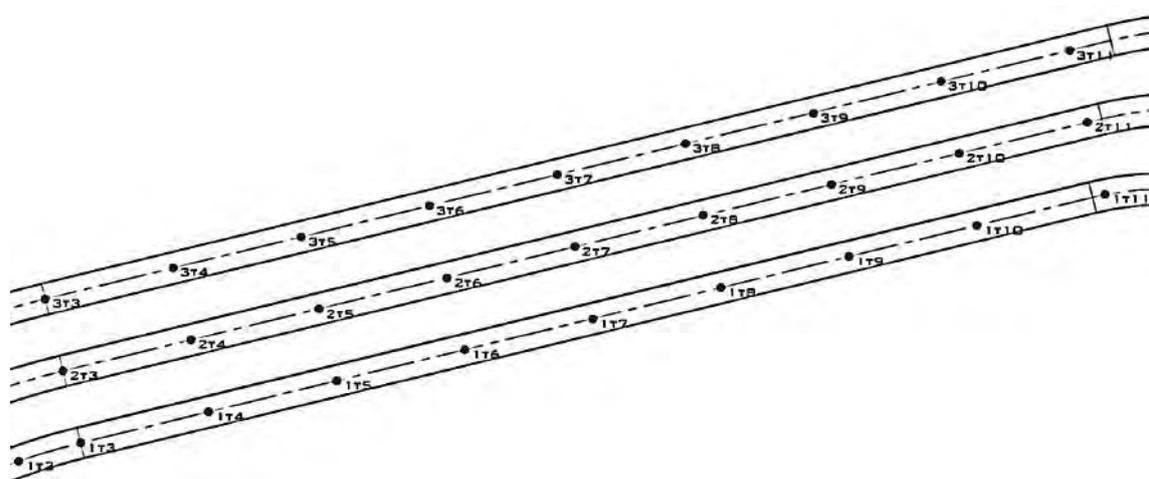
Figura 17. Ubicación de piezómetros de fondo, de techo y muros laterales en la salida de los túneles

Fuente: Intertechne (2012)

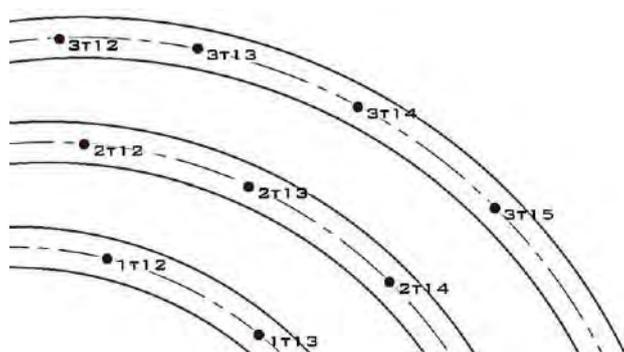
4.2.2.3. Presiones a lo largo del túnel



a)



b)



c)

Figura 18.

Ubicación de piezómetros a lo largo del túnel: a) parte curva de entrada, b) parte recta y c) curva de salida

Fuente: Intertechne (2012)

4.2.3. Niveles y velocidades

Se registraron los niveles aguas arriba en 16 puntos alineados al eje de cada túnel de vertedero y en 10 puntos frente a la toma (4 a cada lado y 2 al centro), tal como se muestra en las Figuras 19 y 20.

Los niveles aguas abajo fueron medidos en las secciones 58, 63, 65 y 68, tal como se muestra en la Figura 21.

Asimismo, se registraron las velocidades usando un correntómetro, en los puntos característicos antes señalados, siguiendo la metodología descrita en 3.2.2.2.

Los caudales fueron aforados con la información de niveles y velocidades levantada en la sección 63 y 65.

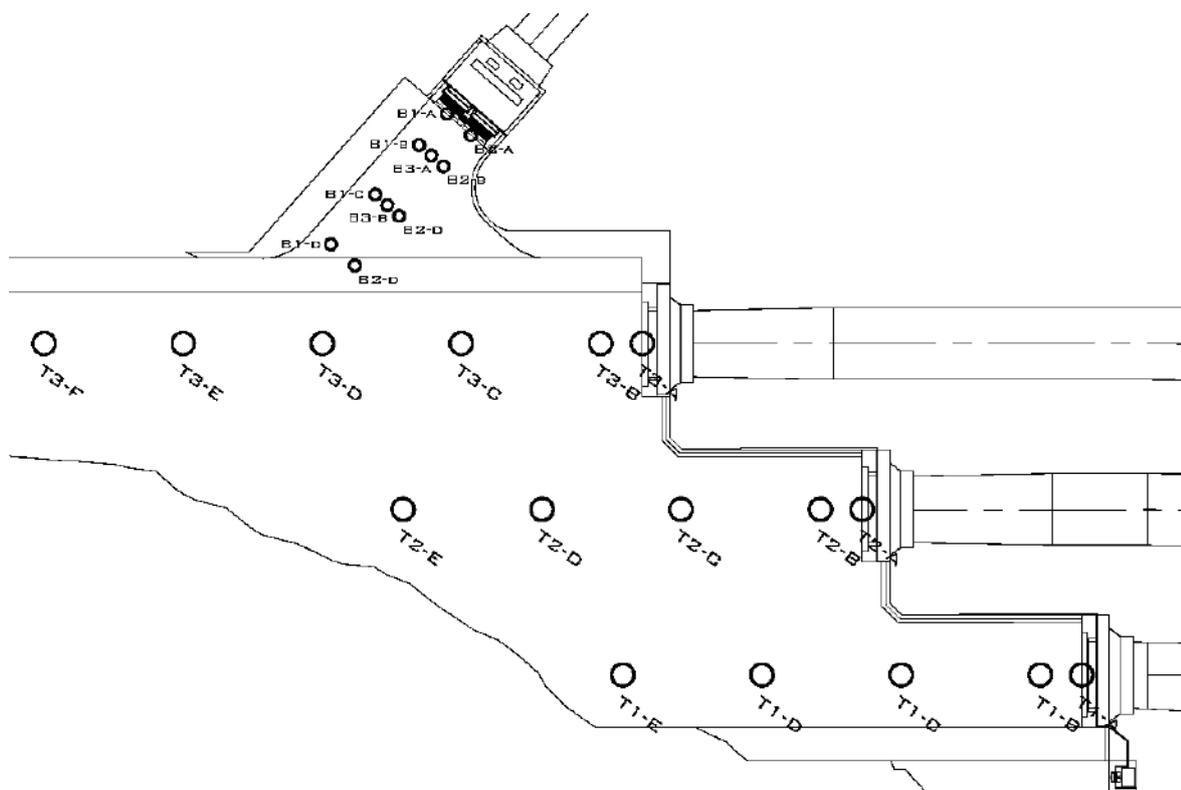


Figura 19. Puntos de medición de niveles a la entrada de los túneles (vista en planta)

Fuente: Intertechne (2012)

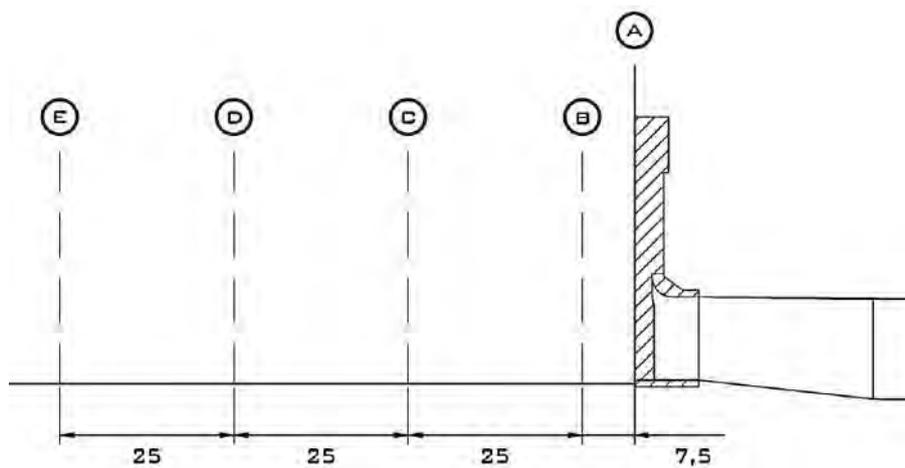


Figura 20. Puntos de medición de niveles a la entrada de los túneles (vista en perfil)

Fuente: Intertechne (2012)



Figura 21. Ubicación de las secciones 58 y 68 en el modelo

Fuente: Intertechne (2012)

4.2.4. Caracterización del chorro a la salida de los túneles de vertedero

Se evaluaron las características geométricas del chorro (alcance horizontal, ángulo de incidencia, etc.), usando los elementos de medición correspondientes: mira, cuadrícula, etc. Toda la información levantada contó con el respaldo de fotos y videos.

4.2.5. Descripción de vórtices

Para la descripción de los vórtices que pudieran presentarse durante los ensayos, se ha seguido la clasificación mostrada en la Tabla 16:

Tabla 16.		Clasificación de vórtices
Clasificación	Esbozo	Descripción
Clase I		Vórtice completamente desarrollado con núcleo de aire continuo
Clase II		Vórtice bien definido, con formación de núcleo aireado con arrastre profundo de burbujas de aire
Clase III		Depresión profunda, con núcleo bien definido, con arrastre de partículas flotantes
Clase IV		Depresión superficial con núcleo bien definido, visible con la ayuda de colorante
Clase V		Depresión poco profunda, núcleo no totalmente estable y alineamiento poco definido
Clase VI		Circulación superficial con una intensidad muy baja, sin depresión aparente, con núcleo visible con la ayuda de colorante
Clase VII		Movimiento de rotación, sin caracterizar la aceleración en la dirección del eje
Clase VIII		Circulación superficial solamente, sin transmitir en profundidad en cualquier forma

Fuente: IHHS (2014)

4.3. Serie 2A-2

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos correspondientes a la Serie 2A-2 para los caudales de 120 m³/s, 300 m³/s, 641 m³/s, 1832 m³/s, 2845 m³/s, 3621 m³/s y 5630 m³/s.

Los caudales de 4000 m³/s, 4500 m³/s y 5000 m³/s formaron parte de un grupo de ensayos adicionales solicitados por el diseñador para verificar valores intermedios de la curva de descarga. Estos resultados no forman parte del análisis de la presente investigación.

4.3.1. Serie 2A-2, Q = 120 m³/s

4.3.1.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, Q = 120 m³/s

El ensayo de la serie 2A-2, correspondiente al caudal de 120 m³/s, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas.

El nivel de operación establecido para alcanzar el caudal de 120 m³/s fue de 1162.5 m.s.n.m., medido con el limnómetro colocado en el eje de la presa.

4.3.1.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, Q = 120 m³/s

Presiones

El análisis de presiones no es un objetivo de la presente investigación. Consultar disponibilidad de la información con el IHHS de la Universidad de Piura.

Niveles y velocidades

El tirante no alcanza el nivel suficiente para medir las velocidades con el correntómetro, ni aguas arriba ni aguas abajo.

El registro de niveles se muestra en las Tablas 17 y 18.

Tabla 17.		Niveles y velocidades aguas arriba – $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$		
Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	Velocidad (m/s)
T1	A	1.25	1162.25	–
	B	2.15	1162.65	–
	C	2.05	1162.55	–
	D	2	1162.50	–
	E	2	1162.50	–
T2	A	1.25	1162.25	–
	B	2.1	1162.60	–
	C	2	1162.50	–
	D	2	1162.50	–
	E	–	–	–
T3	A	1.65	1162.65	–
	B	2.3	1162.80	–
	C	2.1	1162.60	–
	D	2.2	1162.70	–
	E	2.25	1162.75	–
	F	2.35	1162.85	–

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 18.		Niveles y velocidades aguas abajo – $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$		
Sección	Posición	Nivel de agua (msnm)	Velocidad (m/s)	
58	MI	997.5	–	
	EJE	997.5	–	
	MD	997.4	–	
68	MI	996.7	–	
	EJE	996.7	–	
	MD	996.7	–	

Fuente: IHHS (2014)

4.3.1.3. Análisis de resultados, Serie 2A-2, $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$

Condiciones de trabajo de los túneles

Bajo las condiciones del ensayo los túneles trabajaron a gravedad. Ver Figura 22.

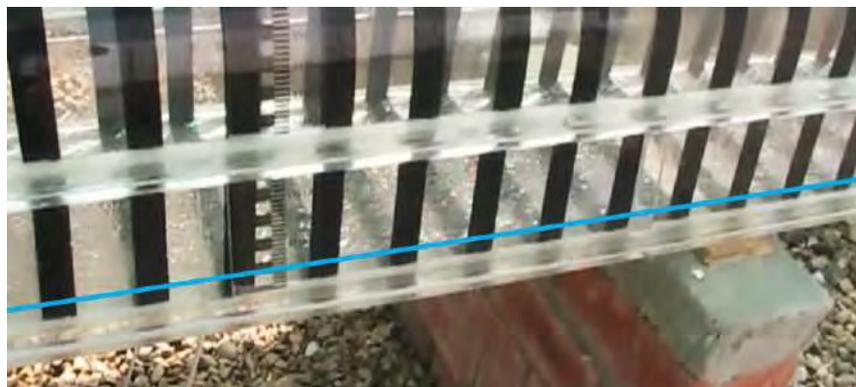


Figura 22. Trabajo de los túneles a gravedad para un caudal $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Condiciones de flujo

Al verter colorante en el cauce se pudo apreciar que prácticamente no existe movimiento de flujo desde la margen derecha y central. Sin embargo, desde la margen izquierda (Figura 23) se observa que el flujo se dirige hacia el eje de la presa, y desde ahí una parte se dirige hacia la entrada de los vertederos.



Figura 23. Líneas de corriente desde la margen izquierda del embalse – $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Presiones

Todas las presiones se presentaron por debajo del nivel establecido del embalse (1162.5 m.s.n.m.). Además, la caída de presión en cada túnel fue gradual.

Niveles y velocidades

Valores de velocidad no detectables.

Características del chorro

Los chorros a la salida de cada túnel se presentan bastante uniformes y todos caen en la grada marcada por el nivel 1130 m.s.n.m. Ver Figura 24.



Figura 24. Características del chorro: vista de perfil y frontal – $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

4.3.2. Serie 2A-2, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

4.3.2.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

El ensayo de la serie 2A-2, correspondiente al caudal de $300 \text{ m}^3/\text{s}$, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas.

El nivel de operación establecido para alcanzar el caudal de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ fue de 1163.85 m.s.n.m., medido con el limnómetro colocado en el eje de la presa.

4.3.2.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Presiones

El análisis de presiones no es un objetivo de la presente investigación. Consultar disponibilidad de la información con el IHHS de la Universidad de Piura.

Niveles y velocidades

A partir del caudal de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ el tirante alcanza el nivel suficiente para medir las velocidades aguas arriba, aunque solo a una profundidad de $0.6H$, medida desde el espejo de agua. Ver Tabla 19.

Tabla 19. Niveles y velocidades aguas arriba – $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T1	A	2.5	1163.5	0.5	–
				1.5	2.70
				2	–
	B	3.65	1164.15	0.73	–
				2.19	2.17
				2.92	–
	C	3.5	1164	0.7	–
				2.1	1.90
				2.8	–
	D	3.4	1163.9	0.68	–
				2.04	1.49
				2.72	–
	E	3.4	1163.9	0.68	–
				2.04	1.16
				2.72	–

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 19. Niveles y velocidades aguas arriba – $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ (continuación)

Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T2	A	2.25	1163.25	0.45	–
				1.35	2.65
				1.8	–
	B	3.6	1164.1	0.72	–
				2.16	1.69
				2.88	–
	C	3.3	1163.8	0.66	–
				1.98	1.32
				2.64	–
	D	3.4	1163.9	0.68	–
				2.04	0.96
				2.72	–
	E	3.4	1163.9	0.68	–
				2.04	0.48
				2.72	–
T3	A	2.5	1163.5	0.5	–
				1.5	2.47
				2	–
	B	3.75	1164.25	0.75	–
				2.25	1.45
				3	–
	C	3.5	1164	0.7	–
				2.1	1.02
				2.8	–
	D	3.65	1164.15	0.73	–
				2.19	0.76
				2.92	–
	E	3.65	1164.15	0.73	–
				2.19	no data
				2.92	–
F	3.65	1164.15	0.73	–	
			2.19	–	
			2.92	–	

Fuente: IHHS (2014)

Por otro lado, el tirante aguas abajo no alcanzó el nivel suficiente para registrar velocidades. Ver Tabla 20.

Tabla 20.		Niveles y velocidades aguas abajo – $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$	
Sección	Posición	Nivel de agua (msnm)	Velocidad (m/s)
58	MI	998.25	–
	EJE	998.1	–
	MD	997.95	–
68	MI	996.9	–
	EJE	996.95	–
	MD	997.1	–

Fuente: IHHS (2014)

4.3.2.3. Análisis de resultados, Serie 2A-2, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Condiciones de trabajo de los túneles

Bajo las condiciones del ensayo los túneles trabajaron a gravedad. Ver Figura 25.

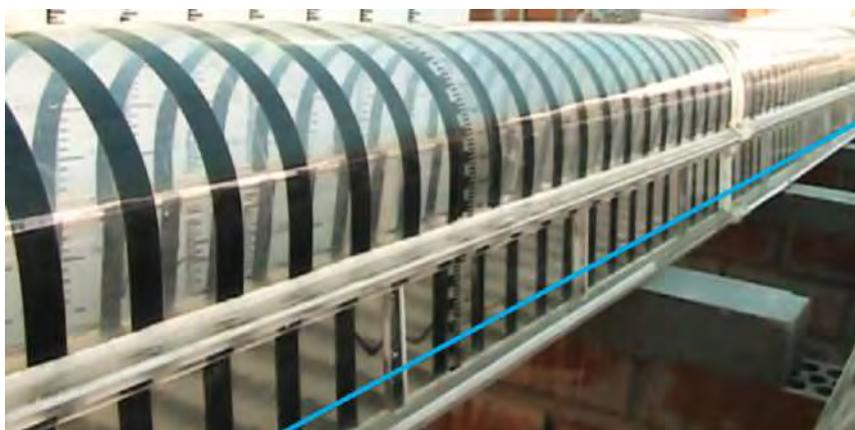


Figura 25. Trabajo de los túneles a gravedad para un caudal $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Condiciones de flujo

Al verter colorante en la margen izquierda del cauce se aprecia que el flujo se dirige en su totalidad hacia el túnel 3; luego, al aproximarse a la plataforma, siempre por la margen izquierda del cauce, se observó que el flujo se sigue dirigiendo hacia el túnel 3. Ver Figura 26.

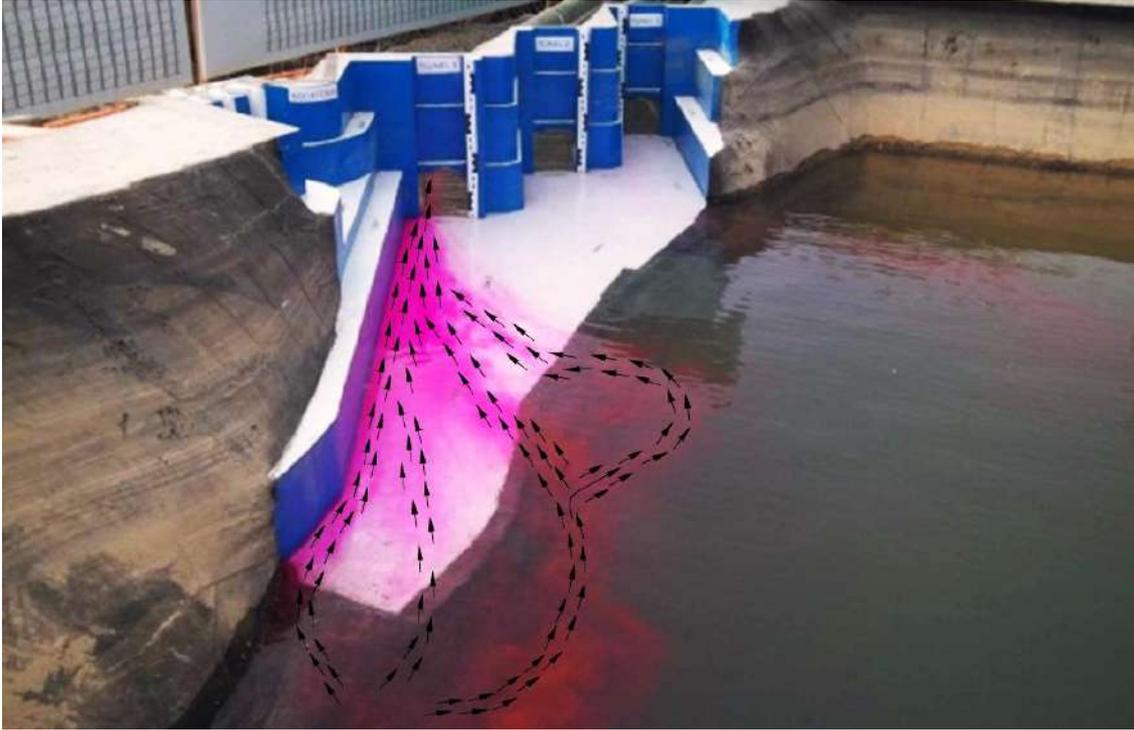


Figura 26. Líneas de corriente desde la margen izquierda hacia el túnel 3 – $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Posteriormente, se fue vertiendo colorante en varios puntos del lado derecho de la plataforma hasta encontrar aquellas líneas de flujo que se dirigían hacia cada uno de los túneles. En la Figura 27 se aprecian las líneas de corriente dirigidas hacia el túnel 2.

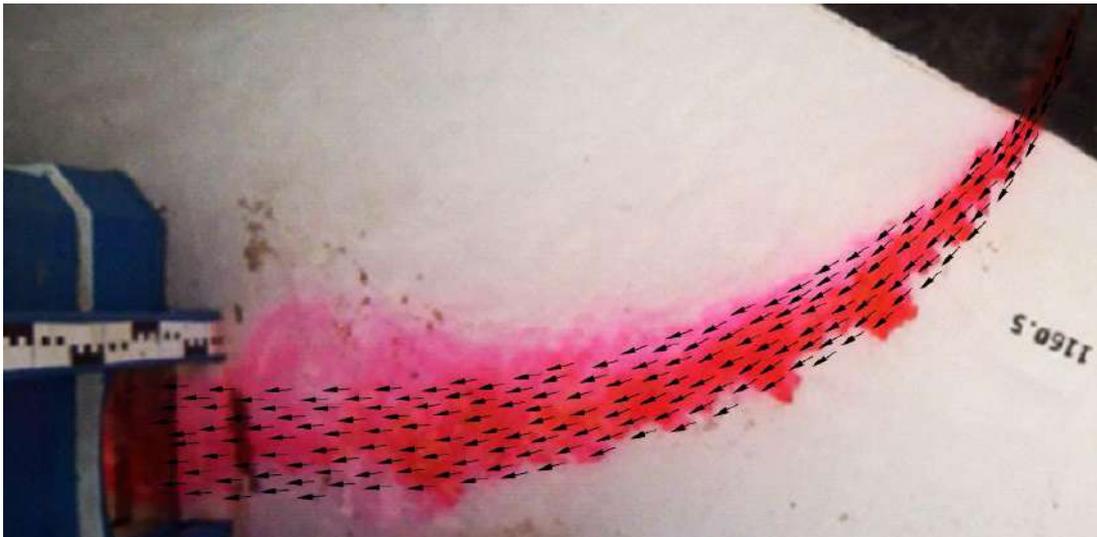


Figura 27. Líneas de corriente hacia el túnel 2 – $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Además, se pudo observar que en las líneas de corriente que se dirigen hacia el túnel 1 se generó un vórtice de eje vertical (ver Figura 28). Esta condición queda pendiente de verificación para caudales mayores.



Figura 28. Líneas de corriente hacia el túnel 1 – $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Las líneas de corriente aguas abajo se muestran en la Figura 29.



Figura 29. Líneas de corriente aguas abajo de la presa – $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Presiones

Todas las presiones se presentan por debajo del nivel del embalse establecido (1163.85 m.s.n.m.). Asimismo, la caída de presión en cada túnel fue gradual. A partir de este caudal, se obtuvieron datos de presiones para los muros de vertedero.

Niveles y velocidades

Las velocidades van en aumento a medida que el flujo se acerca a la entrada de cada túnel. Asimismo, las velocidades decrecen en la dirección del túnel 1 (2.70 m/s, a la entrada) hacia el túnel 3 (2.47 m/s, a la entrada).

Características del chorro

Los chorros a la salida de cada túnel se presentan bastante uniformes y todos caen en la grada marcada por el nivel 1120 m.s.n.m. Ver Figura 30.



Figura 30. Características del chorro: vista de perfil y frontal – $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

4.3.3. Serie 2A-2, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$

4.3.3.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$

El ensayo de la serie 2A-2, correspondiente al caudal de $641 \text{ m}^3/\text{s}$, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas.

El nivel de operación establecido para alcanzar el caudal de $641 \text{ m}^3/\text{s}$ fue de 1166.40 m.s.n.m., medido con el limnómetro colocado en el eje de la presa.

4.3.3.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$

Ver resultados en anexos.

4.3.3.3. Análisis de resultados, Serie 2A-2, Q = 641 m³/s

Bajo las condiciones del ensayo los túneles trabajaron a gravedad.

Todas las presiones se presentan por debajo del nivel del embalse establecido (1166.40 m.s.n.m.). Asimismo, la caída de presión en cada túnel fue gradual.

Las velocidades decrecen en la dirección del túnel 1 (3.84 m/s, a la entrada) hacia el túnel 3 (3.41 m/s, a la entrada). A partir de este caudal se pudieron registrar velocidades aguas abajo.

Los chorros a la salida de cada túnel se presentan bastante uniformes y todos caen en la grada marcada por el nivel 1090 m.s.n.m.

4.3.4. Serie 2A-2, Q = 1832 m³/s

4.3.4.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, Q = 1832 m³/s

El ensayo de la serie 2A-2, correspondiente al caudal de 1832 m³/s, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas.

El nivel de operación establecido para alcanzar el caudal de 1832 m³/s fue de 1170.95 m.s.n.m., medido con el limnómetro colocado en el eje de la presa.

4.3.4.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, Q = 1832 m³/s

Ver resultados en anexos.

4.3.4.3. Análisis de resultados, Serie 2A-2, Q = 1832 m³/s

Bajo las condiciones del ensayo los túneles trabajaron a gravedad.

Todas las presiones se presentan por debajo del nivel del embalse establecido (1170.95 m.s.n.m.). Asimismo, la caída de presión en cada túnel fue gradual.

A partir de este caudal se registraron velocidades en tres niveles de profundidad, en las secciones aguas arriba. Las velocidades decrecen en la dirección del túnel 1 (5.89 m/s, a la entrada) hacia el túnel 3 (4.60 m/s, a la entrada). Por otro lado, en las secciones aguas abajo solo se registraron velocidades en dos niveles de profundidad.

Los chorros a la salida de cada túnel se presentan bastante uniformes y todos caen entre las gradas marcadas por los niveles 1070 y 1060 m.s.n.m.

4.3.5. Serie 2A-2, Q = 2845 m³/s

4.3.5.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, Q = 2845 m³/s

El ensayo de la serie 2A-2, correspondiente al caudal de 2845 m³/s, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas.

El nivel de operación establecido para alcanzar el caudal de 2845 m³/s fue de 1174.75 m.s.n.m., medido con el limnómetro colocado en el eje de la presa.

4.3.5.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, Q = 2845 m³/s

Presiones

El análisis de presiones no es un objetivo de la presente investigación. Consultar disponibilidad de la información con el IHHS de la Universidad de Piura.

Niveles y velocidades

El registro de niveles y velocidades se muestra en las Tablas 21 y 22.

Tabla 21.		Niveles y velocidades aguas arriba – Q = 2845 m ³ /s			
Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T1	A	11.25	1172.25	2.25	7.50
				6.75	7.34
				9	6.98
	B	12.9	1173.4	2.58	5.37
				7.74	5.88
				10.32	5.50
	C	12.65	1173.15	2.53	3.70
				7.59	4.20
				10.12	5.20
	D	12.85	1173.35	2.57	4.96
				7.71	3.93
				10.28	3.20
E	14.15	1174.65	2.83	2.18	
			8.49	2.18	
				11.32	2.15

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 21. Niveles y velocidades aguas arriba – $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$ (continuación)

Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T2	A	12.25	1173.25	2.45	6.76
				7.35	5.94
				9.8	5.53
	B	13.85	1174.35	2.77	4.02
				8.31	4.08
				11.08	3.92
	C	14	1174.5	2.8	2.72
				8.4	2.75
				11.2	2.75
	D	14	1174.5	2.8	1.90
				8.4	1.77
				11.2	1.86
E	14.15	1174.65	2.83	1.47	
			8.49	1.59	
			11.32	1.62	
T3	A	12.65	1173.65	2.53	6.38
				7.59	5.57
				10.12	4.90
	B	14.2	1174.7	2.84	3.78
				8.52	3.50
				11.36	3.11
	C	14.15	1174.65	2.83	2.04
				8.49	1.99
				11.32	2.01
	D	14.3	1174.8	2.86	1.50
				8.58	1.49
				11.44	1.53
E	14.5	1175	2.9	1.15	
			8.7	1.13	
			11.6	1.15	
F	–	1175.05	–	–	
			–	–	
			–	–	

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 22.		Niveles y velocidades aguas abajo – $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$			
Sección	Posición	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
58	MI	9.05	1006.35	1.81	3.63
				5.43	4.40
				7.24	4.61
	EJE	6.6	1006.5	1.32	2.81
				3.96	4.08
				5.28	4.44
MD	10.3	1006.6	2.06	5.14	
			6.18	4.57	
			8.24	4.24	
68	MI	9.4	1006.35	1.88	4.73
				5.64	5.59
				7.52	5.79
	EJE	11.7	1007.2	2.34	4.44
				7.02	4.73
				9.36	4.77
MD	10.05	1006.85	2.01	4.69	
			6.03	4.24	
				8.04	3.26

Fuente: IHHS (2014)

4.3.5.3. Análisis de resultados, Serie 2A-2, $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$

Condiciones de trabajo de los túneles

Bajo las condiciones del ensayo los túneles trabajaron a gravedad. Ver Figura 31.



Figura 31. Trabajo de los túneles a gravedad – $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Condiciones de flujo

En las líneas de corriente que se dirigen hacia el túnel 1 (Figura 32) se puede apreciar –nuevamente– la presencia de un vórtice en la margen derecha de aproximación al túnel. Asimismo, en las líneas de flujo que se dirigen hacia el túnel 2 se ve claramente que el flujo se desplaza de derecha a izquierda (Figura 33). Finalmente, al igual que en ensayos anteriores, se observa que al verter colorante en la margen izquierda del embalse todo el flujo se dirige hacia el túnel 3 (Figura 34). No se vertió colorante en el cauce aguas abajo.



Figura 32. Líneas de corriente hacia el túnel 1 – $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)



Figura 33. Líneas de corriente hacia el túnel 2 – $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)



Figura 34. Líneas de corriente hacia el túnel 3 – $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Presiones

Todas las presiones se presentan por debajo del nivel del embalse establecido (1174.75 m.s.n.m.). Asimismo, la caída de presión en cada túnel fue gradual.

Niveles y velocidades

Las velocidades van aumentando a medida que el flujo se acerca a la entrada de cada túnel. Asimismo, las velocidades decrecen en la dirección del túnel 1 (7.50 m/s, a la entrada) hacia el túnel 3 (6.38 m/s, a la entrada). A la salida de los vertederos, la velocidad tiende a aumentar en dirección aguas abajo.

Características del chorro

Los chorros a la salida de cada túnel se presentan bastante uniformes y todos caen en la grada marcada por el nivel 1030 m.s.n.m. Además, a partir de este caudal se verifica que los chorros empiezan a impactar en las gradas laterales. Ver Figura 35.

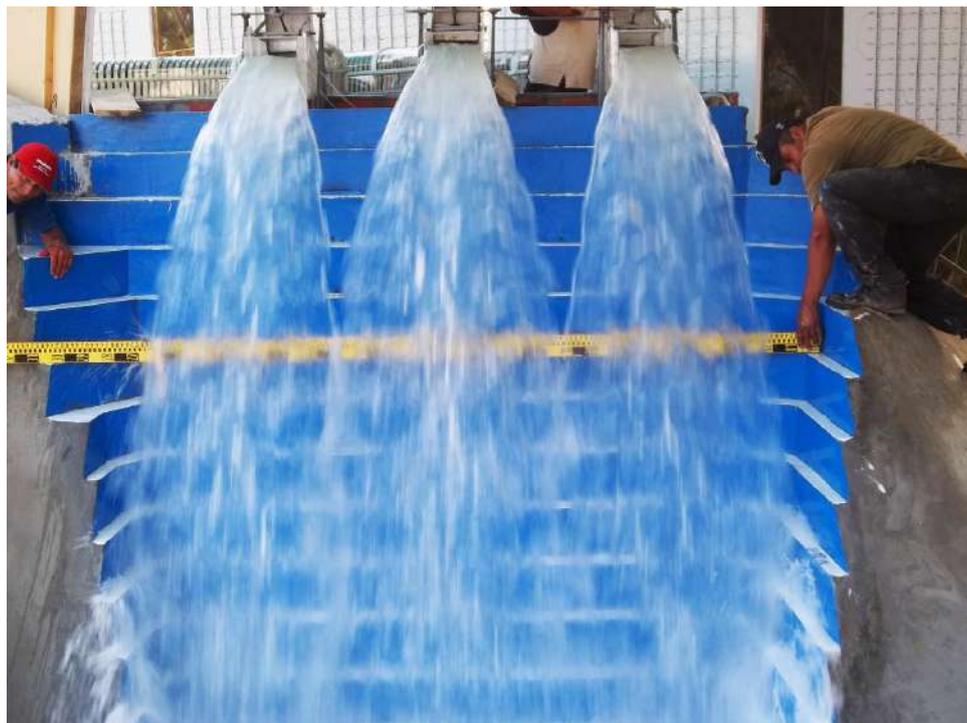


Figura 35. Características del chorro: vista frontal – $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

4.3.6. Serie 2A-2, $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$

4.3.6.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$

El ensayo de la serie 2A-2, correspondiente al caudal de $3621 \text{ m}^3/\text{s}$, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas.

El nivel de operación establecido para alcanzar el caudal de $3621 \text{ m}^3/\text{s}$ fue de 1179.90 m.s.n.m. , medido con el limnómetro colocado en el eje de la presa.

4.3.6.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$

Ver resultados en anexos.

4.3.6.3. Análisis de resultados, Serie 2A-2, $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$

Bajo las condiciones del ensayo los túneles trabajaron a gravedad.

Todas las presiones se presentan por debajo del nivel del embalse establecido (1179.90 m.s.n.m.). Asimismo, la caída de presión en cada túnel fue gradual.

Las velocidades decrecen en la dirección del túnel 1 (7.65 m/s, a la entrada) al túnel 3 (7.41 m/s, a la entrada). A la salida de los vertederos, la velocidad tiende a aumentar en dirección aguas abajo.

Los chorros a la salida de cada túnel se presentan bastante uniformes y todos caen entre las gradas marcadas por los niveles 1020 y 1010 m.s.n.m.

4.3.7. Serie 2A-2, Q = 4000 m³/s

4.3.7.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, Q = 4000 m³/s

El ensayo de la serie 2A-2, correspondiente al caudal de 4000 m³/s, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas.

El nivel de operación establecido para alcanzar el caudal de 4000 m³/s fue de 1183.20 m.s.n.m., medido con el limnómetro colocado en el eje de la presa.

4.3.7.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, Q = 4000 m³/s

Ver resultados en anexos.

4.3.7.3. Análisis de resultados, Serie 2A-2, Q = 4000 m³/s

A partir de este caudal los túneles trabajan a presión.

Todas las presiones se presentan por debajo del nivel del embalse establecido (1183.20 m.s.n.m.). Asimismo, la caída de presión en cada túnel fue gradual.

No se registraron niveles ni velocidades.

Los chorros impactan directamente sobre el cauce.

4.3.8. Serie 2A-2, Q = 4500 m³/s

4.3.8.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, Q = 4500 m³/s

El ensayo de la serie 2A-2, correspondiente al caudal de 4500 m³/s, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas.

El nivel de operación establecido para alcanzar el caudal de 4500 m³/s fue de 1188.30 m.s.n.m., medido con el limnómetro colocado en el eje de la presa.

4.3.8.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 4500 \text{ m}^3/\text{s}$

Presiones

El análisis de presiones no es un objetivo de la presente investigación. Consultar disponibilidad de la información con el IHHS de la Universidad de Piura.

Niveles y velocidades

En las secciones aguas arriba solo se registraron las velocidades a una profundidad de 0.6H, medida desde el espejo de agua. Ver Tabla 23.

Tabla 23.		Niveles y velocidades aguas arriba – $Q = 4500 \text{ m}^3/\text{s}$			
Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T1	A	27.8	1188.30	5.56	–
				16.68	9.50
				22.24	–
	B	27.8	1188.30	5.56	–
				16.68	4.83
				22.24	–
	C	27.8	1188.30	5.56	–
				16.68	3.92
				22.24	–
	D	27.8	1188.30	5.56	–
				16.68	2.88
				22.24	–
	E	27.8	1188.30	5.56	–
				16.68	1.79
				22.24	–

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 23. Niveles y velocidades aguas arriba – $Q = 4500 \text{ m}^3/\text{s}$ (continuación)

Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T2	A	27.8	1188.30	5.56	–
				16.68	8.44
				22.24	–
	B	27.8	1188.30	5.56	–
				16.68	4.28
				22.24	–
	C	27.8	1188.30	5.56	–
				16.68	1.86
				22.24	–
	D	27.8	1188.30	5.56	–
				16.68	1.75
				22.24	–
	E	27.8	1188.30	5.56	–
				16.68	1.46
				22.24	–
T3	A	27.8	1188.30	5.56	–
				16.68	8.30
				22.24	–
	B	27.8	1188.30	5.56	–
				16.68	3.79
				22.24	–
	C	27.8	1188.30	5.56	–
				16.68	1.74
				22.24	–
	D	27.8	1188.30	5.56	–
				16.68	1.51
				22.24	–
	E	27.8	1188.30	5.56	–
				16.68	1.24
				22.24	–
F	27.8	1188.30	5.56	–	
			16.68	1.11	
			22.24	–	

Fuente: IHHS (2014)

A partir de este ensayo se aforaron los caudales en las secciones 63 y 65, aguas abajo. Ver Tablas 24 y 25, y Figuras 36 y 37.

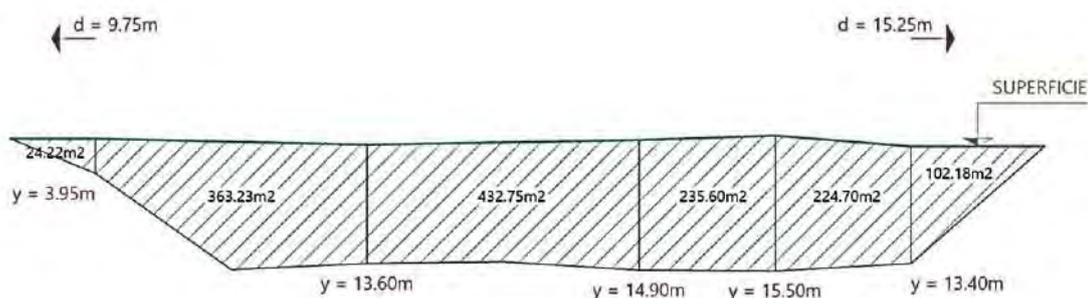


Figura 36. Aforo sección 63 – $Q = 4500 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 24. Aforo sección 63 – $Q = 4500 \text{ m}^3/\text{s}$

Punto	Tirante (m)	kH (m)	V (m/s)	Vp1 (m/s)	Vp2 (m/s)	A (m ²)	Q (m ³ /s)
MI	0	0	0	0			
		0.2H	–		0.75	24.22	18.17
1	3.95	0.4H	1.49	1.49	–	–	–
		0.8H	–		1.90	363.23	690.14
2	13.60	0.2H	2.55		–	–	–
		0.4H	2.43	2.31	–	–	–
		0.8H	1.96		3.34	432.75	1445.39
3	14.90	0.2H	4.68		–	–	–
		0.4H	4.53	4.36	–	–	–
		0.8H	3.87		4.61	235.60	1086.12
3'	15.50	0.2H	5.01		–	–	–
		0.4H	4.85	4.87	–	–	–
		0.8H	4.74		4.89	224.70	1098.78
4	13.40	0.2H	5.02		–	–	–
		0.4H	4.91	4.90	–	–	–
		0.8H	4.78		2.45	102.18	250.34
MD	0	0	0	0			
						Total:	4588.94

Fuente: IHHS (2014)

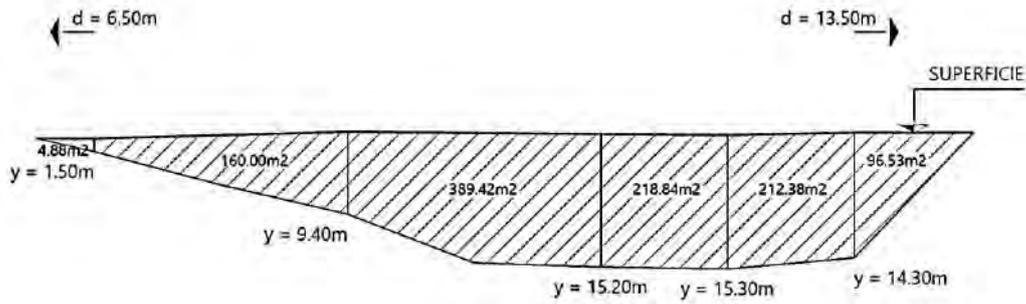


Figura 37. Aforo sección 65 – $Q = 4500 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 25. Aforo sección 65 – $Q = 4500 \text{ m}^3/\text{s}$

Punto	Tirante (m)	kH (m)	V (m/s)	Vp1 (m/s)	Vp2 (m/s)	A (m ²)	Q (m ³ /s)
MI	0	0	0	0			
1	1.50	0.2H	–		0	4.88	0
		0.4H	–	–	–	–	–
		0.8H	–		2.11	160	337.60
2	9.40	0.2H	4.19		–	–	–
		0.4H	4.26	4.22	–	–	–
		0.8H	4.19		4.61	389.42	1795.23
3	15.20	0.2H	5.06		–	–	–
		0.4H	5.20	4.99	–	–	–
		0.8H	4.72		5.14	218.84	1124.84
3'	15.30	0.2H	5.34		–	–	–
		0.4H	5.31	5.28	–	–	–
		0.8H	5.20		5.06	212.38	1074.64
4	14.30	0.2H	4.79		–	–	–
		0.4H	4.96	4.83	–	–	–
		0.8H	4.75		2.42	96.53	233.60
MD	0	0	0	0			
						Total:	4565.91

Fuente: IHHS (2014)

4.3.8.3. Análisis de resultados, Serie 2A-2, Q = 4500 m³/s

Condiciones de trabajo de los túneles

Bajo las condiciones del ensayo los túneles trabajaron a presión.

Condiciones de flujo

No se evaluaron las condiciones de flujo.

Presiones

Todas las presiones se presentan por debajo del nivel del embalse establecido (1188.30 m.s.n.m.). Asimismo, la caída de presión en cada túnel fue gradual.

Niveles y velocidades

Las velocidades van en aumento a medida que el flujo se acerca a la entrada de cada túnel. Asimismo, las velocidades decrecen en la dirección del túnel 1 (9.50 m/s a la entrada) hacia el túnel 3 (8.30 m/s a la entrada). A la salida de los vertederos, la velocidad tiende a aumentar en dirección aguas abajo.

Características del chorro

Los chorros impactan directamente sobre el cauce.

4.3.9. Serie 2A-2, Q = 5000 m³/s

4.3.9.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, Q = 5000 m³/s

El caudal de 5000 m³/s fue un ensayo adicional solicitado por la supervisión, correspondiente a la serie 2A-2. Este se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas.

El nivel de operación establecido para alcanzar el caudal de 5000 m³/s fue de 1194.25 m.s.n.m., medido con el limnómetro colocado en el eje de la presa.

4.3.9.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, Q = 5000 m³/s

Ver resultados en anexos.

4.3.9.3. Análisis de resultados, Serie 2A-2, $Q = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$

Bajo las condiciones del ensayo los túneles trabajaron a presión.

Todas las presiones se presentan por debajo del nivel del embalse establecido (1194.25 m.s.n.m.). Asimismo, la caída de presión en cada túnel fue gradual.

Las velocidades decrecen en la dirección del túnel 1 (9.30 m/s, a la entrada) hacia el túnel 3 (9.02 m/s, a la entrada). A la salida de los vertederos, la velocidad tiende a aumentar en dirección aguas abajo.

Los chorros impactan directamente sobre el cauce.

4.3.10. Serie 2A-2, $Q = 5630 \text{ m}^3/\text{s}$

4.3.10.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 5630 \text{ m}^3/\text{s}$

El ensayo de la serie 2A-2, correspondiente al caudal de 5630 m^3/s , se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas.

El nivel de operación establecido para alcanzar el caudal de 5630 m^3/s fue de 1202 m.s.n.m., medido con el limnómetro colocado en el eje de la presa.

4.3.10.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, $Q = 5630 \text{ m}^3/\text{s}$

Presiones

El análisis de presiones no es un objetivo de la presente investigación. Consultar disponibilidad de la información con el IHHS de la Universidad de Piura.

Niveles y velocidades

El registro de niveles, velocidades y aforos se muestra en las Tablas 26, 27 y 28, y las Figuras 38 y 39.

Tabla 26. Niveles y velocidades aguas arriba – $Q = 5630 \text{ m}^3/\text{s}$

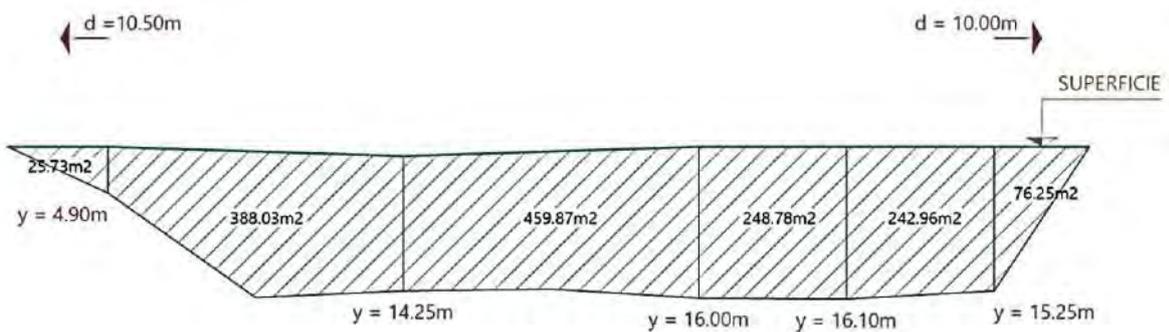
Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T1	A	41	1202	8.2	9.40
				24.6	3.01
				32.8	5.20
	B	41.5	1202	8.3	5.25
				24.9	3.70
				33.2	3.20
	C	41.5	1202	8.3	3.18
				24.9	3.35
				33.2	4.30
	D	41.5	1202	8.3	3.65
				24.9	3.35
				33.2	2.25
	E	41.5	1202	8.3	1.85
				24.9	2.35
				33.2	2.34
T2	A	41	1202	8.2	8.77
				24.6	2.38
				32.8	3.80
	B	41.5	1202	8.3	4.75
				24.9	2.26
				33.2	2.15
	C	41.5	1202	8.3	2.25
				24.9	2.16
				33.2	2.25
	D	41.5	1202	8.3	1.48
				24.9	1.64
				33.2	1.65
	E	41.5	1202	8.3	1.22
				24.9	1.95
				33.2	1.90

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 26. Niveles y velocidades aguas arriba – $Q = 5630 \text{ m}^3/\text{s}$ (continuación)

Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T3	A	41	1202	8.2	8.00
				24.6	2.13
				32.8	2.85
	B	41.5	1202	8.3	4.35
				24.9	2.09
				33.2	1.85
	C	41.5	1202	8.3	1.75
				24.9	1.64
				33.2	2.00
	D	41.5	1202	8.3	1.24
				24.9	1.45
				33.2	1.45
	E	41.5	1202	8.3	1.01
				24.9	1.55
				33.2	1.50
	F	41.5	1202	–	–
				–	–
				–	–

Fuente: IHHS (2014)

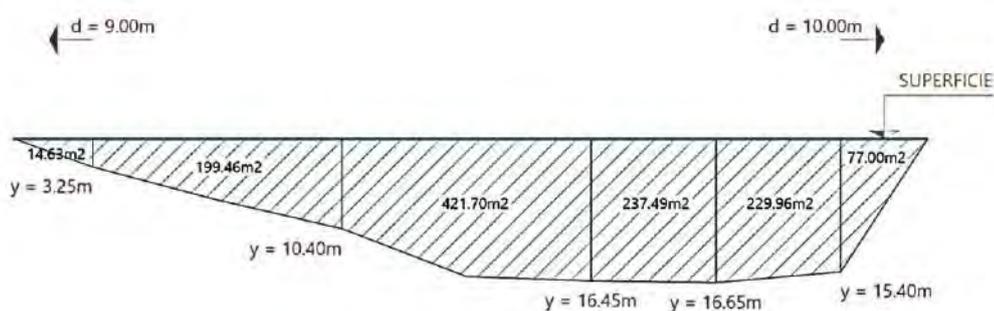
Figura 38. Aforo sección 63 – $Q = 5630 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 27. Aforo sección 63 – $Q = 5630 \text{ m}^3/\text{s}$

Punto	Tirante (m)	kH (m)	V (m/s)	Vp1 (m/s)	Vp2 (m/s)	A (m ²)	Q (m ³ /s)
MI	0	0	0	0			
					0.97	25.73	24.96
1	4.90	0.2H	2.69				
		0.4H	1.16	1.93	–	–	–
		0.8H	0.00				
2	12.25	0.2H	2.54		2.17	388.03	842.03
		0.4H	2.56	2.41	–	–	–
		0.8H	2.14				
3	16.00	0.2H	4.43		3.66	459.87	1683.12
		0.4H	5.01	4.91	–	–	–
		0.8H	5.28				
3'	16.10	0.2H	5.03		5.42	248.78	1348.39
		0.4H	6.24	5.93	–	–	–
		0.8H	6.52				
4	15.25	0.2H	5.41		6.04	242.96	1467.48
		0.4H	6.47	6.14	–	–	–
		0.8H	6.55				
MD	0	0	0	0	3.07	76.25	234.09
						Total:	5600.07

Fuente: IHHS (2014)

Figura 39. Aforo sección 65 – $Q = 5630 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 28.		Aforo sección 65 – Q = 5630 m ³ /s					
Punto	Tirante (m)	kH (m)	V (m/s)	Vp1 (m/s)	Vp2 (m/s)	A (m ²)	Q (m ³ /s)
MI	0	0	0	0			
		0.2H	–		0	14.63	0
1	3.25	0.4H	–	0		–	–
		0.8H	–				
		0.2H	4.61		2.28	199.46	454.77
2	10.40	0.4H	4.61	4.57	–	–	–
		0.8H	4.47				
		0.2H	5.82		5.23	421.70	2205.49
3	16.45	0.4H	6.03	5.90	–	–	–
		0.8H	5.86				
		0.2H	5.75		6.07	237.49	1441.56
3'	16.65	0.4H	6.42	6.24	–	–	–
		0.8H	6.56				
		0.2H	5.93		6.3	229.96	1448.75
4	15.40	0.4H	6.52	6.35	–	–	–
		0.8H	6.59				
MD	0	0	0	0	3.17	77.00	244.09
						Total:	5794.06

Fuente: IHHS (2014)

4.3.10.3. Análisis de resultados, Serie 2A-2, Q = 5630 m³/s

Condiciones de trabajo de los túneles

Bajo las condiciones del ensayo los túneles trabajaron a presión.

Condiciones de flujo

Al igual que en algunos ensayos anteriores se sigue observando la formación de un vórtice a la entrada del túnel 1 (Figura 40).

Las líneas de corriente dirigidas hacia los túneles 2 y 3 se muestran en las Figuras 41 y 42.



Figura 40. Vórtice de eje vertical en la entrada del túnel 1 – $Q = 5630 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)



Figura 41. Líneas de corriente hacia el túnel 2 – $Q = 5630 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

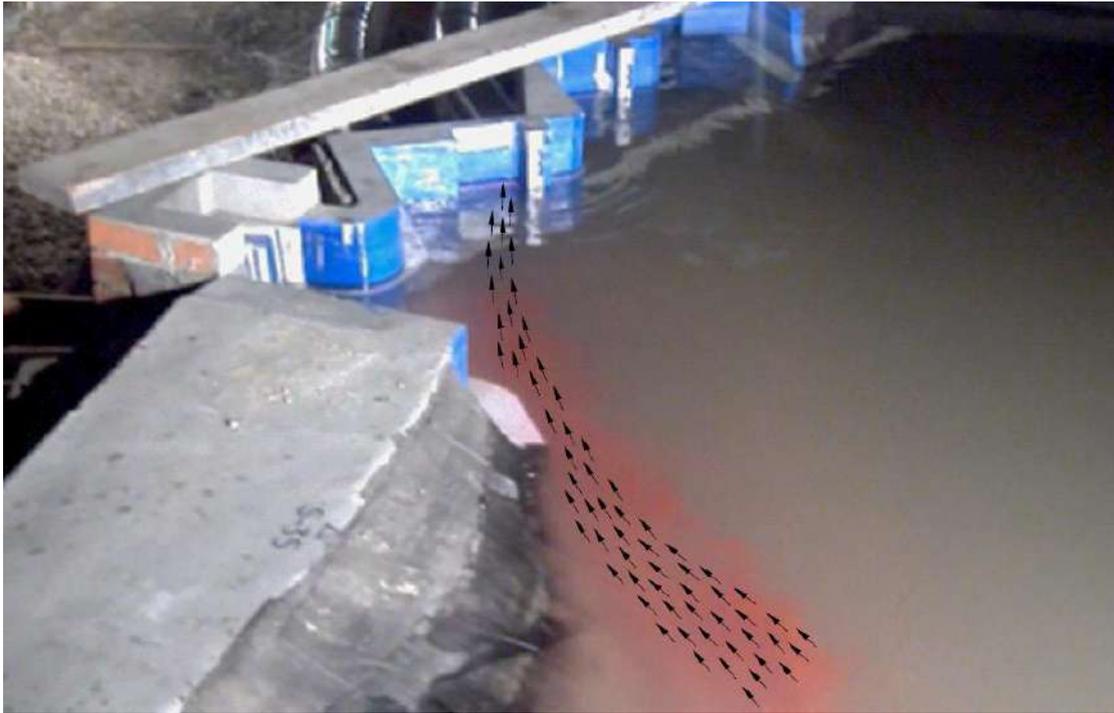


Figura 42. Líneas de corriente hacia el túnel 3 – $Q = 5630 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Presiones

La mayoría de presiones sobrepasa el nivel de techo de los túneles debido a que estos trabajan a presión.

Niveles y velocidades

Las velocidades van en aumento a medida que el flujo se aproxima a la entrada de cada túnel. Asimismo, las velocidades decrecen en la dirección del túnel 1 (9.40 m/s a la entrada) hacia el túnel 3 (8.00 m/s a la entrada). A la salida de los vertederos, la velocidad tiende a aumentar en dirección aguas abajo.

Características del chorro

Los chorros impactan directamente sobre el cauce. Ver Figura 43.



Figura 43. Características del chorro – $Q = 5630 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

4.3.11. Análisis de resultados de la Serie 2A-2

4.3.11.1. Curva de descarga de las estructuras

Los resultados obtenidos (Tabla 29) muestran que la curva de descarga obtenida en modelo físico (Figura 44) confirman los cálculos teóricos elaborados por el laboratorio para la construcción del modelo.

Tabla 29. Caudal en prototipo vs Nivel en el embalse – Serie 2A-2

Caudal en prototipo (m ³ /s)	Nivel en el embalse
120	1162.5
300	1163.85
641	1166.4
1832	1170.95
2845	1174.75
3621	1179.9
4000	1183.2
4500	1188.3
5000	1194.25
5630	1202

Fuente: IHHS (2014)

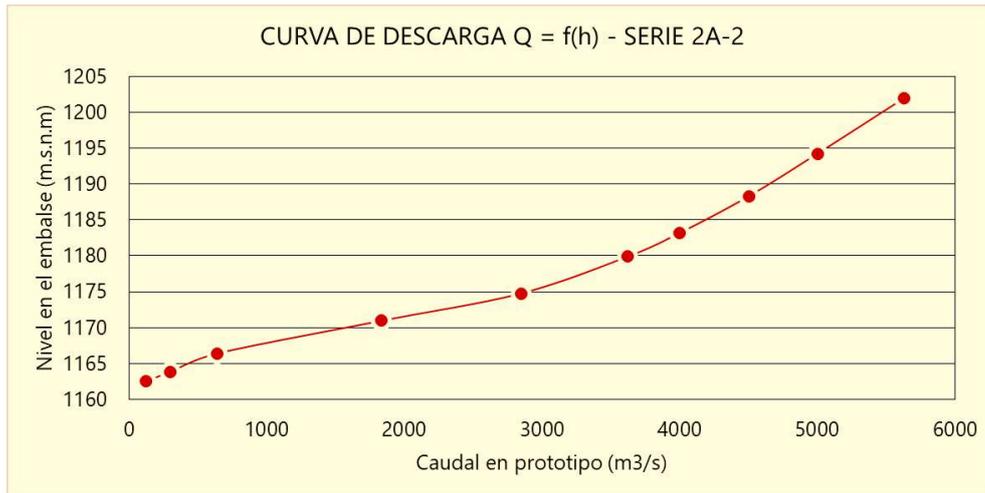


Figura 44. Curva de descarga de los vertederos – Serie 2A-2

Fuente: IHHS (2014)

4.3.11.2. Velocidades

En las Figuras 45 a 49 se representa la variación de velocidades por sección y nivel de profundidad, para cada caudal ensayado.

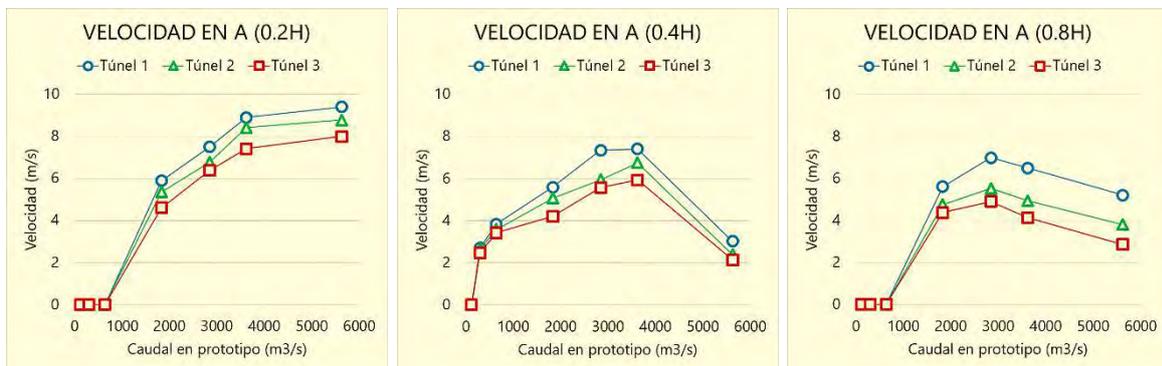


Figura 45. Variación de las velocidades en la sección A – Serie 2A-2

Fuente: IHHS (2014)

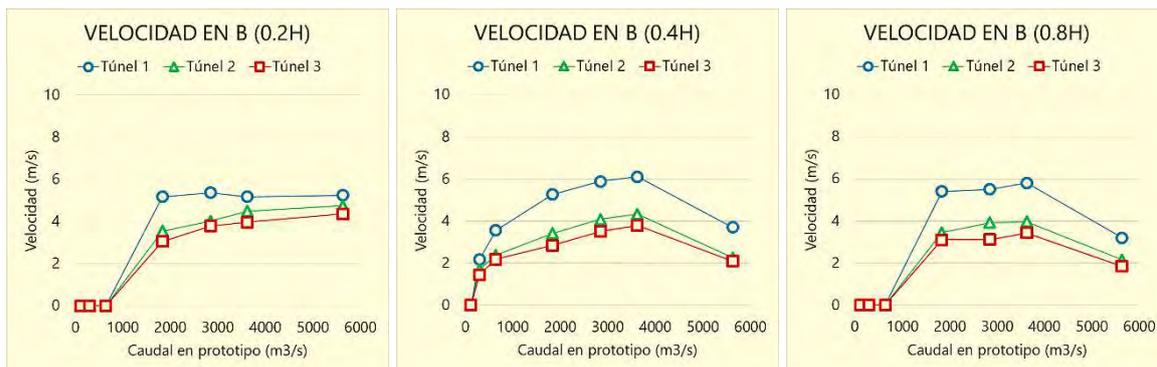


Figura 46. Variación de las velocidades en la sección B – Serie 2A-2

Fuente: IHHS (2014)

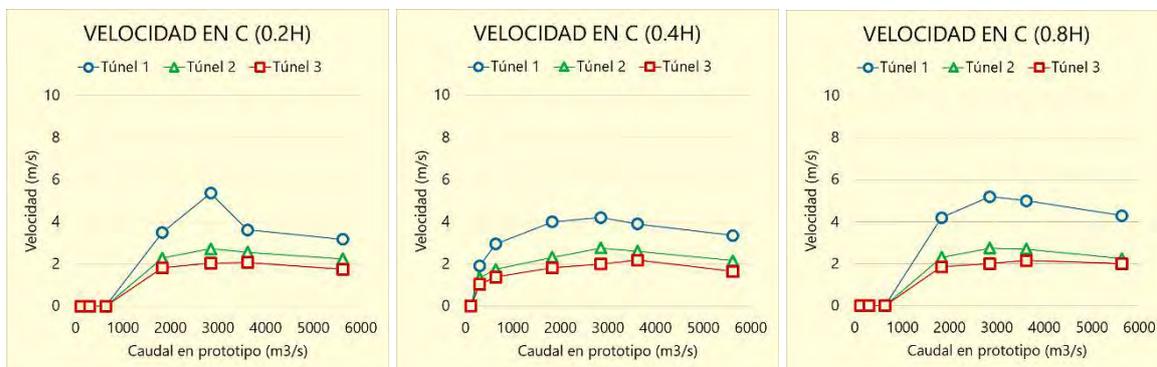


Figura 47. Variación de las velocidades en la sección C – Serie 2A-2

Fuente: IHHS (2014)

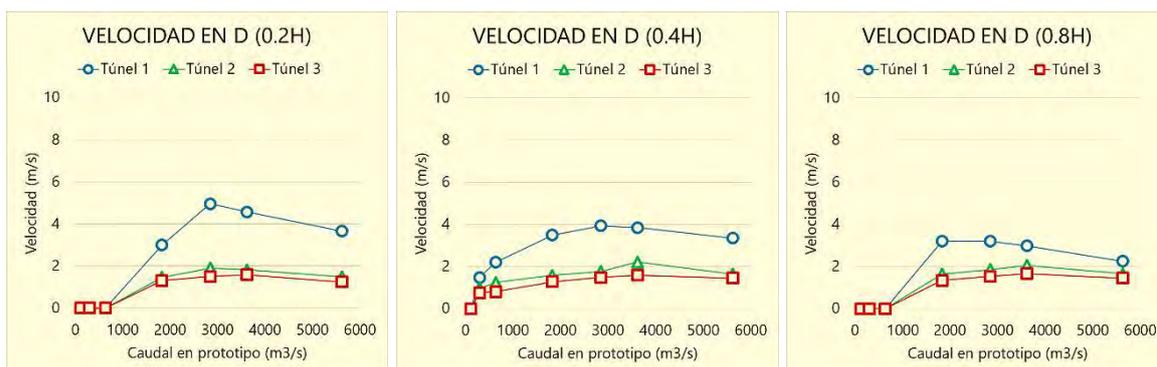


Figura 48. Variación de las velocidades en la sección D – Serie 2A-2

Fuente: IHHS (2014)

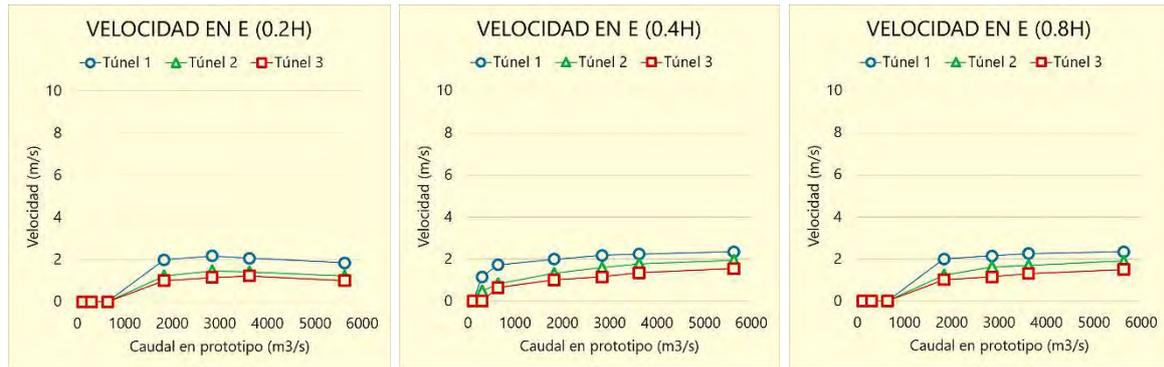


Figura 49.

Variación de las velocidades en la sección E – Serie 2A-2

Fuente: IHHS (2014)

Se puede observar que –aguas arriba– las velocidades disminuyen en dirección del túnel 1 (el más cercano a la presa) hacia el túnel 3 (el más cercano a la toma).

Además, las velocidades tienden a disminuir en las zonas más alejadas (sección E, por ejemplo) a la entrada de los túneles de vertedero (sección A).

4.3.11.3. Chorro

A partir del caudal 2845 m³/s los chorros de los túneles 1 y 3 empiezan a impactar en las gradas laterales.

4.4. Serie 2A-3

4.4.1. Serie 2A-3, Q = 30.9 m³/s

4.4.1.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-3, Q = 30.9 m³/s

El ensayo de la serie 2A-3, correspondiente al caudal de 30.9 m³/s, se realizó con la toma abierta y las compuertas de los túneles de vertedero completamente cerradas.

El nivel de operación se mantuvo constante e igual a 1196 m.s.n.m. Asimismo, se estableció una pérdida de carga igual a 4.02 metros.

4.4.1.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-3, Q = 30.9 m³/s

La información de niveles y velocidades se muestra en la Tabla 30.

Tabla 30. Niveles y velocidades en la entrada de la bocatoma – $Q = 30.9 \text{ m}^3/\text{s}$

Sección	Tirante (m)	kH (m)	Velocidad (m/s)
B1-A	16	3.2	0.41
		9.6	0.51
		12.8	0.49
B1-B	16	3.2	0.38
		9.6	0.41
		12.8	0.40
B1-C	16	3.2	0.00
		9.6	0.00
		12.8	0.33
B1-D	16	3.2	0.00
		9.6	0.00
		12.8	0.00
B2-A	14.5	2.9	0.42
		8.7	0.52
		11.6	0.53
B2-B	16	3.2	0.41
		9.6	0.44
		12.8	0.44
B2-C	16	3.2	0.00
		9.6	0.35
		12.8	0.35
B2-D	16	3.2	0.00
		9.6	0.00
		12.8	0.00
B3-A	16	3.2	0.00
		9.6	0.38
		12.8	0.37
B3-B	16	3.2	0.00
		9.6	0.00
		12.8	0.00

Fuente: IHHS (2014)

4.4.1.3. Análisis de resultados, Serie 2A-3, $Q = 30.9 \text{ m}^3/\text{s}$

Condiciones de flujo

En las Figuras 50 y 51 se muestran las líneas de corriente dirigidas hacia la bocatoma. Se verificó la ausencia de vórtices.



Figura 50. Líneas de corriente desde la margen izquierda hacia la bocatoma – $Q = 30.9 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)



Figura 51. Líneas de corriente desde la margen derecha hacia la bocatoma – $Q = 30.9 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Niveles y velocidades

Las velocidades disminuyen en la dirección de A (sección más cercana a la toma) hacia D (sección más alejada). Asimismo, no existe diferencia significativa entre las velocidades medidas en los ejes 1 y 2.

4.4.2. Serie 2A-3, $Q = 154.2 \text{ m}^3/\text{s}$

4.4.2.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-3, $Q = 154.2 \text{ m}^3/\text{s}$

El ensayo de la serie 2A-3, correspondiente al caudal de $154.2 \text{ m}^3/\text{s}$, se realizó con la toma abierta y las compuertas de los túneles de vertedero completamente cerradas.

Se estableció una pérdida de carga igual a 41.09 metros. Asimismo, el nivel de operación se mantuvo constante e igual a 1196 m.s.n.m.

4.4.2.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-3, $Q = 154.2 \text{ m}^3/\text{s}$

La información de niveles y velocidades se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31. Niveles y velocidades en la entrada de la bocatoma – $Q = 154.2 \text{ m}^3/\text{s}$

Sección	Tirante (m)	kH (m)	Velocidad (m/s)
B1-A	16	3.2	0.54
		9.6	0.71
		12.8	0.69
B1-B	16	3.2	0.51
		9.6	0.54
		12.8	0.64
B1-C	16	3.2	0.44
		9.6	0.45
		12.8	0.54
B1-D	16	3.2	0.39
		9.6	0.00
		12.8	0.44
B2-A	14.5	2.9	0.56
		8.7	0.72
		11.6	0.72
B2-B	16	3.2	0.55
		9.6	0.59
		12.8	0.66

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 31. Niveles y velocidades en la entrada de la bocatoma – $Q = 154.2 \text{ m}^3/\text{s}$ (continuación)

Sección	Tirante (m)	kH (m)	Velocidad (m/s)
B2-C	16	3.2	0.49
		9.6	0.46
		12.8	0.48
B2-D	16	3.2	0.39
		9.6	0.38
		12.8	0.42
B3-A	16	3.2	0.37
		9.6	0.47
		12.8	0.47
B3-B	16	3.2	0.00
		9.6	0.36
		12.8	0.40

Fuente: IHHS (2014)

4.4.2.3. Análisis de resultados, Serie 2A-3, $Q = 154.2 \text{ m}^3/\text{s}$

Condiciones de flujo

En las Figuras 52 y 53 se muestran las líneas de corriente dirigidas hacia la bocatoma. Se verificó la ausencia de vórtices.



Figura 52. Líneas de corriente desde la margen derecha hacia la bocatoma – $Q = 154.2 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)



Figura 53. Líneas de corriente desde la margen izquierda hacia la bocatoma – $Q = 154.2 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Niveles y velocidades

Las velocidades disminuyen en la dirección de A (sección más cercana a la toma) hacia D (sección más alejada). Asimismo, no existe diferencia significativa entre las velocidades medidas en los ejes 1 y 2.

4.4.3. Análisis de resultados de la Serie 2A-3

Se verificó que la toma tiene la capacidad de captar los caudales previstos para las condiciones de operación previstas por el diseñador.

No se presentaron vórtices en la entrada de la bocatoma.

Al mayor caudal le corresponden las mayores velocidades.

4.5. Serie 2A-4

4.5.1. Condiciones de los ensayos

Tal como se indicó en la sección 2.2.2.1, los ensayos correspondientes a la serie 2A-4 se realizan con la toma abierta, el nivel del embalse en el NAMO (1196 m.s.n.m.) y aberturas simétricas de las compuertas del aliviadero de excedencias que permitan pasar un caudal de $152.72 \text{ m}^3/\text{s}$ a través de la toma, respecto a los caudales totales de 354.1, 641, 1276 y $1832 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.5.2. Resultados de los ensayos

Ver en anexos.

4.5.3. Análisis de resultados de la Serie 2A-4

La toma tiene la capacidad para captar los caudales previstos en operación conjunta con los aliviaderos de excedencias.

Las aberturas necesarias de la toma se encuentran en los rangos previstos por los diseñadores. Ver Figura 54.

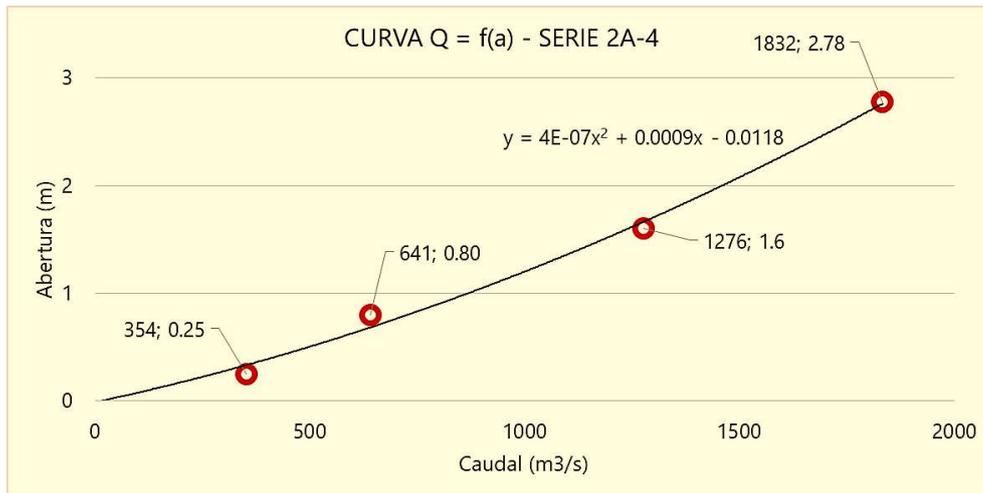


Figura 54. Curva $Q = f(a)$ – Serie 2A-4

Fuente: IHHS (2014)

Se verificó la presencia de pequeños vórtices; sin embargo, se espera que no generen mayores inconvenientes en la toma debido a su magnitud.

4.6. Serie 2C

4.6.1. Condiciones de los ensayos

Las indicadas en la sección 2.2.2.3.

4.6.2. Resultados de los ensayos

Ver resultados en anexos.

4.6.3. Análisis de resultados de la Serie 2C

Para aberturas menores a 4 metros se pudo verificar la ausencia de vórtices. Sin embargo, para aberturas de 4 y 6 metros se observó la formación de un vórtice de clase V frente al túnel 3 (Figura 55); para la abertura de 8 metros, clase IV; para la abertura de 9 metros, clase III; y para la abertura de 10 metros, clase I (Figura 56). No obstante, se espera que no generen mayores inconvenientes en la toma debido a su magnitud.

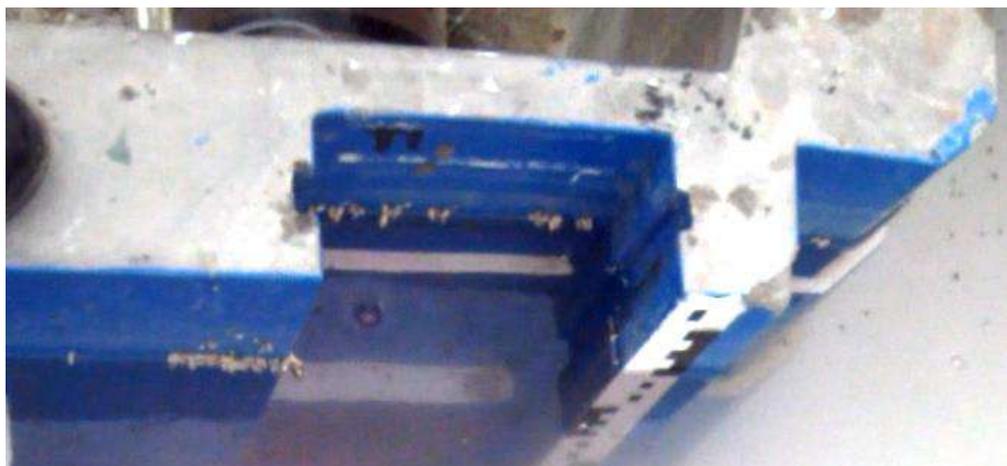


Figura 55. Formación de vórtice clase V a la entrada del túnel 3 – Abertura 4 m – 1195.6 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)



Figura 56. Formación de vórtice clase I a la entrada del túnel 3 – Abertura 10 m – 1196 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Los valores de abertura obtenidos experimentalmente siguen la tendencia esperada, en comparación con los cálculos teóricos. Ver Tabla 32 y Figura 57.

Tabla 32. Relación abertura-nivel-caudal – Serie 2C

Abertura (m)	Nivel (m.s.n.m.)	Caudal aforado (m³/s)
0.25	1195	225
	1195.4	230
	1196	236
0.50	1195	430
	1195.7	435
	1196	440
1.00	1195	647
	1195.5	652
	1196	658
2.00	1195	1415
	1195.4	1445
	1195.6	1450
	1196	1470
4.00	1195	2630
	1195.6	2650
	1195.8	2658
	1196	2665
6.00	1195	3270
	1195.8	3315
	1196	3325
8.00	1195	3850
	1195.2	3860
	1196	3900
9.00	1195	4200
	1195.6	4230
	1196	4250
10.00	1195	4475
	1195.8	4500
	1196	4520

Fuente: IHHS (2014)

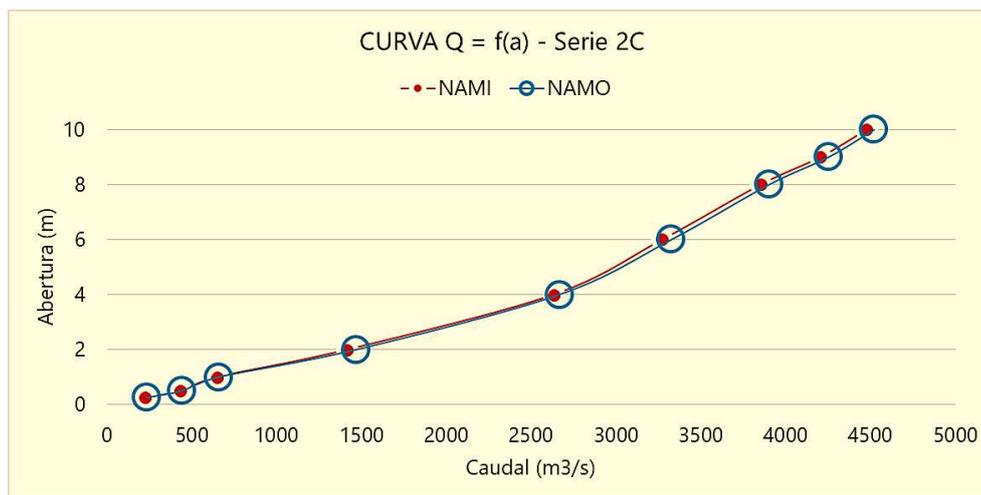


Figura 57. Curva Q = f(a) – Serie 2C

Fuente: IHHS (2014)

A las mayores aberturas le corresponden las mayores velocidades, tanto aguas arriba como aguas abajo.

Todos los chorros impactan en el cauce.

4.7. Serie 2E

4.7.1. Condiciones de los ensayos

Las indicadas en la sección 2.2.2.5.

4.7.2. Resultados de los ensayos

Ver en anexos.

4.7.3. Análisis de resultados de la Serie 2E

4.7.3.1. Curva de descarga de las estructuras

En la Tabla 33 se resumen los caudales aforados para cada una de las aberturas, según los niveles ensayados.

De este modo se verifica que el caudal transportado aumenta ligeramente al aumentar el nivel en el embalse.

Tabla 33.		Relación abertura-nivel-caudal – Serie 2E – aberturas parciales				
Abertura	Túnel 1		Túnel 2		Túnel 3	
	Nivel	Caudal	Nivel	Caudal	Nivel	Caudal
0.25	1195	68	1195	56	1195	80
	1195.5	73	1195.5	60	1195.5	85
	1196	78	1196	64	1196	90
0.50	1195	145	1195	126	1195	156
	1195.4	147	1195.5	132	1195.5	162
	1196	150	1196	138	1196	167
1.00	1195	274	1195	257	1195	286
	1195.6	277	1195.3	267	1195.5	290
	1196	280	1196	277	1196	295
2.00	1195	478	1195	469	1195	480
	1195.5	482	1195.5	483	1195.5	486
	1196	488	1196	496	1196	490
4.00	1195	800	1195	850	1195	830
	1195.5	815	1195.5	865	1195.8	842
	1196	830	1196	880	1196	845
6.00	1195	1200	1195	1245	1195	1250
	1195.7	1230	1195.5	1260	1195.5	1275
	1196	1245	1196	1275	1196	1290
8.00	1195	1630	1195	1550	1195	1600
	1195.5	1650	1195.5	1575	1195.5	1613
	1196	1665	1196	1600	1196	1625
9.00	1195	1795	1195	1760	1195	1775
	1195.6	1815	1195.6	1780	1195.5	1790
	1196	1840	1196	1800	1196	1810
10.00	1195	1975	1195	1900	1195	1955
	1195.5	1990	1195.6	1916	1195.5	1973
	1196	2005	1196	1930	1196	1990

Fuente: IHHS (2014)

Luego, al construir las curvas de descarga (Figura 58 y 59), aparentemente no existen diferencias significativas en los caudales transportados por cada túnel para un nivel determinado; entonces, para constatarlo se construyeron las curvas de descarga para cada abertura, tal como se muestra en las Figuras 60 y 61.

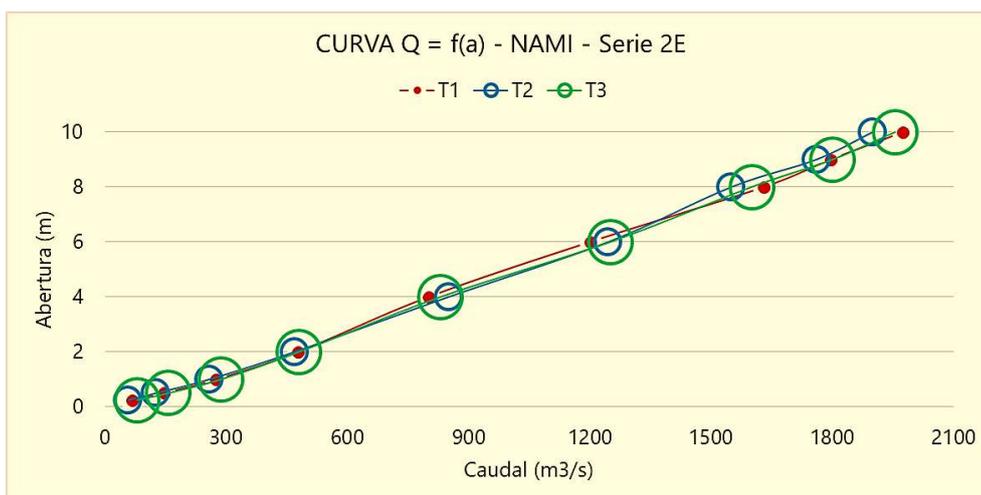


Figura 58. Curva Q = f(a) - NAMI - Serie 2E

Fuente: IHHS (2014)

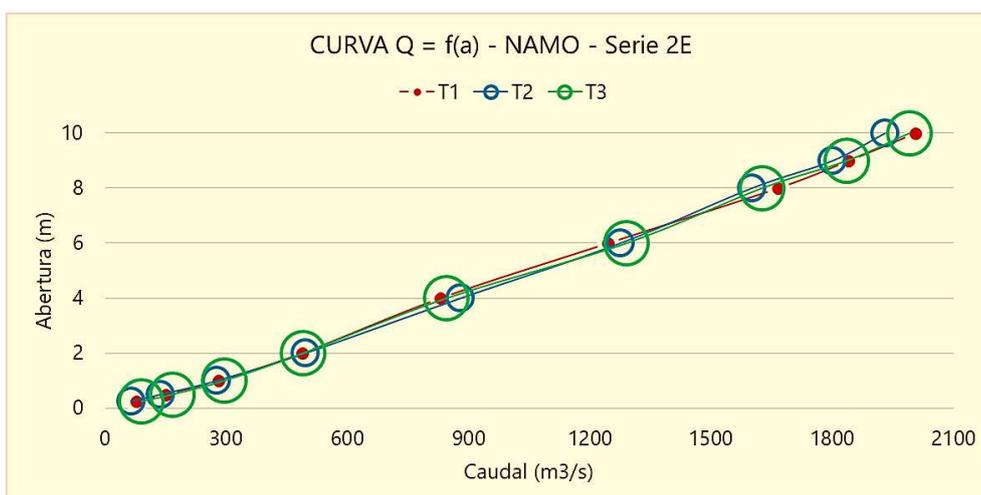


Figura 59. Curva Q = f(a) - NAMO - Serie 2E

Fuente: IHHS (2014)

Así, por ejemplo, se puede verificar que para aberturas menores (0.25, 0.50 y 1 m), el túnel 3 tiene la mayor capacidad de transporte, entre 12 y 26 m³/s más que los otros túneles. Ver Figura 60.

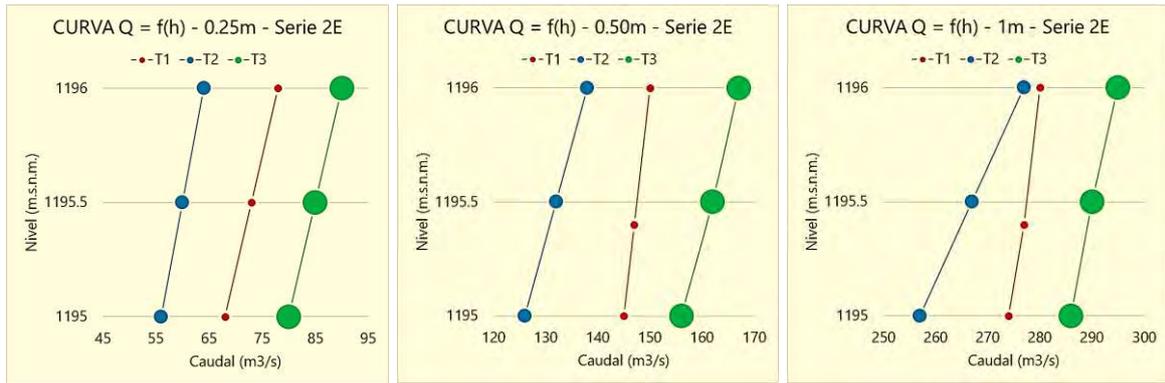


Figura 60. Capacidad de transporte para aberturas menores: 0.25, 0.50 y 1m - Serie 2E

Fuente: IHHS (2014)

Por otro lado, para aberturas mayores (8, 9 y 10m), el túnel 1 tiene la mayor capacidad de transporte, entre 20 y 40 m³/s más que los otros túneles. Ver Figura 61.

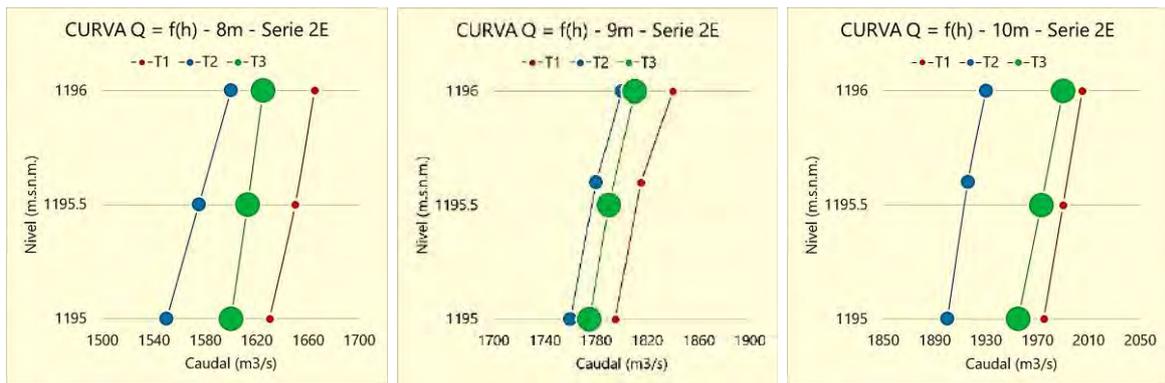


Figura 61. Capacidad de transporte para aberturas mayores: 8, 9 y 10m- Serie 2E

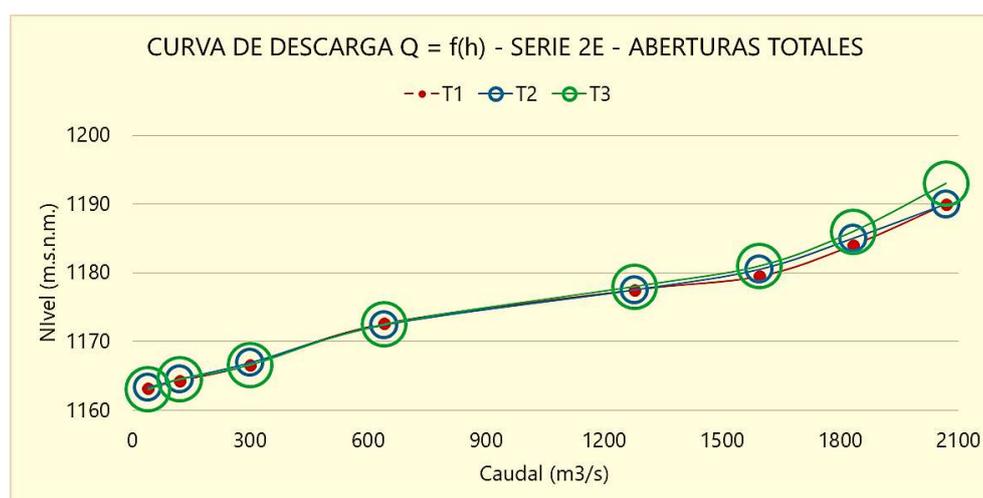
Fuente: IHHS (2014)

Finalmente, según la información mostrada en la Tabla 34 y la Figura 62, en general, se puede verificar que para transportar un mismo caudal el túnel 3 exige un mayor nivel en el embalse. Esto se justifica en el hecho de que éste es el túnel de mayor longitud y por lo tanto las pérdidas de carga son mayores. Lo contrario sucede con el túnel 1, que al ser el más corto requiere un menor nivel en el embalse para transportar el mismo caudal.

Tabla 34. Relación abertura-nivel-caudal – Serie 2E – aberturas totales

Caudal (m ³ /s)	Nivel (msnm)		
	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
40	1163.2	1163.3	1163
120	1164.3	1164.5	1164.5
300	1166.6	1166.9	1166.6
641	1172.6	1172.4	1172.5
1276	1177.5	1177.5	1178
1595	1179.5	1180.5	1181
1832	1184	1185	1186
2068	1190	1190	1193

Fuente: IHHS (2014)

Figura 62. Curva de descarga $Q = f(h)$ - Serie 2E - aberturas totales

Fuente: IHHS (2014)

4.7.3.2. Velocidades

A las mayores aberturas/caudales le corresponden las mayores velocidades, tanto aguas arriba como aguas abajo.

4.7.3.3. Chorro

Para las mayores aberturas/caudales el chorro del túnel 3 impacta sobre las gradas laterales.

Capítulo 5

Erosión en poza disipadora

5.1. Introducción

El presente capítulo comprende el estudio de los resultados obtenidos de los ensayos realizados con lecho móvil aguas abajo de la presa, correspondientes a la serie 3.

5.2. Objetivo de la investigación

El principal objetivo de estos ensayos es evaluar los efectos erosivos aguas abajo de la presa causada por el flujo del aliviadero de excedencias.

5.3. Modificaciones en las estructuras

5.3.1. Modificación de las gradas

El laboratorio Intertechne solicitó una modificación en las gradas, a la salida del aliviadero de excedencias, debido a que el flujo proveniente de los túneles 1 y 3 impactaba sobre las paredes laterales de la estructura, según lo expresado en 4.3.11.3 y 4.7.3.3. Dicha modificación contempló la abertura de las gradas laterales, tal como se puede apreciar en las Figuras 63 y 64.

Además, se realizó la demolición del lecho fijo a la salida de los túneles de vertedero y se procedió a la colocación de sedimentos en la poza disipadora según lo especificado en 5.3.2.

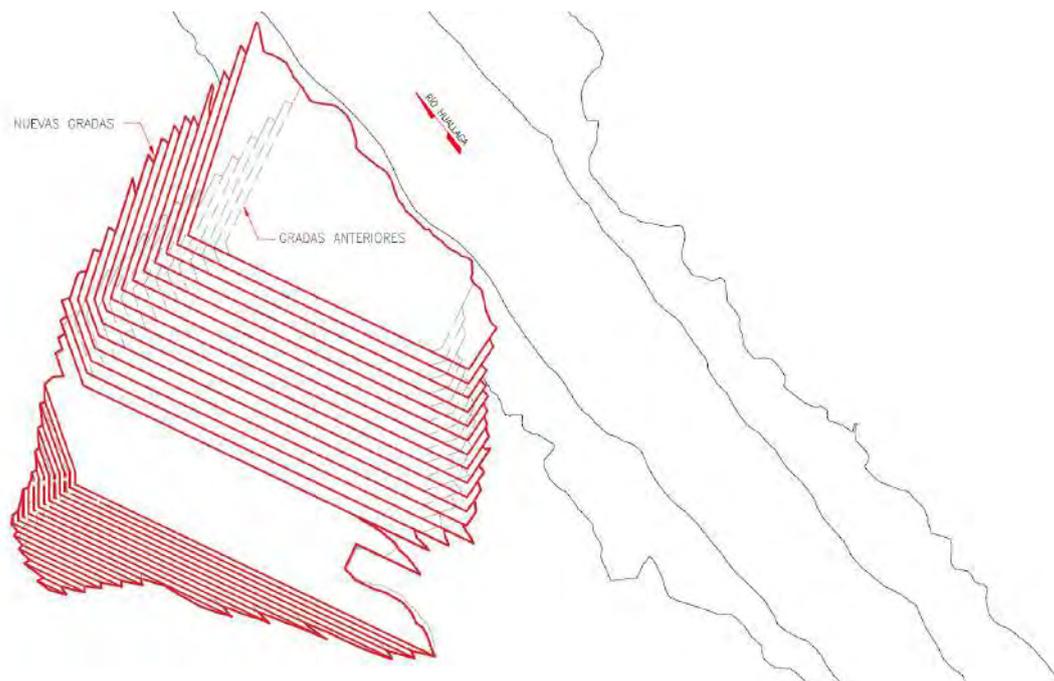


Figura 63. Modificación de las gradas

Fuente: IHHS (2014)



Figura 64. Disposición de las nuevas gradas y colocación de sedimentos en poza disipadora

Fuente: IHHS (2014)

5.3.2. Sedimentos en poza disipadora

La poza disipadora se construyó con una profundidad de 40 metros (80 centímetros en modelo) y ancho variable. Se colocaron dos tipos de sedimentos: roca correspondiente a un $D_{50} = 0.5$ m. y arena correspondiente a la curva granulométrica del cauce del río, según especificación. Los materiales se depositaron de acuerdo a lo indicado en los planos enviados por Intertechne (Figura 65 y 66).

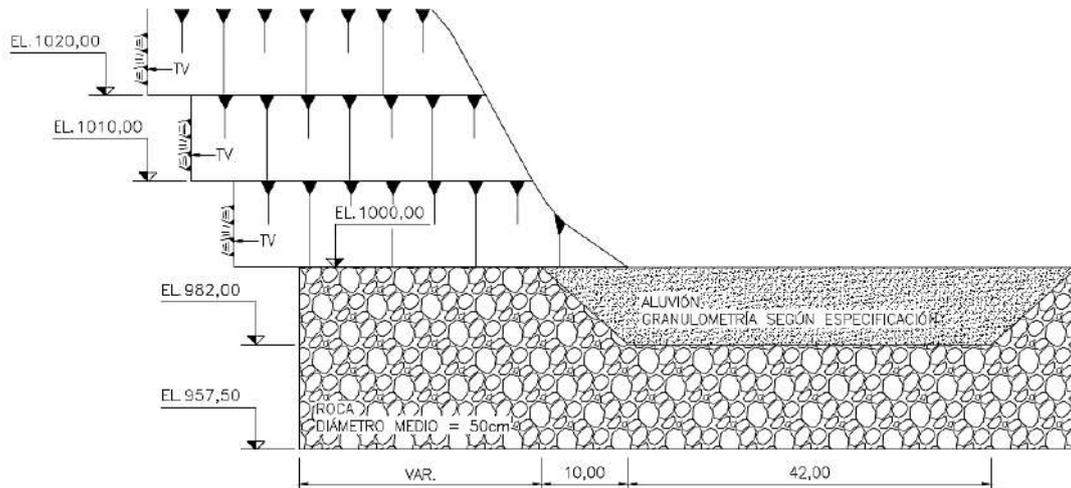


Figura 65. Disposición de sedimentos en la poza disipadora

Fuente: Intertechne (2012)



Figura 66. a) Colocación y b) disposición final de sedimentos en la poza disipadora

Fuente: IHHS (2014)

5.4. Metodología de los ensayos

Los ensayos con fondo móvil han sido hechos con materiales granulares no cohesivos, y dispuestos de acuerdo a la distribución descrita en el apartado anterior.

5.4.1. Condiciones para cada ensayo

El nivel aguas abajo para cada ensayo se ajustó de acuerdo a la ecuación 2.1, mostrada en 2.2.3

Los niveles de agua se establecieron en la sección 3 (ver Figura 21 en 4.2.3), ubicada aguas abajo de las graderías, aproximadamente a 100 metros aguas arriba de la sección 68 (sección de control para ensayos anteriores).

Se ensayaron los siguientes caudales: 300 m³/s, 641 m³/s, 1276 m³/s, 1832 m³/s, 2068 m³/s, 2845 m³/s y 3621 m³/s, siempre con el embalse en el nivel de operación (NAMO: 1196 m.s.n.m.).

Los ensayos para cada caudal fueron realizados en forma secuencial, es decir, la configuración del cauce erosionado para un determinado ensayo ha sido mantenida como condición inicial del ensayo con caudal mayor siguiente.

5.4.2. Presiones

Las presiones han sido medidas en la entrada, a lo largo del túnel, a la salida y en los muros del salto de esquí, tal como se hiciera en ensayos anteriores.

5.4.3. Caracterización del flujo de descarga de los túneles

Según lo especificado en 4.2.4.

5.4.4. Erosión de la poza disipadora

Se evaluó la erosión de la poza disipadora después de cada ensayo trazando curvas de nivel *in situ* y registrando niveles en 80 puntos de la poza disipadora (ver malla en Figura 67).

Para fines de la presente investigación se levantaron 4 cortes: los ejes de cada túnel (D, F y H) y el eje del río Huallaga (7).

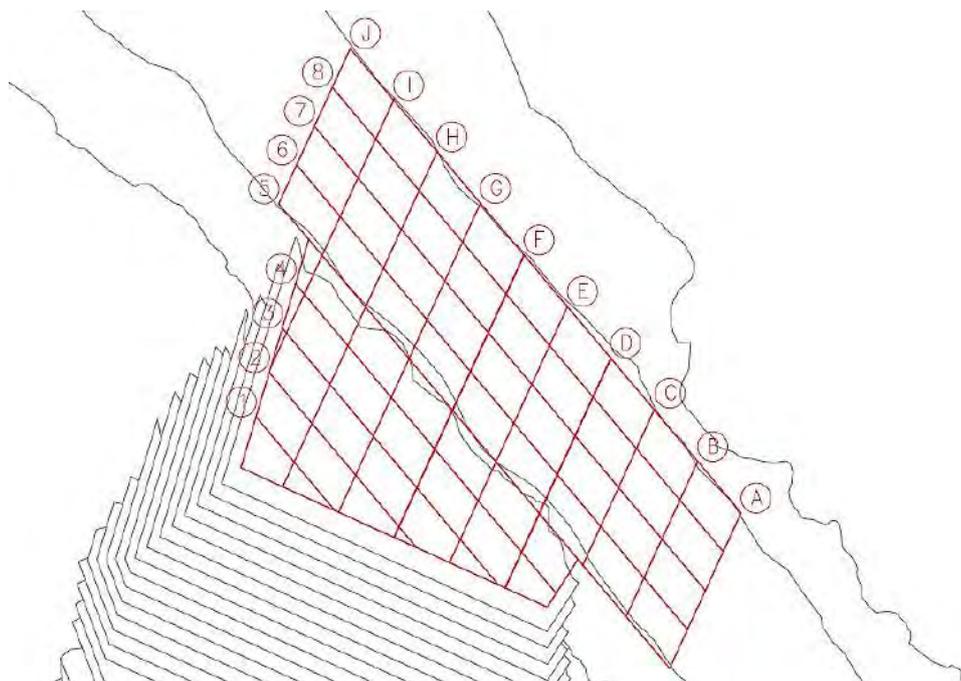


Figura 67. Malla de erosión en la poza disipadora

Fuente: IHHS (2014)

5.5. Resultados de la Serie 3

5.5.1. Serie 3, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

5.5.1.1. Condiciones del ensayo, Serie 3, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Este ensayo correspondiente a la serie 3, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos parcialmente abiertas. Se estableció una abertura de compuertas de 0.30 m, necesaria para hacer pasar un caudal de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ a través de los túneles.

5.5.1.2. Resultados del ensayo, Serie 3, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Presiones

El análisis de presiones no es un objetivo de la presente investigación. Consultar disponibilidad de la información con el IHHS de la Universidad de Piura.

Erosión en poza disipadora

La configuración de la poza disipadora al final del ensayo se muestra en la Figura 68.



Figura 68. Curvas de nivel de la poza disipadora erosionada – $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Los cortes a lo largo de los ejes de cada túnel y a lo largo del eje del río se muestran en las Figuras 69 y 70.

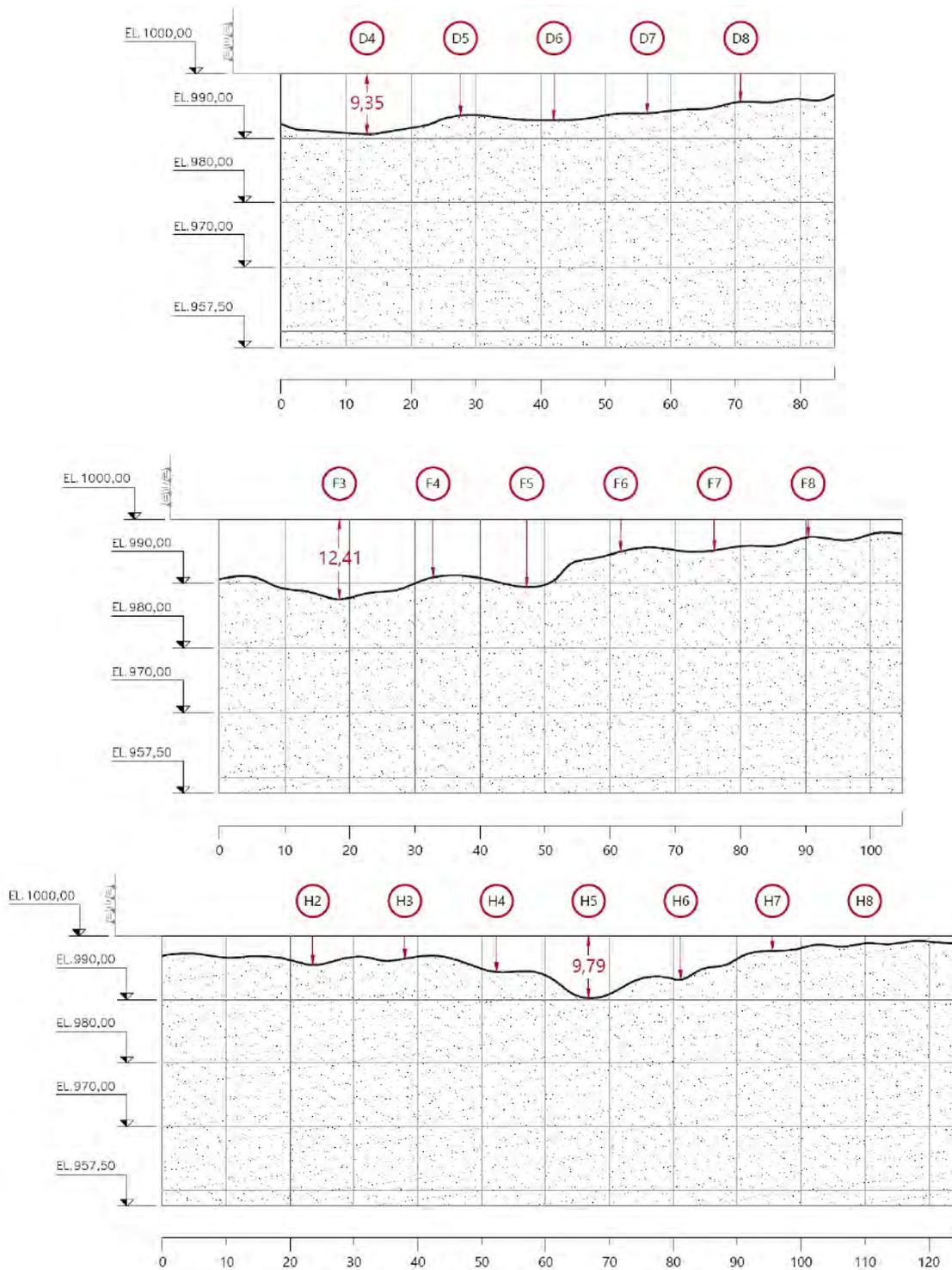


Figura 69. Perfiles de erosión a lo largo de los ejes del túnel 1, 2 y 3 – $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

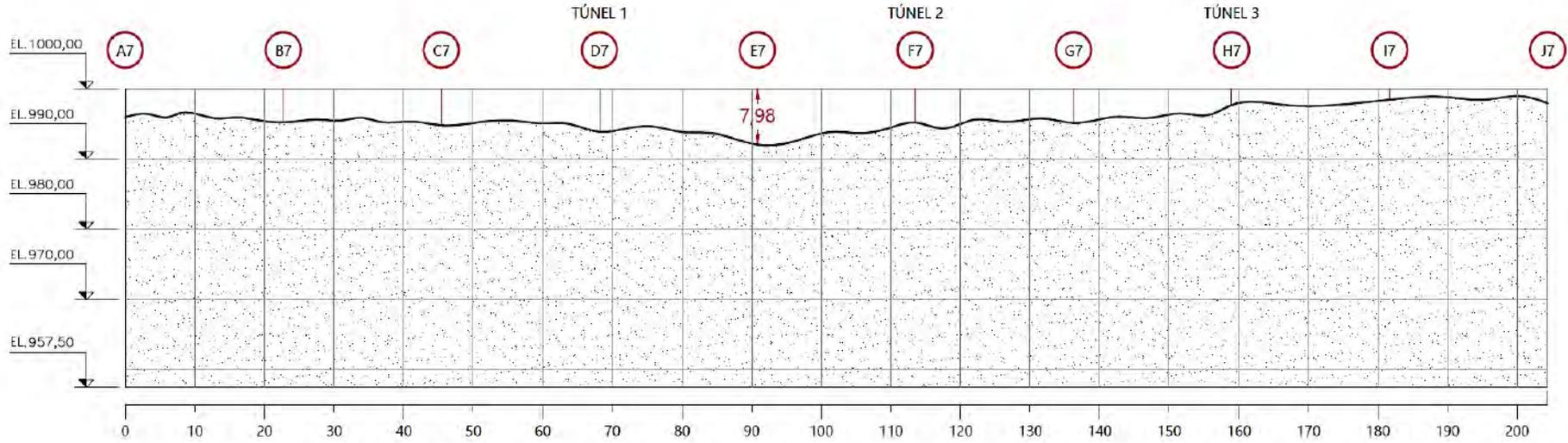


Figura 70. Perfil de erosión a lo largo del eje del río – $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

5.5.1.3. Análisis de resultados, Serie 3, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Presiones

Bajo las condiciones del ensayo los túneles trabajaron a presión.

Erosión en poza disipadora

La erosión máxima obtenida fue de 12.41 metros, en el eje del túnel 2 (punto F3).

5.5.2. Serie 3, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$

5.5.2.1. Condiciones del ensayo, Serie 3, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$

Este ensayo correspondiente a la serie 3, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos parcialmente abiertas. Se estableció una abertura de compuertas de 0.85 m, necesaria para hacer pasar un caudal de $641 \text{ m}^3/\text{s}$ a través de los túneles.

5.5.2.2. Resultados del ensayo, Serie 3, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$

Presiones

El análisis de presiones no es un objetivo de la presente investigación. Consultar disponibilidad de la información con el IHHS de la Universidad de Piura.

Erosión en poza disipadora

La configuración de la poza disipadora al final del ensayo se muestra en la Figura 71.

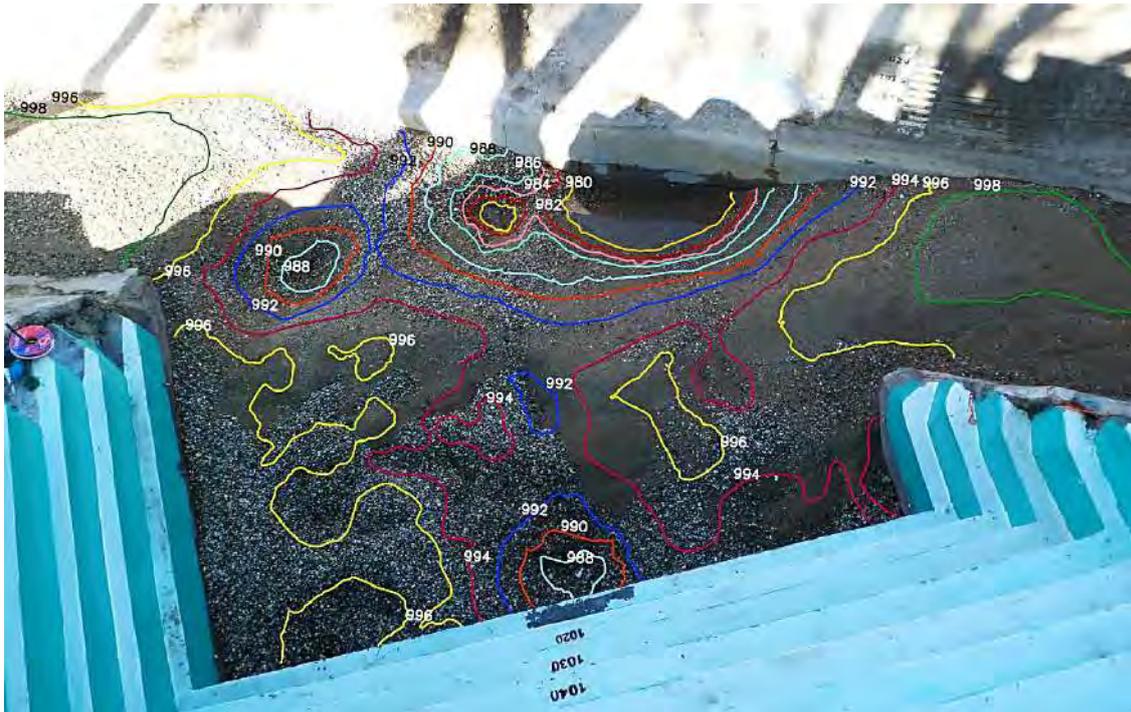


Figura 71. Curvas de nivel de la poza disipadora erosionada – $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Los cortes a lo largo de los ejes de cada túnel y a lo largo del eje del río se muestran en las Figuras 72 y 73.

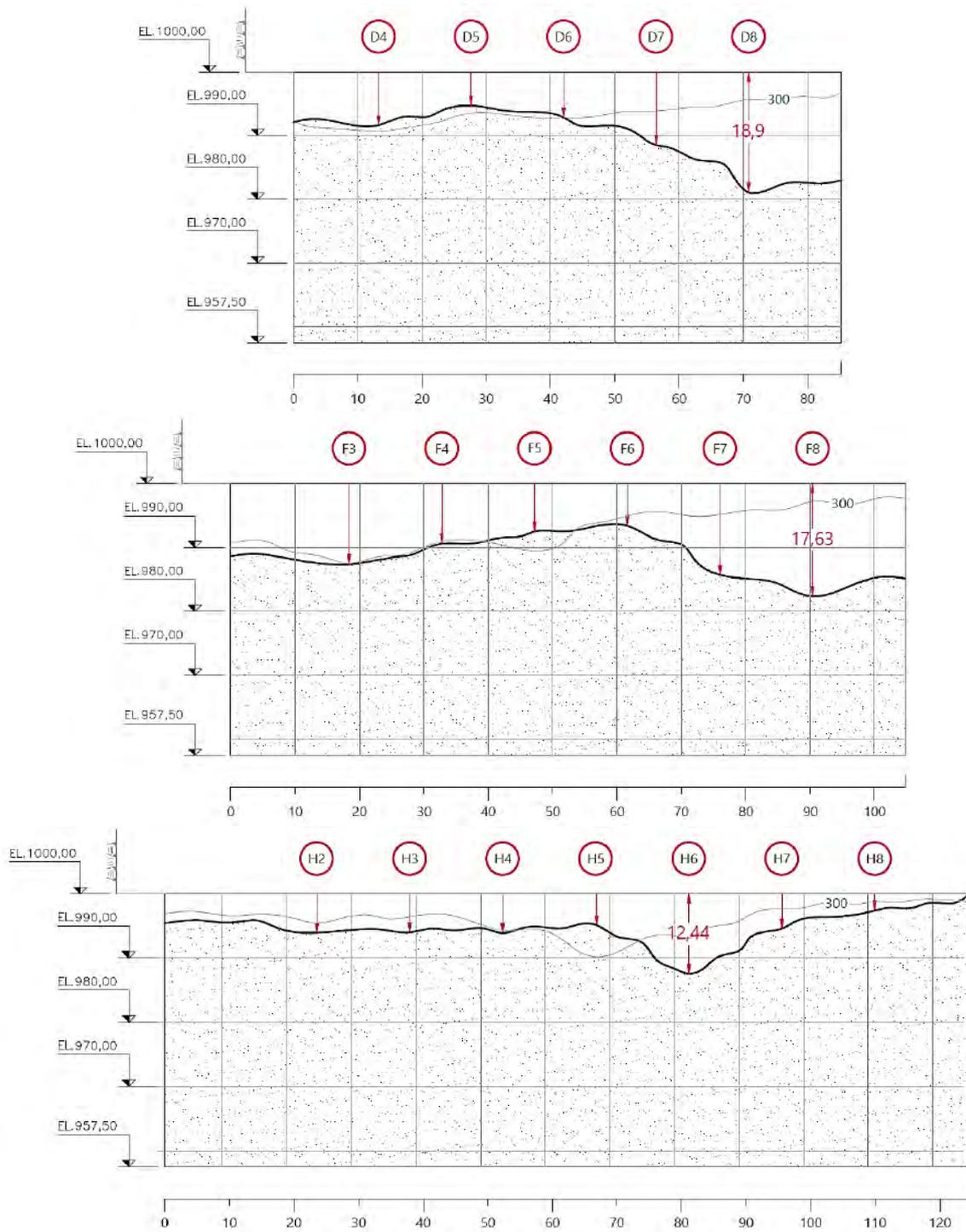


Figura 72.

Perfiles de erosión a lo largo de los ejes del túnel 1, 2 y 3 – $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

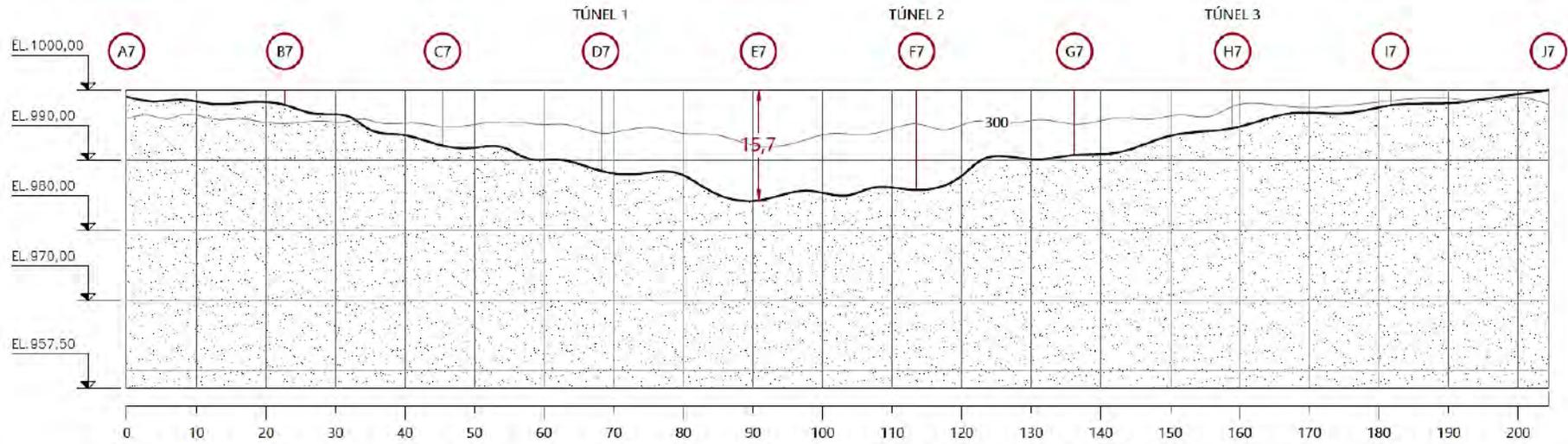


Figura 73. Perfil de erosión a lo largo del eje del río – $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

5.5.2.3. Análisis de resultados, Serie 3, $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$

Presiones

Bajo las condiciones del ensayo los túneles trabajaron a presión.

Erosión en poza disipadora

La erosión máxima obtenida fue de 18.9 metros, en la margen derecha del río (punto D8), frente al túnel 1.

5.5.3. Serie 3, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$

5.5.3.1. Condiciones del ensayo, Serie 3, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$

Este ensayo correspondiente a la serie 3, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos parcialmente abiertas. Se estableció una abertura de compuertas de 1.75 m, necesaria para hacer pasar un caudal de $1276 \text{ m}^3/\text{s}$ a través de los túneles.

5.5.3.2. Resultados del ensayo, Serie 3, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$

Presiones

El análisis de presiones no es un objetivo de la presente investigación. Consultar disponibilidad de la información con el IHHS de la Universidad de Piura.

Erosión en poza disipadora

La configuración de la poza disipadora al final del ensayo se muestra en la Figura 74.



Figura 74. Curvas de nivel de la poza disipadora erosionada – $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Los cortes a lo largo de los ejes de cada túnel y a lo largo del eje del río se muestran en las Figuras 75 y 76.

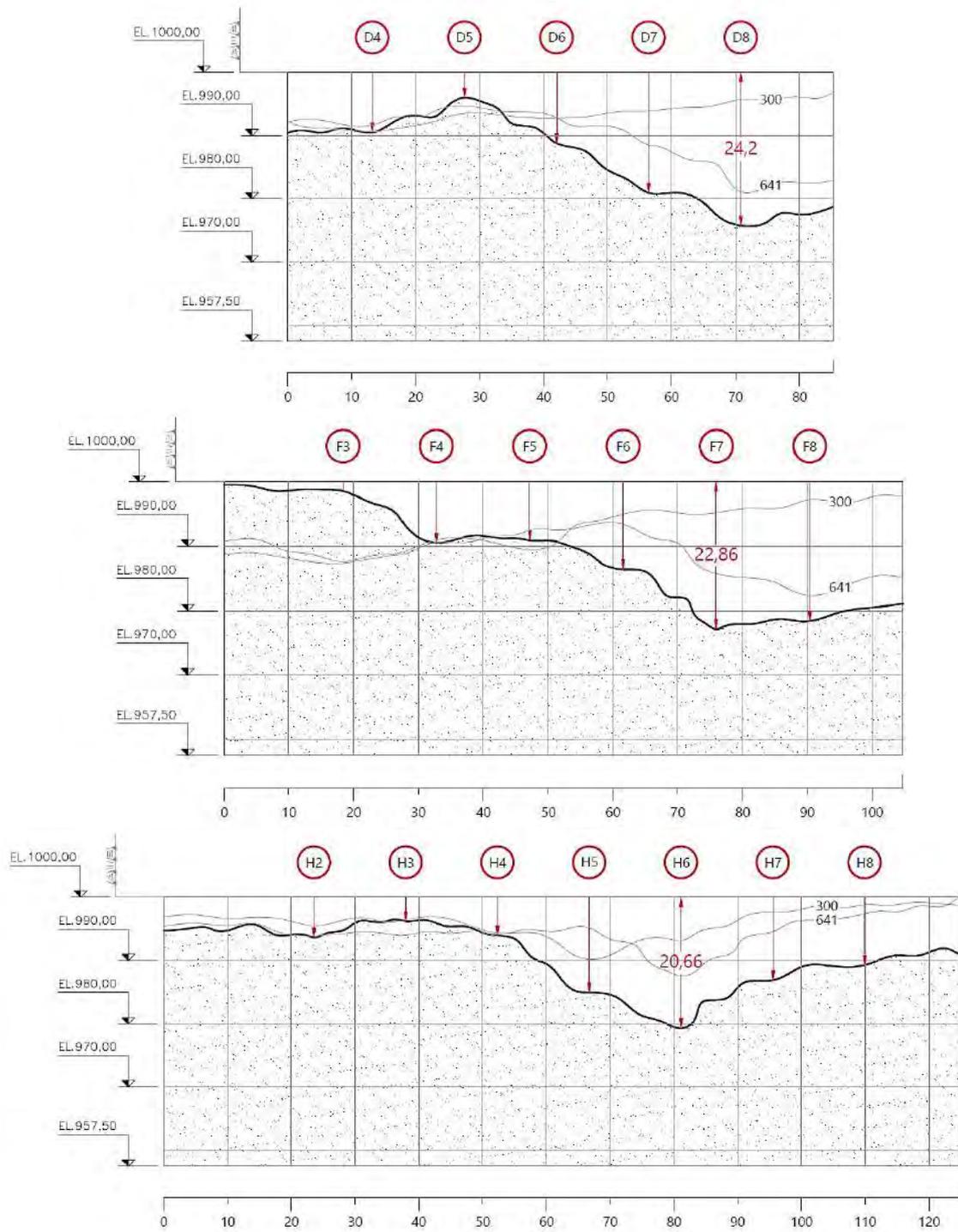


Figura 75. Perfiles de erosión a lo largo de los ejes del túnel 1, 2 y 3 – $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

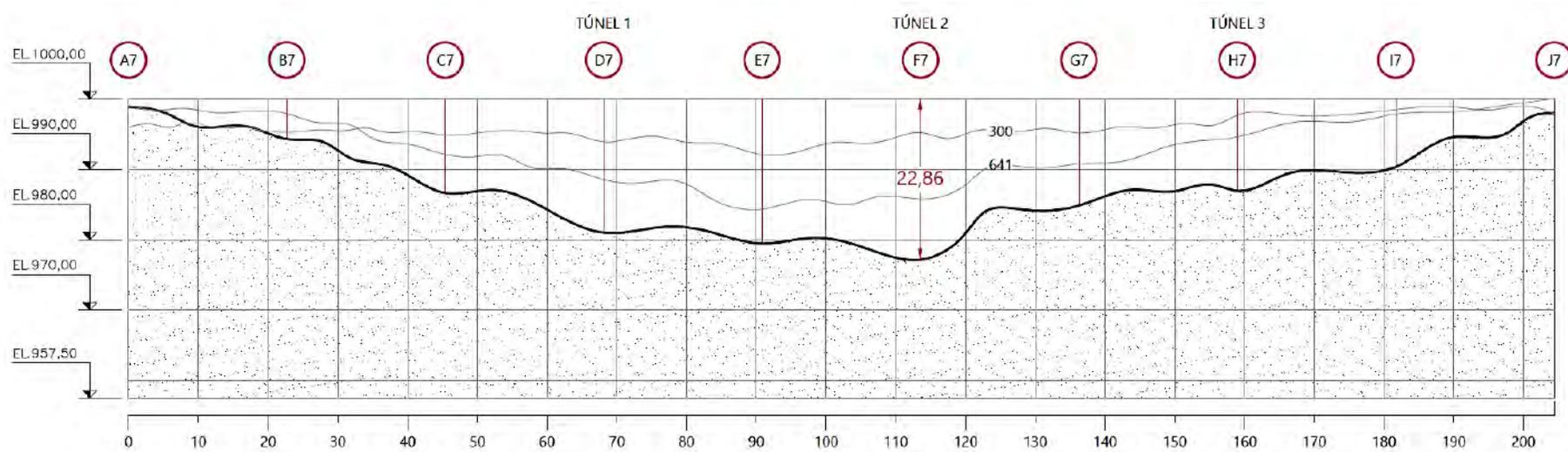


Figura 76. Perfil de erosión a lo largo del eje del río – $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

5.5.3.3. Análisis de resultados, Serie 3, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$

Presiones

Bajo las condiciones del ensayo los túneles trabajaron a presión.

Erosión en poza disipadora

La erosión máxima obtenida fue de 24.2 metros, en la margen derecha del río (punto D8), frente al túnel 1.

5.5.4. Serie 3, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

5.5.4.1. Condiciones del ensayo, Serie 3, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

Este ensayo correspondiente a la serie 3, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos parcialmente abiertas. Se estableció una abertura de compuertas de 2.60 m., necesaria para hacer pasar un caudal de $1832 \text{ m}^3/\text{s}$ a través de los túneles.

5.5.4.2. Resultados del ensayo, Serie 3, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

Presiones

El análisis de presiones no es un objetivo de la presente investigación. Consultar disponibilidad de la información con el IHHS de la Universidad de Piura.

Erosión en poza disipadora

La configuración de la poza disipadora al final del ensayo se muestra en la Figura 77.



Figura 77. Curvas de nivel de la poza disipadora erosionada – $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

Los cortes a lo largo de los ejes de cada túnel y a lo largo del eje del río se muestran en las Figuras 78 y 79.

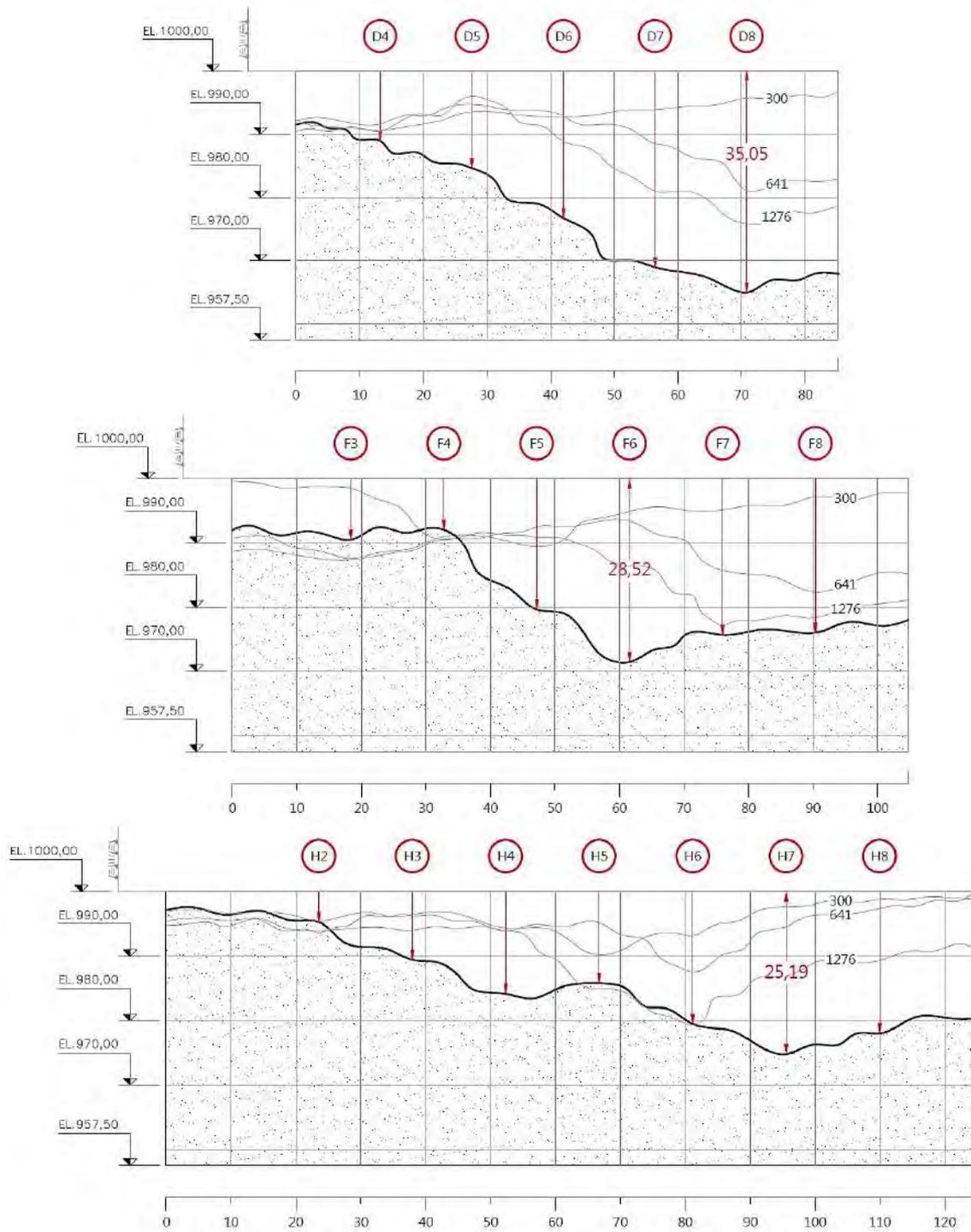


Figura 78. Perfiles de erosión a lo largo de los ejes del túnel 1, 2 y 3 – $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

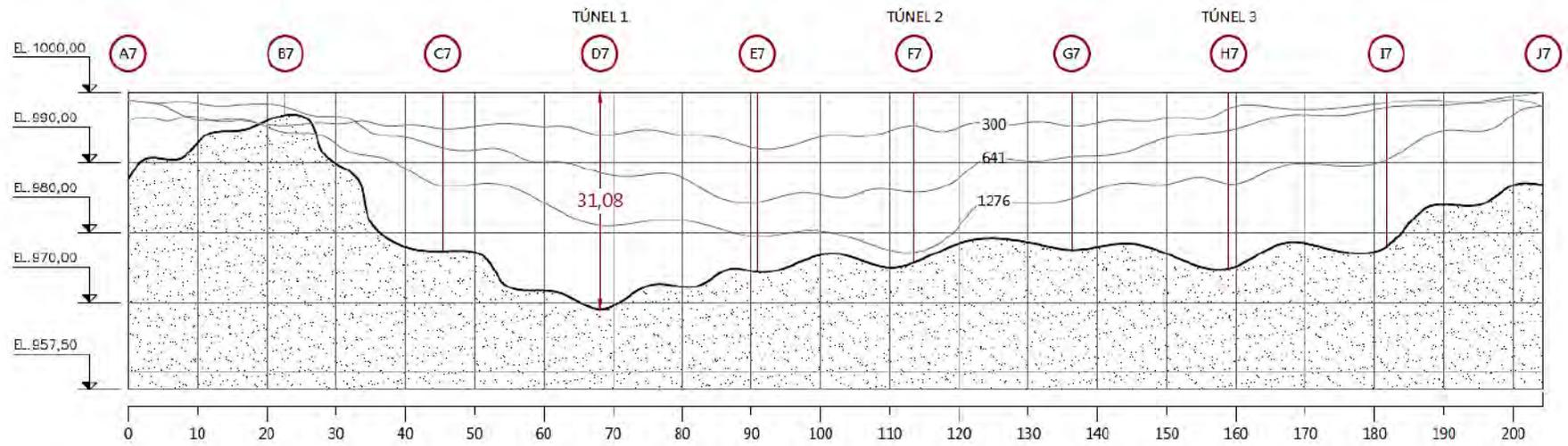


Figura 79. Perfil de erosión a lo largo del eje del río – $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

5.5.4.3. Análisis de resultados, Serie 3, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

Presiones

Bajo las condiciones del ensayo los túneles trabajaron a presión.

Erosión en poza disipadora

La erosión máxima obtenida fue de 35.05 metros, en la margen derecha del río (punto D8), frente al túnel 1.

5.5.5. Serie 3, $Q = 2068 \text{ m}^3/\text{s}$

5.5.5.1. Condiciones del ensayo, Serie 3, $Q = 2068 \text{ m}^3/\text{s}$

Este ensayo correspondiente a la serie 3, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos parcialmente abiertas. Se estableció una abertura de compuertas de 2.90 m, necesaria para hacer pasar un caudal de $2068 \text{ m}^3/\text{s}$ a través de los túneles.

5.5.5.2. Resultados del ensayo, Serie 3, $Q = 2068 \text{ m}^3/\text{s}$

La configuración de la poza disipadora al final del ensayo se muestra en la Figura 80.



Figura 80.

Curvas de nivel de la poza disipadora erosionada – $Q = 2068 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

5.5.5.3. Análisis de resultados, Serie 3, $Q = 2068 \text{ m}^3/\text{s}$

Bajo las condiciones del ensayo los túneles trabajaron a presión.

La erosión máxima obtenida fue de 32.45 metros, en la margen derecha del río (punto D8), frente al túnel 1.

5.5.6. Serie 3, $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$

5.5.6.1. Condiciones del ensayo, Serie 3, $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$

Este ensayo correspondiente a la serie 3, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos parcialmente abiertas. Se estableció una abertura de compuertas de 4.35 m, necesaria para hacer pasar un caudal de $2845 \text{ m}^3/\text{s}$ a través de los túneles.

5.5.6.2. Resultados del ensayo, Serie 3, $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$

La configuración de la poza disipadora al final del ensayo se muestra en la Figura 81.



Figura 81. Curvas de nivel de la poza disipadora erosionada – $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

5.5.6.3. Análisis de resultados, Serie 3, $Q = 2845 \text{ m}^3/\text{s}$

Bajo las condiciones del ensayo los túneles trabajaron a presión.

La erosión máxima obtenida fue de 42.50 metros (profundidad de la poza), en la margen central y derecha del río, frente a los túneles 1 y 2.

5.5.7. Serie 3, $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$

5.5.7.1. Condiciones del ensayo, Serie 3, $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$

Este ensayo correspondiente a la serie 3, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos parcialmente abiertas. Se estableció una abertura de compuertas de 7.15 m, necesaria para hacer pasar un caudal de $3621 \text{ m}^3/\text{s}$ a través de los túneles.

5.5.7.2. Resultados del ensayo, Serie 3, $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$

La configuración de la poza disipadora al final del ensayo se muestra en la Figura 82.

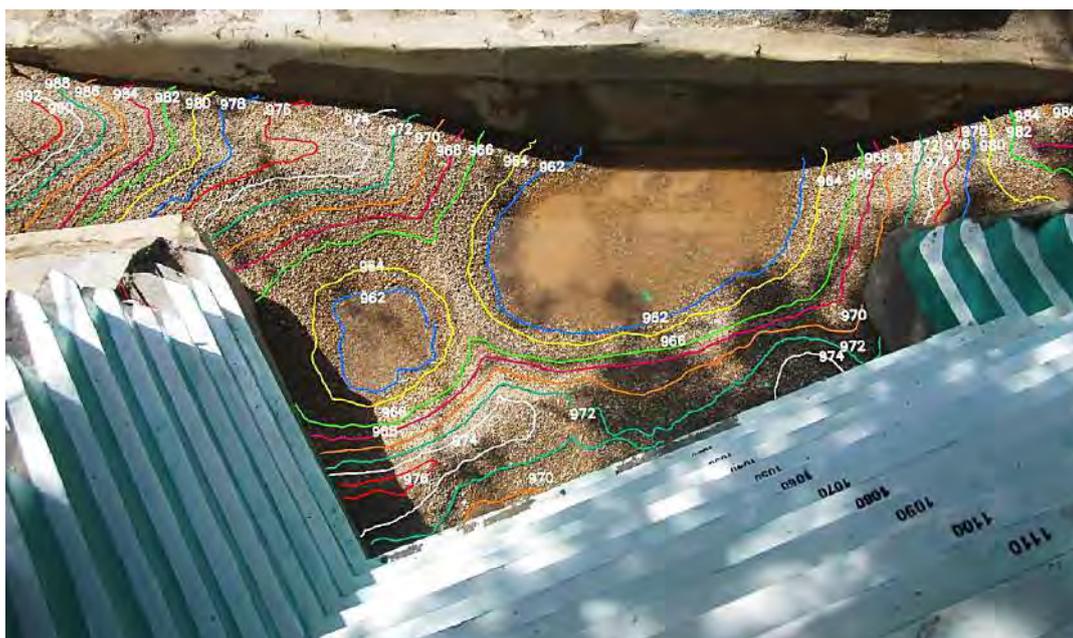


Figura 82.

Curvas de nivel de la poza disipadora erosionada – $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

5.5.7.3. Análisis de resultados, Serie 3, $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$

Bajo las condiciones del ensayo los túneles trabajaron a presión.

La erosión máxima obtenida fue de 42.50 metros (profundidad de la poza), frente a los túneles 1 y 2.

5.6. Análisis de resultados de la Serie 3

Para todos los ensayos de esta serie se consideró que la margen derecha del río no erosiona, pues durante la modelación esta estuvo constituida por un material no erosionable debido a la magnitud del modelo. Por lo tanto, esta condición deberá ser verificada por el diseñador con los parámetros geotécnicos de obra.

Con las modificaciones realizadas en el cuenco amortiguador los chorros ya no impactan en las paredes laterales.

5.6.1. Curva de descarga de las estructuras

Los valores de abertura de compuerta obtenidos para cada caudal son coincidentes con los obtenidos en la Serie 2C (Figura 83). Esto resulta coherente debido a que en ambas series de ensayos el objetivo consistía en determinar la abertura correspondiente a un determinado caudal, manteniendo el nivel del embalse en el NAMO (1196 m.s.n.m.).

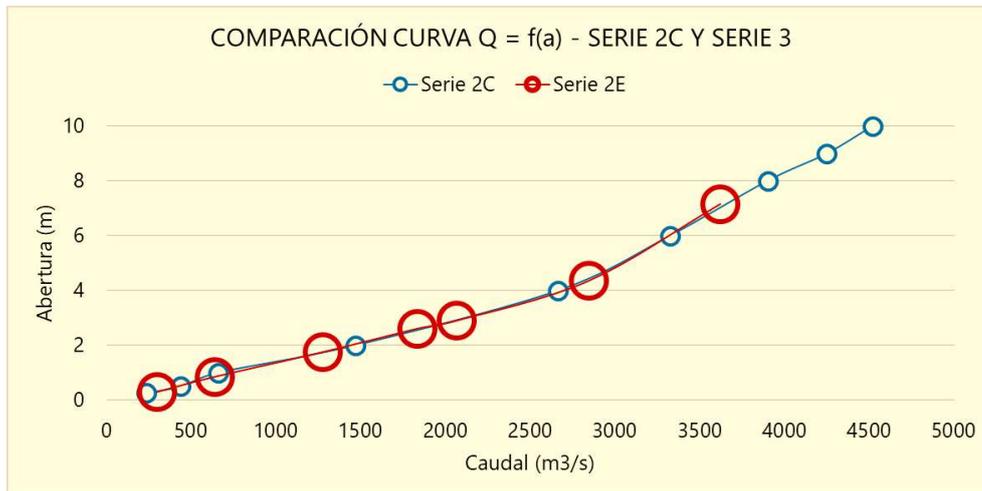


Figura 83. Comparación de curvas $Q = f(a)$ entre las series 2C y 2E

Fuente: IHHS (2014)

5.6.2. Predicción de la profundidad de erosión

Los valores experimentales de erosión máxima en el cuenco amortiguador aumentan progresivamente con el aumento del caudal; en este sentido, se ha descartado el valor de erosión para el caudal de 2068 m³/s por considerarse un dato atípico (disminuye). Asimismo, no se puede afirmar que para los caudales de 2845 y 3621 m³/s la erosión máxima "real" sea de 42.5 metros, siendo este valor coincidente con la profundidad especificada de la poza disipadora.

Los valores teóricos de erosión calculados con las ecuaciones de Veronese, Yildiz & Uzupek, Martin, Damle y Chain se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35. Resultados erosión máxima teórica

Parámetros	Caudales						
	300	641	1276	1832	2068	2845	3621
Caudal por túnel, Q	100.00	213.67	425.33	610.67	689.33	948.33	1207.00
Ancho de compuerta, b	11	11	11	11	11	11	11
Caudal Unitario, $q = Q/b$	9.09	19.42	38.67	55.52	62.67	86.21	109.73
Abertura, a	0.3	0.85	1.75	2.6	2.9	4.35	5.05
Velocidad en túnel, $v = Q/ba$	30.30	22.85	22.10	21.35	21.61	19.82	21.73
Energía cinética, $v^2/2g$	46.80	26.62	24.88	23.24	23.80	20.02	24.06
Cota salto de esquí	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152
Cota de nivel aguas abajo	1000.50	1000.80	1001.63	1003.05	1003.50	1005.33	1006.77
Carga inicial, H	198.60	178.67	177.00	174.79	175.20	171.04	174.34
Ángulo de impacto, °	30	30	30	30	30	30	30
Ángulo de impacto, rad	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
Cota de Erosión	988.09	981.90	977.43	968.00	971.05	962.83	964.27
Erosión máxima en modelo	12.41	18.9	24.2	35.05	s.d.	s.d.	s.d.
Veronese, $hca + hs$	20.58	30.28	43.82	53.13	56.75	67.05	76.71
Veronese, hs	20.08	29.48	42.19	50.08	53.25	61.72	69.94
Yildiz & Üzücek, $hca + hs$	17.82	26.22	37.95	46.01	49.14	58.07	66.43
Yildiz & Üzücek, hs	17.32	25.42	36.32	42.96	45.64	52.74	59.66
Martin, $hca + hs$	8.23	12.99	19.63	24.38	26.22	31.75	36.70
Martin, hs	7.73	12.19	18.00	21.33	22.72	26.42	29.93
Damle, $hca + hs$	23.37	32.40	45.50	54.18	57.63	66.79	76.07
Damle, hs	22.87	31.60	43.87	51.13	54.13	61.46	69.30
Chain, $hca + hs$	12.61	18.12	25.69	30.80	32.78	38.35	43.57
Chain, hs	12.11	17.32	24.06	27.75	29.28	33.02	36.80

Fuente: IHHS (2014)

5.6.3. Comparación de resultados experimentales con aquellos calculados usando las ecuaciones de profundidad de erosión

En la Figura 84 se realiza una primera comparación, en la cual se puede observar que los valores experimentales de h_s se encuentran dentro de los límites teóricos calculados con las ecuaciones de Veronese, Yildiz & Uzuçek, Martin, Damle y Chain.

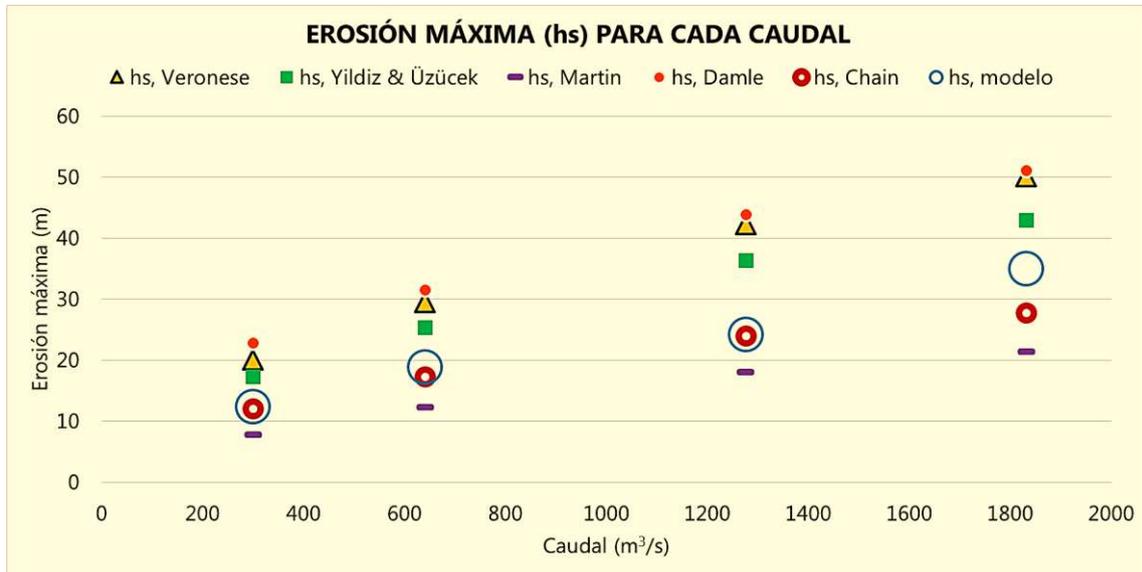


Figura 84. Valores experimentales y teóricos de erosión máxima

Fuente: IHHS (2014)

Otra forma de contrastar los valores experimentales obtenidos es la que se sugiere en la Figura 85, usando una línea de ajuste ideal, verificando así que las ecuaciones de Damle y Martin subestiman el valor de h_s , mientras que las otras tres ecuaciones lo sobreestiman.

En la Tabla 36, los indicadores NSE, RMSE y MAPE son calculados para las cinco ecuaciones utilizadas en la estimación de h_s , omitiendo los resultados obtenidos para los tres máximos caudales (2068, 2845 y 3621 m^3/s). De este modo, se pudo verificar que solo Chain presenta un NSE aceptable, con un valor mayor que 0.50. Asimismo, la ecuación de Chain también es la que presenta los menores valores para RMSE y MAPE, con 3.74 y 8.05, respectivamente, concluyendo así que la ecuación de Chain es la que mejor estima el valor de h_s en el proyecto.

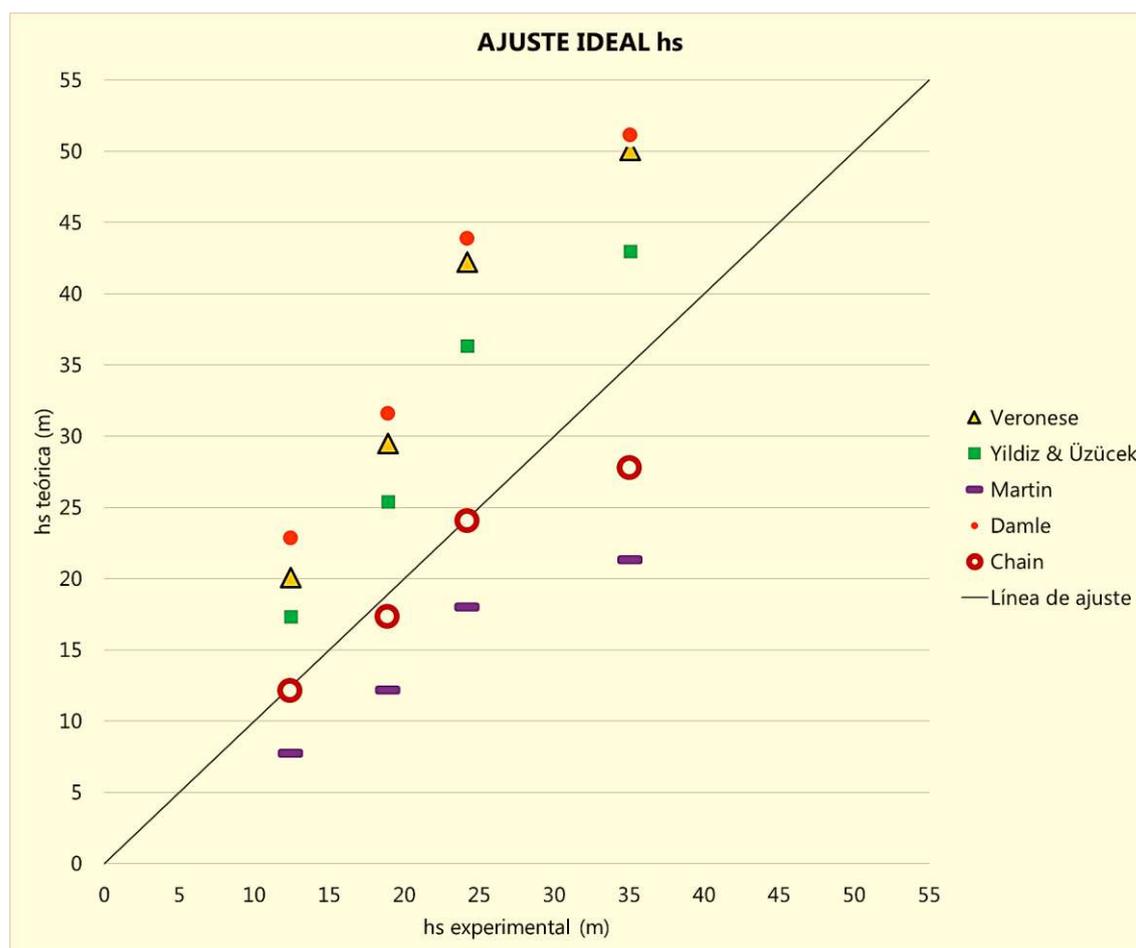


Figura 85. Estimación de las diferentes ecuaciones h_s

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36. Indicadores estadísticos para el cálculo de h_s

Nº	Ecuación	NSE	RMSE (m)	MAPE (%)
1	Veronese	-1.62	13.42	58.75
2	Yildiz	0.00	8.31	36.69
3	Martin	-0.07	8.57	34.50
4	Damle	-2.33	15.13	69.66
5	Chain	0.80	3.74	8.05

Fuente: Elaboración propia.

5.6.4. Propuesta de una nueva ecuación para estimar la profundidad de erosión máxima

En 2013, Heng, Tingsanchali y Suetsugi señalan que, en base a la teoría de análisis dimensional, se puede deducir una forma general para la estimación de h_s según la ecuación 5.1:

$$\frac{h_s}{h_{ca}} = s \left(\frac{q^2}{gh_{ca}^3} \right)^t \quad \text{Ec. 5.1}$$

Donde la profundidad del colchón de agua (h_{ca}) y la aceleración de la gravedad (g) juegan un rol importante en la disipación de energía de un chorro de caída libre, como el de la presente investigación.

Así, al efectuar una de regresión lineal simple sobre la ecuación 5.2 –equivalente a la Ec. 5.1– con los valores de h_s , q y h_{ca} obtenidos experimentalmente se pueden calcular los coeficientes s y t :

$$\underbrace{\log\left(\frac{h_s}{h_{ca}}\right)}_y = \underbrace{\log s}_b + \underbrace{\frac{t}{m}}_m \underbrace{\log\left(\frac{q^2}{gh_{ca}^3}\right)}_x \quad \text{Ec. 5.2}$$

En las Tablas 37, 38 y 39 se brinda información de interés sobre la regresión, donde se establece que los coeficientes son:

$$s = 10^{0.614} = 4.112$$

$$t = 0.404$$

Tabla 37. Valores para la regresión lineal simple

Q	h_s	H	q	g	h_{ca}	$\frac{h_s}{h_{ca}}$	$\frac{q^2}{gh_{ca}^3}$	$\log\left(\frac{h_s}{h_{ca}}\right)$	$\log\left(\frac{q^2}{gh_{ca}^3}\right)$
300	12.41	198.60	9.09	9.81	0.5	24.820	67.396	1.395	1.829
641	18.9	178.67	19.42	9.81	0.8	23.625	75.119	1.373	1.876
1276	24.2	177.00	38.67	9.81	1.63	14.847	35.192	1.172	1.546
1832	35.05	174.79	55.52	9.81	3.05	11.492	11.073	1.060	1.044

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 38. Coeficientes s y t

Coeficiente	Valor	Error típico
Intersección, $\log s$	0.61408869	0.142599
Pendiente, t	0.40409881	0.088674

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 39. Estadísticas de la regresión

Indicador	Valor
Coefficiente de correlación múltiple	0.955068107
Coefficiente de determinación R^2	0.912155089
R^2 ajustado	0.868232633
Error típico	0.058637715
Observaciones	4

Fuente: Elaboración propia.

De este modo, se propone la ecuación 5.3 o 5.4 (ecuación **IHHs**) para la estimación de la profundidad máxima de erosión en el proyecto:

$$\frac{h_s}{h_{ca}} = 4.112 \left(\frac{q^2}{gh_{ca}^3} \right)^{0.404} \quad \text{Ec. 5.3}$$

$$h_s = 4.112 \frac{q^{0.808}}{g^{0.404} h_{ca}^{0.212}} \quad \text{Ec. 5.4}$$

Los nuevos valores teóricos de h_s , calculados con la ecuación **IHHs**, se muestran en la Tabla 40:

Tabla 40.

Estimación de la profundidad de erosión h_s con la ecuación **IHHs**

Q	h_s, exp	q	g	h_{ca}	$h_s, nuevo$
300	12.41	9.09	9.81	0.50	11.27
641	18.90	19.42	9.81	0.80	18.84
1276	24.20	38.67	9.81	1.63	28.26
1832	35.05	55.52	9.81	3.05	33.14
2068	-	62.67	9.81	3.50	35.50
2845	-	86.21	9.81	5.33	42.01
3621	-	109.73	9.81	6.77	48.53

Fuente: Elaboración propia.

Luego, al calcular los indicadores NSE, RMSE y MAPE se obtiene 0.92, 2.31 y 7.92, respectivamente, mejorando la estimación de la ecuación propuesta por Chain. En la Figura 86 se muestra la correlación de las dos ecuaciones.

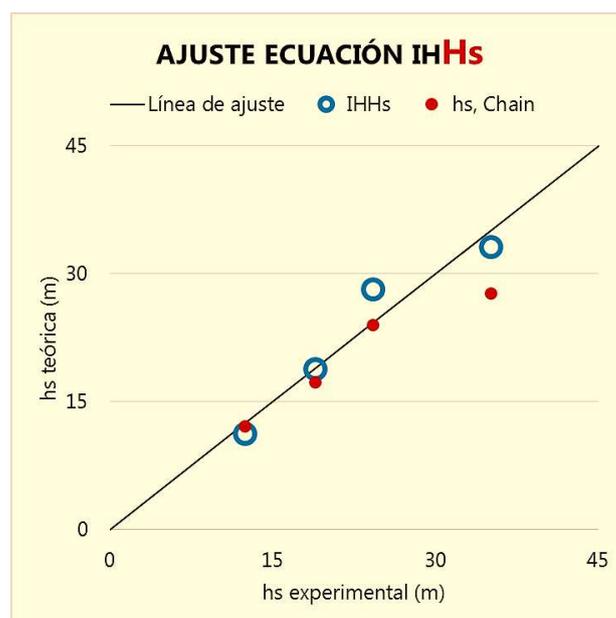


Figura 86.

Ajuste ecuación **IHHs**

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, para los caudales de 2068, 2845 y 3621 m^3/s se podría estimar una erosión máxima de 35.50, 42.01 y 48.53 metros, según la ecuación **IHHs**.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- 1 La similitud de las curvas de descarga correspondientes a cada serie de ensayos garantiza la consistencia de la presente modelación.
- 2 La caracterización de las líneas de corriente reveló la formación de pequeños vórtices en la entrada de los túneles de vertedero; sin embargo, la supervisión consideró que éstos no afectarían las estructuras debido a su magnitud.
- 3 Las velocidades registradas en las diferentes secciones de control siguen las distribuciones teóricas previstas.
- 4 El contraste entre los resultados experimentales obtenidos y valores teóricos calculados respaldan la validez de la semejanza de Froude para modelar este tipo de erosión.
- 5 A partir del análisis de erosión experimental en el modelo de la Central Hidroeléctrica Chaglla, se puede afirmar que la ecuación h_s de Chain es la que mejor estima la máxima erosión en el cuenco amortiguador.
- 6 Al igual que Chain, el análisis de datos de erosión obtenidos en la presente modelación demuestra que ni el ángulo de incidencia del chorro (θ_i) ni el tamaño representativo de partícula (d) del lecho influyen considerablemente en la estimación de la erosión.
- 7 Bajo las condiciones de operación del modelo, se ha propuesto la ecuación **IHHs** (ecuación 5.4), donde la profundidad del colchón de agua (h_{ca}) y la aceleración de la gravedad (g) juegan un rol importante en la disipación de energía del chorro, mejorando la estimación de la ecuación de Chain, inclusive.

Recomendaciones

- 1 Con la finalidad de validar la similitud en la estimación de h_s entre modelo y prototipo se sugiere llevar a cabo un seguimiento y registro de los datos de erosión en la Central Hidroeléctrica Chaglla.
- 2 Una modelación numérica del proceso de erosión en el proyecto puede ser llevada a cabo para comparar y/o complementar aquellos resultados obtenidos por modelación física, de modo que la ecuación **IH h_s** se pueda calibrar y validar.
- 3 Es recomendable que se sigan realizando estudios de erosión en lechos no cohesivos debido al impacto de un chorro. Los académicos estaríamos particularmente agradecidos de recibir más datos relacionados a la erosión medida en modelos y prototipos, de modo que se pueda mejorar la precisión de la estimación.
- 4 Con base en la vasta información recogida, se recomienda realizar mayores estudios sobre la influencia del impacto simultáneo de tres chorros en la estimación de la máxima profundidad de erosión.
- 5 Se recomienda verificar las condiciones de sedimentación o erosión en el cauce aguas abajo, la cual se podría originar como consecuencia de la erosión en el cuenco amortiguador o la sedimentación en la presa, respectivamente.

Referencias bibliográficas

- Alias, N. A., Mohamed, T. A., Ghazali, A. H. y Noor, M. J. M. M. (2008). *Impact of takeoff angle of bucket type energy dissipater on scour hole*. American journal of applied sciences, 5(2), 117-221.
- Canizales, R. (1988). Apuntes sobre teoría de modelos de obras hidráulicas a superficie libre. Universidad de Sonora. Escuela de ingeniería. Sonora, México.
- Chereque, W. (1987). *Mecánica de fluidos I. Curso semestral para estudiantes de Ingeniería Civil*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- Chow, V. T. (1994). Hidráulica de canales abiertos.
- Echávez, G. (1996). Introducción a los modelos hidráulicos de fondo fijo y a la ingeniería experimental.
- Guerrero, L. (2014). *Investigación hidráulica y sedimentológica en modelo físico del vertedero de servicio de la presa Sabana Yegua*. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- Heng, S., Tingsanchali, T. & Suetsugi, T. (2013). Prediction formulas of maximum scour depth and impact location of a local scour hole below a chute spillway with a flip bucket. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 172, 251-262.
- IHHS (2014). Estudios hidráulicos en modelo reducido PG Chaglla. Escala 1:50. Informe final.
- Intertechne (2012). Proyecto Central Hidroeléctrica Chaglla. Estudios hidráulicos en modelo reducido. Especificaciones técnicas.
- Mason, P. & Arumugam, K. (1985). Free jet scour below dams and flip buckets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(2), 220-235.
- Minaya, E. (2005). *Erosión en lecho no cohesivo debido al impacto de un chorro a la salida de un vertedero con salto de ski*. Tesis de maestría en Ingeniería Hidráulica. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil. Lima, Perú.
- Niño, J. y Duarte, C. (2004). Introducción a la mecánica de fluidos.

- Noori, R. & Hooshyaripor, F. (2014). Effective Prediction of Scour Downstream of Ski_Jump Buckets Using Artificial Neural Networks. *Water resources*, 41(1), 8-18.
- Peña-Valdivia, J. (2014). *Método de representación de la rugosidad de los túneles para el modelo físico de Chaglla*. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- Ramos-Cedano, C. (2017). *Análisis del transporte de sedimentos en vertedero de excedencias del proyecto Chaglla*. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- Rocha, A. (1985). Modelos hidráulicos: realidad y fantasía. *Anales de la Universidad de Chile*.
- Rocha, A. (1998). Introducción a la Hidráulica Fluvial.
- Torres, A. (s.f.) Apuntes de Dinámica de Fluidos. Universidad de Granada. Granada, España.
- Vergara, M. (1993). Técnicas de modelación en Hidráulica.
- Yildiz, D. & Üzücek, E (1994). Prediction of scour depth from free falling flip bucket jets. *International Water Power and Dam Construction*, 46(11), 50-4.

Anexos

A1. Proceso constructivo del modelo

A1.1. Proceso constructivo del cauce de aproximación

Se modeló el cauce desde la cota 1025 hasta la cota 1210, para lo cual se emplearon aproximadamente 1200 m³ de afirmado. El procedimiento para conformar el cauce se describe a continuación y se muestra en las Figuras 87 a 90:

- Sobre la superficie existente se fueron colocando y compactando capas de afirmado húmedo. Debido a la forma irregular de las laderas, se colocaron tablonces para confinar el material; asimismo, los tablonces fueron fijados por varillas/estacas. Este procedimiento se repitió hasta alcanzar el nivel de la cota 1210, en capas de 30 centímetros, aproximadamente.
- Para la reproducción de las márgenes se emplearon 45 de las 58 secciones establecidas. Se elaboraron dos moldes, en triplay, para cada sección.
- El perfilado de las márgenes se realizó colocando una malla de acero, con un espaciamiento de 25×25 cm. Luego, se colocó una capa de mortero para darle forma definitiva al cauce.
- Finalmente, se impermeabilizó el cauce utilizando una manta asfáltica. En primer lugar, se colocó imprimante sobre la zona, y luego, con la ayuda de un soplete, se adhirió la manta quemando el polietileno protector de alta densidad y el imprimante.



Figura 87.

Compactación de capas para la conformación del cauce de aproximación

Fuente: IHHS (2014)



Figura 88. Reproducción de las márgenes del cauce de aproximación

Fuente: IHHS (2014)



Figura 89. Perfilado de las márgenes del cauce de aproximación

Fuente: IHHS (2014)



Figura 90.

Impermeabilización del cauce de aproximación

Fuente: IHHS (2014)

A1.2. Proceso constructivo de los vertederos

Los vertederos fueron construidos a una escala geométrica no distorsionada de 1:50, basada en los criterios de similitud de Froude, utilizando acrílico transparente. De este modo se podría apreciar la forma en la que se transportó el flujo de agua y se desarrolló la sedimentación a través de los túneles. Su construcción se describe a continuación y se muestra en las Figuras 91 a 106:

- Se construyeron pequeños muros de ladrillo sobre los cuales se apoyaron los 3 túneles. Cada muro respetó la cota a la cual debía estar la sección correspondiente a cada túnel.
- Los túneles de vertedero se elaboraron considerando los cambios en su sección transversal a largo de sus zonas de transición: entrada y salida. La sección transversal en los túneles de vertedero es típica, es decir, la sección F en la entrada es igual a la sección K en la salida. Además, al interior de cada túnel se colocaron cintas de rugosidad para simular la rugosidad del concreto.
- La toma del vertedero se construyó según lo especificado por el diseñador.
- Los túneles de vertedero se instalaron empalmando todas sus secciones con cloroformo y viruta de acrílico.
- Al final de cada túnel se instaló una compuerta ataguía.
- Y al final de las compuertas ataguía se construyó una sección escalonada que va desde la cota 1150 hasta 1000 m.s.n.m.



Figura 91. Construcción de los pilares para los túneles de vertedero

Fuente: IHHS (2014)

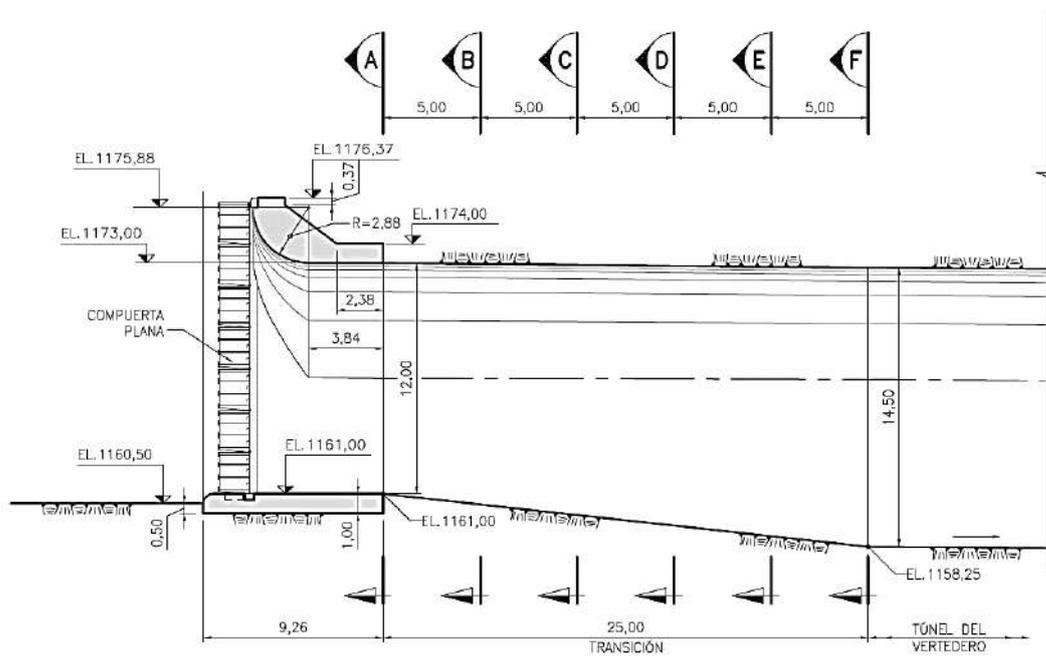


Figura 92. Zona de transición en la entrada de los túneles de vertedero – prototipo

Fuente: Intertechne (2012)

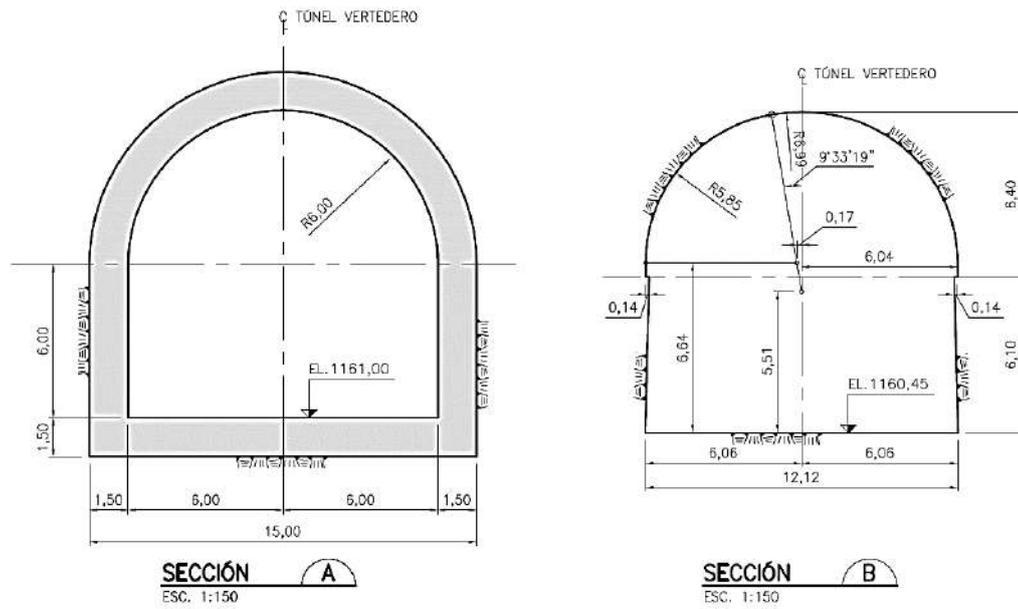


Figura 93. Secciones transversales A y B, en la entrada de los túneles de vertedero – prototipo

Fuente: Intertechne (2012)

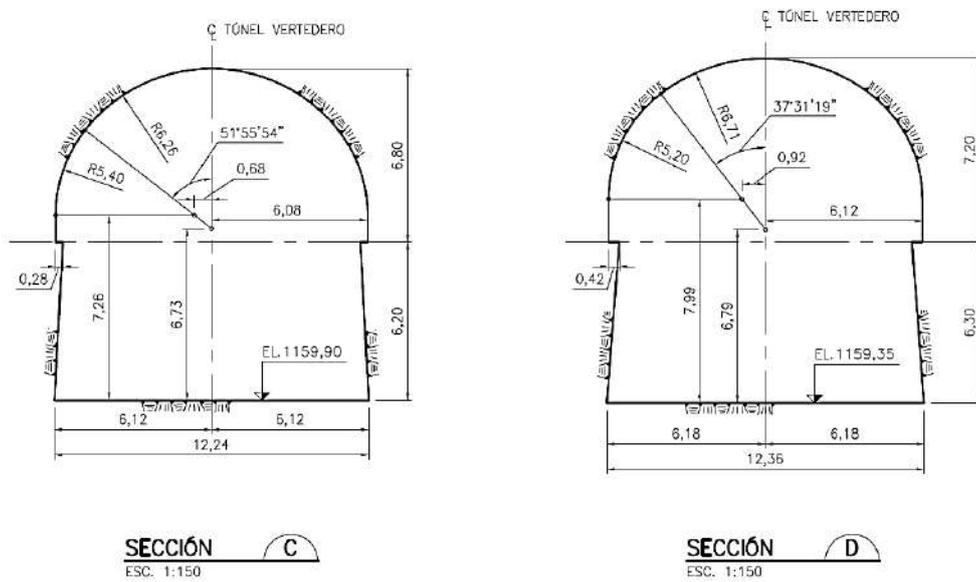


Figura 94. Secciones transversales C y D, en la entrada de los túneles de vertedero – prototipo

Fuente: Intertechne (2012)

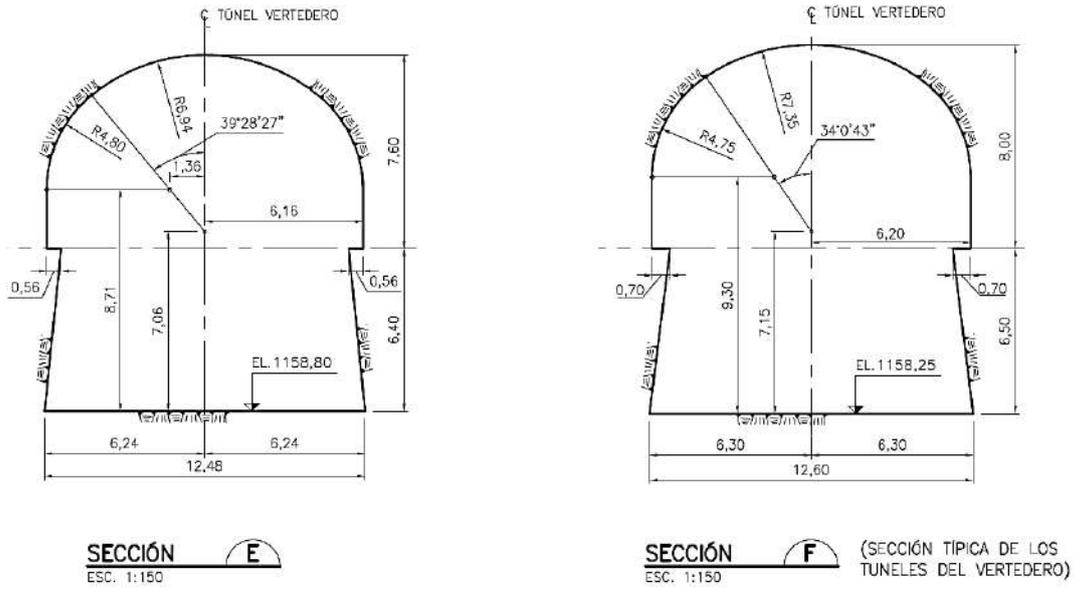


Figura 95. Secciones transversales E y F, en la entrada de los túneles de vertedero – prototipo

Fuente: Intertechne (2012)

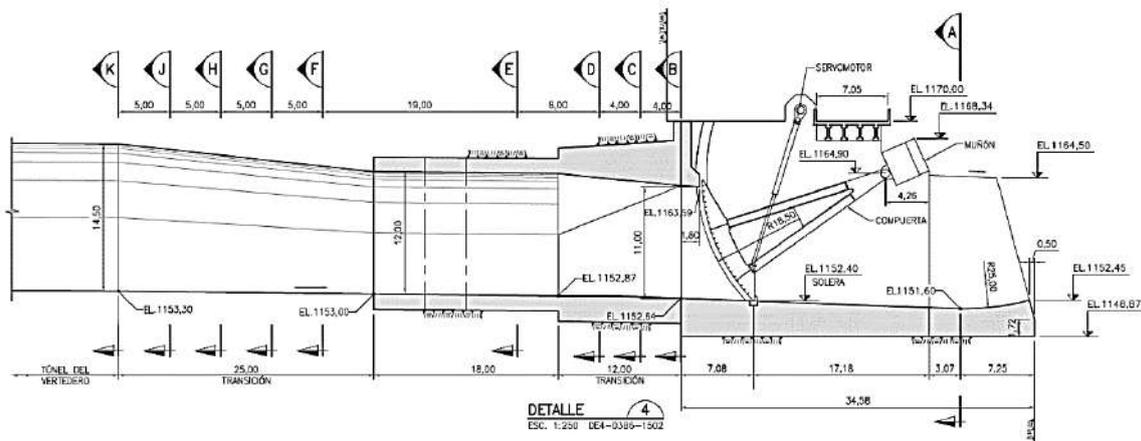


Figura 96. Zonas de transición en la salida de los túneles de vertedero – prototipo

Fuente: Intertechne (2012)

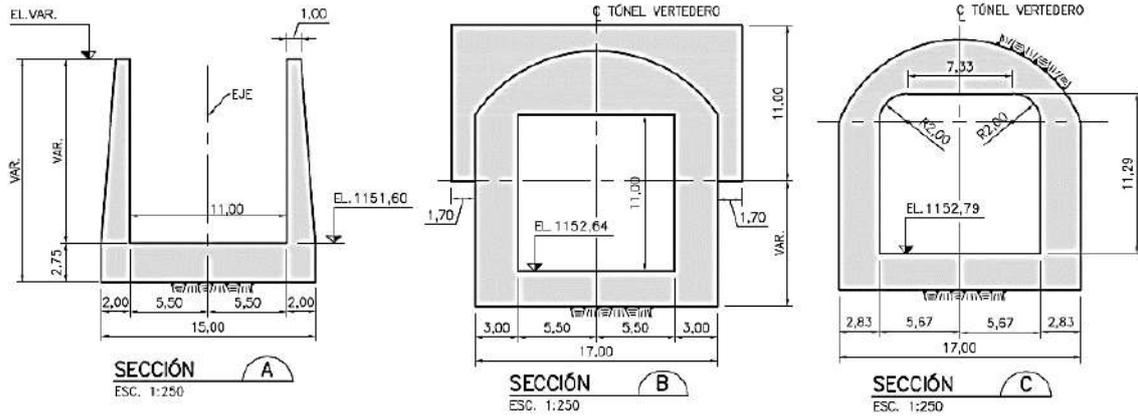


Figura 97. Secciones transversales A, B y C, en la salida de los túneles de vertedero – prototipo

Fuente: Intertechne (2012)

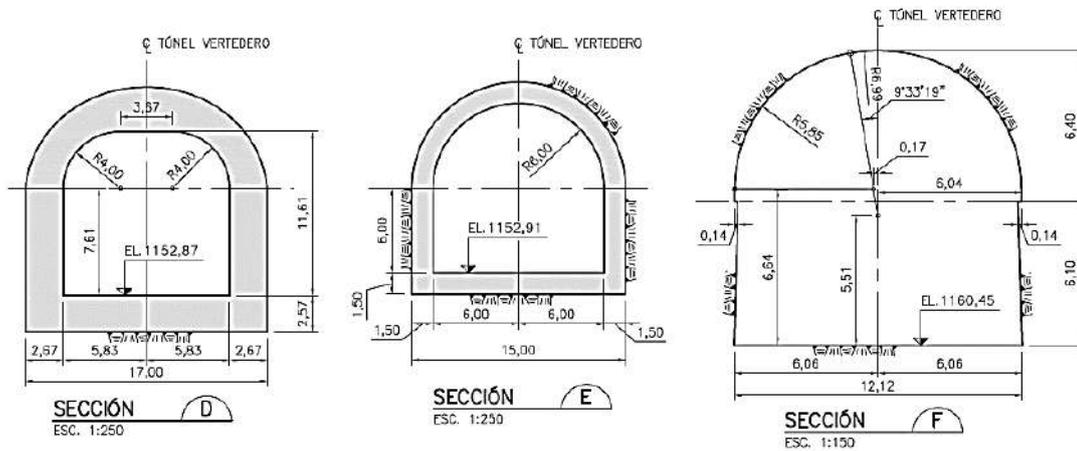


Figura 98. Secciones transversales D, E y F, en la salida de los túneles de vertedero – prototipo

Fuente: Intertechne (2012)



Figura 99. Elaboración de los túneles de vertedero, según las especificaciones

Fuente: IHHS (2014)

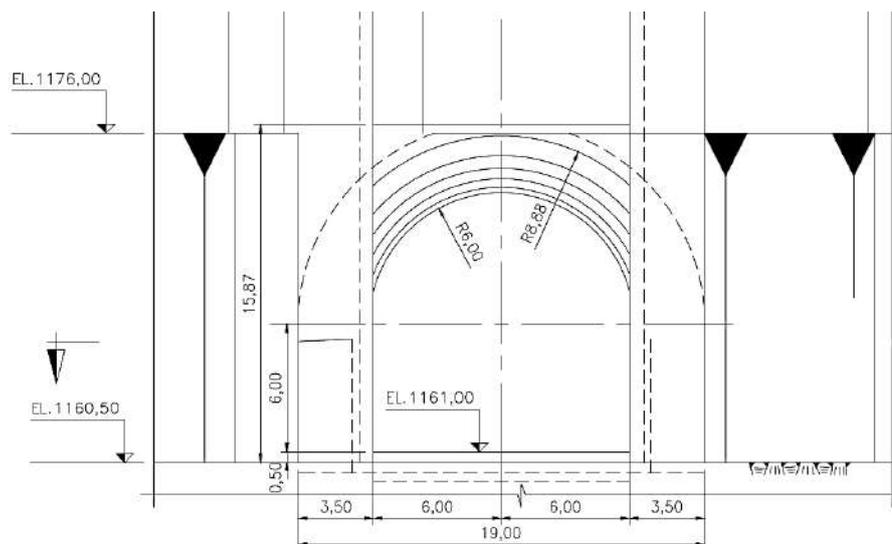


Figura 100. Detalle de la toma de vertedero en el túnel 2

Fuente: Intertechne (2012)



Figura 101. Detalle de la toma de vertedero en los 3 túneles

Fuente: IHHS (2014)



Figura 102. Instalación y empalme de las secciones de los túneles de vertedero

Fuente: IHHS (2014)



Figura 103. Instalación de compuertas ataguía

Fuente: IHHS (2014)

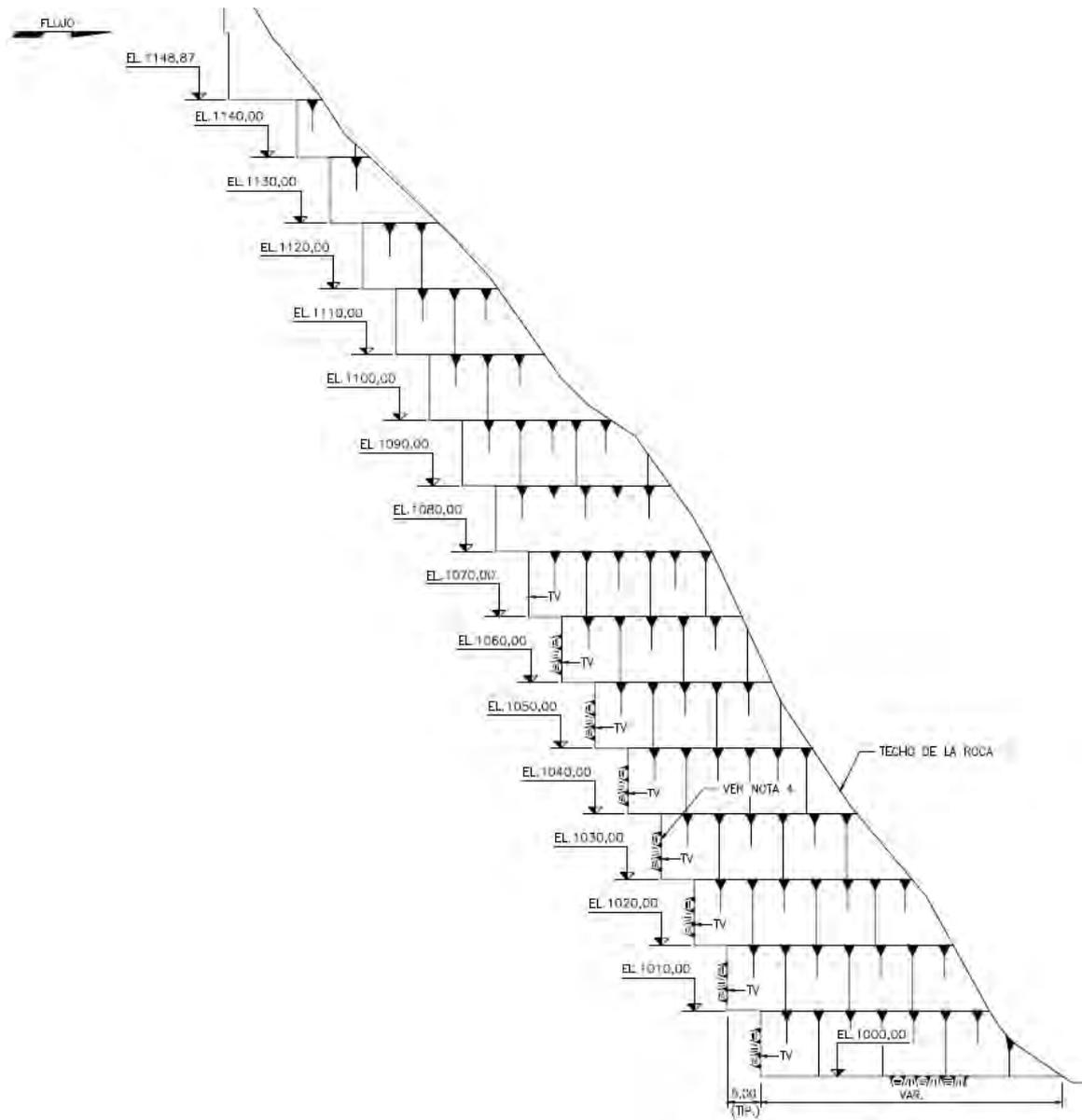


Figura 104. Vista en perfil del cuenco amortiguador, entre las cotas 1000 y 1148.87 m.s.n.m.

Fuente: Intertechne (2012)



Figura 105. Construcción cuenco amortiguador a la salida de los vertederos.

Fuente: IHHS (2014)



Figura 106. Configuración inicial del cuenco amortiguador

Fuente: IHHS (2014)

A1.3. Proceso constructivo aguas abajo

Aunque las secciones aguas abajo se encuentran al final del modelo, éstas fueron construidas al inicio, junto con el cauce del río Huallaga. Ver figuras 107 y 108.



Figura 107. Construcción del cauce del río Huallaga, sin estructuras

Fuente: IHHS (2014)



Figura 108. Zona aguas abajo terminada, durante la construcción del cuenco amortiguador

Fuente: IHHS (2014)

A2. Resultados Serie 2A-2

A2.1. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, Q = 641 m³/s

A2.1.1. Niveles y velocidades

Tabla 41.		Niveles y velocidades aguas arriba – Q = 641 m ³ /s			
Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T1	A	4.35	1163.5	0.87	–
				2.61	3.84
				3.48	–
	B	5.7	1164.15	1.14	–
				3.42	3.56
				4.56	–
	C	5.5	1164	1.1	–
				3.3	2.95
				4.4	–
	D	5.4	1163.9	1.08	–
				3.24	2.20
				4.32	–
	E	5.85	1163.9	1.17	–
				3.51	1.73
				4.68	–
T2	A	4.3	1163.25	0.86	–
				2.58	3.58
				3.44	–
	B	5.8	1164.1	1.16	–
				3.48	2.37
				4.64	–
	C	5.65	1163.8	1.13	–
				3.39	1.74
				4.52	–
	D	5.7	1163.9	1.14	–
				3.42	1.24
				4.56	–

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 41. Niveles y velocidades aguas arriba – $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$ (continuación)

Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T2	E	5.85	1163.9	1.17	–
				3.51	0.83
				4.68	–
T3	A	4.85	1163.5	0.97	–
				2.91	3.41
				3.88	–
	B	6.25	1164.25	1.25	–
				3.75	2.17
				5	–
	C	5.85	1162.6	1.17	–
				3.51	1.38
				4.68	–
	D	6	1162.7	1.2	–
				3.6	0.81
				4.8	–
E	6.1	1162.75	1.22	–	
			3.66	0.64	
			4.88	–	
F	6	1162.85	1.2	–	
			3.6	0.55	
				4.8	–

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 42.		Niveles y velocidades aguas abajo – $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$			
Sección	Posición	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
58	MI	2.7	998.25	0.54	–
				1.62	–
				2.16	–
	EJE	3.95	998.1	0.79	–
				2.37	3.09
				3.16	–
MD	3.45	997.95	0.69	–	
			2.07	2.81	
			2.76	–	
68	MI	0.95	996.9	0.19	–
				0.57	–
				0.76	–
	EJE	3.3	996.95	0.66	–
				1.98	6.04
				2.64	–
MD	1.75	997.1	0.35	–	
			1.05	–	
				1.4	–

Fuente: IHHS (2014)

A2.1.2. Condiciones de flujo



Figura 109. Líneas de corriente hacia el túnel 1 – $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

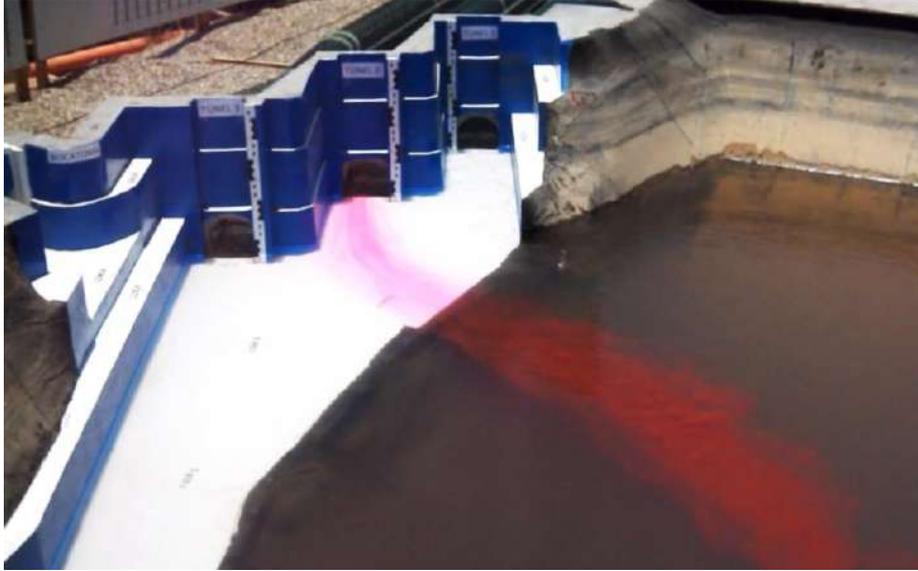


Figura 110. Líneas de corriente hacia el túnel 2 – $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)



Figura 111. Líneas de corriente hacia el túnel 3 – $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

A2.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, Q = 1832 m³/s

A2.2.1. Niveles y velocidades

Tabla 43.		Niveles y velocidades aguas arriba – Q = 1832 m ³ /s			
Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T1	A	4.35	1170.25	0.87	5.89
				2.61	5.59
				3.48	5.61
	B	5.7	1170.25	1.14	5.17
				3.42	5.26
				4.56	5.40
	C	5.5	1170	1.1	3.50
				3.3	3.99
				4.4	4.20
	D	5.4	1169.75	1.08	3.00
				3.24	3.50
				4.32	3.20
	E	5.85	1170.75	1.17	1.99
				3.51	1.99
				4.68	2.00
T2	A	4.3	1169.75	0.86	5.35
				2.58	5.06
				3.44	4.75
	B	5.8	1170.7	1.16	3.54
				3.48	3.41
				4.64	3.44
	C	5.65	1170.75	1.13	2.29
				3.39	2.31
				4.52	2.31
	D	5.7	1170.75	1.14	1.46
				3.42	1.58
				4.56	1.64
	E	5.85	1170.75	1.17	1.22
				3.51	1.33
				4.68	1.24

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 43. Niveles y velocidades aguas arriba – $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$ (continuación)

Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T3	A	4.85	1170.25	0.97	4.60
				2.91	4.20
				3.88	4.38
	B	6.25	1171.25	1.25	3.05
				3.75	2.83
				5	3.10
	C	5.85	1171	1.17	1.82
				3.51	1.81
				4.68	1.86
	D	6	1171	1.2	1.30
				3.6	1.28
				4.8	1.33
	E	6.1	1171	1.22	1.00
				3.66	1.01
				4.88	1.01
	F	–	1171.25	–	–
				–	–
				–	–

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 44. Niveles y velocidades aguas abajo – $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

Sección	Posición	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
58	MI	4.9	1003.9	0.98	–
				2.94	3.83
				3.92	3.99
	EJE	6	1003.9	1.2	–
				3.6	3.67
				4.8	3.38
MD	7.25	1003.75	1.45	–	
			4.35	3.91	
			5.8	3.79	
68	MI	6.2	1002.65	1.24	–
				3.72	5.26
				4.96	5.02
	EJE	7.65	1002.6	1.53	4.24
				4.59	5.83
				6.12	5.75
MD	6.3	1002.4	1.26	–	
			3.78	3.95	
			5.04	1.75	

Fuente: IHHS (2014)

A2.2.2. Condiciones de flujo

Figura 112. Líneas de corriente hacia el túnel 1 – $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)



Figura 113. Líneas de corriente hacia el túnel 2 – $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)



Figura 114. Líneas de corriente hacia el túnel 3 – $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

A2.3. Resultados del ensayo, Serie 2A-2, Q = 3621 m³/s

A2.3.1. Niveles y velocidades

Tabla 45.		Niveles y velocidades aguas arriba – Q = 3621 m ³ /s			
Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T1	A	17.5	1178.5	3.5	7.65
				10.5	4.48
				14	3.54
	B	18.5	1179	3.7	5.17
				11.1	2.64
				14.8	2.67
	C	18.1	1178.6	3.62	3.63
				10.86	1.27
				14.48	1.93
	D	18.75	1179.25	3.75	4.56
				11.25	3.85
				15	2.98
	E	19	1179.5	3.8	2.07
				11.4	2.24
				15.2	2.26
T2	A	17.75	1178.75	3.55	8.41
				10.65	6.74
				14.2	4.94
	B	19	1179.5	3.8	4.49
				11.4	4.32
				15.2	3.97
	C	18.9	1179.4	3.78	2.57
				11.34	2.61
				15.12	2.70
	D	18.9	1179.4	3.78	1.81
				11.34	2.22
				15.12	2.05
	E	19.1	1179.6	3.82	1.42
				11.46	1.77
				15.28	1.70

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 45. Niveles y velocidades aguas arriba – $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$ (continuación)

Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T3	A	18.25	1179.25	3.65	7.41
				10.95	5.93
				14.6	4.13
	B	19.2	1179.7	3.84	3.96
				11.52	3.78
				15.36	3.43
	C	19.1	1179.6	3.82	2.08
				11.46	2.18
				15.28	2.15
	D	19.25	1179.75	3.85	1.58
				11.55	1.60
				15.4	1.67
	E	19.35	1179.85	3.87	1.23
				11.61	1.35
				15.48	1.31
	F	19.4	1179.9	3.88	0.88
				11.64	0.96
				15.52	0.95

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 46. Niveles y velocidades aguas abajo – $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$

Sección	Posición	Tirante prototipo (m)	Nivel de agua (msnm)	kH (m)	Velocidad (m/s)
58	MI	14.6	1014.1	2.92	3.46
				8.76	3.67
				11.68	3.67
	EJE	16.9	1014.15	3.38	2.36
				10.14	3.67
				13.52	3.67
MD	15.9	1013.9	3.18	3.71	
			9.54	3.95	
			12.72	3.09	
68	MI	15.65	1010.85	3.13	1.95
				9.39	2.81
				12.52	3.46
	EJE	13.55	1010.85	2.71	1.87
				8.13	1.91
				10.84	2.11
MD	16	1010.7	3.2	4.81	
			9.6	3.46	
				12.8	3.67

Fuente: IHHS (2014)

A2.3.2. Condiciones de flujo

Figura 115. Líneas de corriente hacia el túnel 1 – $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)



Figura 116. Líneas de corriente hacia el túnel 2 – $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)



Figura 117. Líneas de corriente hacia el túnel 3 – $Q = 3621 \text{ m}^3/\text{s}$

Fuente: IHHS (2014)

A3. Resultados de la Serie 2A-4

A3.1. Serie 2A-4, $Q = 354 \text{ m}^3/\text{s}$

A3.1.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-4, $Q = 354 \text{ m}^3/\text{s}$

El ensayo de la serie 2A-4, correspondiente al caudal de $354 \text{ m}^3/\text{s}$, se realizó con la toma abierta, por la cual pasa un caudal de $152.72 \text{ m}^3/\text{s}$, y las compuertas de los vertederos parcialmente abiertas.

Considerando el caudal a pasar y el nivel del embalse en la cota 1196 m.s.n.m. (NAMO), se obtuvo una abertura de compuertas 25 cm en prototipo.

A3.1.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-4, $Q = 354 \text{ m}^3/\text{s}$

Tabla 47.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2A-4 – $Q = 354 \text{ m}^3/\text{s}$		
Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T1	A	35.5	7.1	--
			21.3	0.37
			28.4	0.50
	B	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	0.40
	C	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--
	D	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--
	E	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 47. Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2A-4 – $Q = 354 \text{ m}^3/\text{s}$ (continuación)

Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T2	A	35.5	7.1	--
			21.3	0.39
			28.4	0.50
	B	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	0.36
	C	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--
	D	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--
	E	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--
T3	A	35.5	7.1	--
			21.3	0.39
			28.4	0.52
	B	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	0.37
	C	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--
	D	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--
	E	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--
F	35.5	7.1	--	
		21.3	--	
		28.4	--	

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 48. Niveles y velocidades en la entrada de la bocatoma – Serie 2A-4 – $Q = 354 \text{ m}^3/\text{s}$

Sección	Tirante (m)	kH (m)	Velocidad (m/s)
B1-A	16	3.2	0.63
		9.6	0.92
		12.8	0.91
B1-B	16	3.2	0.58
		9.6	0.66
		12.8	0.63
B1-C	16	3.2	0.52
		9.6	0.53
		12.8	0.51
B1-D	16	3.2	0.44
		9.6	0.44
		12.8	0.43
B2-A	14.5	2.9	0.65
		8.7	0.88
		11.6	0.95
B2-B	16	3.2	0.64
		9.6	0.70
		12.8	0.68
B2-C	16	3.2	0.52
		9.6	0.50
		12.8	0.51
B2-D	16	3.2	0.42
		9.6	0.42
		12.8	0.42
B3-A	16	3.2	0.44
		9.6	0.46
		12.8	0.46
B3-B	16	3.2	0.41
		9.6	0.42
		12.8	0.41

Fuente: IHHS (2014)

A3.2. Serie 2A-4, Q = 641 m³/s

A3.2.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-4, Q = 641 m³/s

El ensayo de la serie 2A-4, correspondiente al caudal de 641m³/s, se realizó con la toma abierta, por la cual pasa un caudal de 152.72 m³/s, y las compuertas de los vertederos parcialmente abiertas.

Considerando el caudal a pasar y el nivel del embalse en la cota 1196 m.s.n.m. (NAMO), se obtuvo una abertura de compuertas 80 cm en prototipo.

A3.2.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-4, Q = 641 m³/s

Tabla 49.

Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2A-4 – Q = 641 m³/s

Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T1	A	35.5	7.1	--
			21.3	0.70
			28.4	1.02
	B	35.5	7.1	--
			21.3	0.57
			28.4	0.62
	C	35.5	7.1	0.41
			21.3	0.42
			28.4	0.46
	D	35.5	7.1	0.35
			21.3	0.37
			28.4	0.40
	E	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 49. Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2A-4 – $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$ (continuación)

Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T2	A	35.5	7.1	--
			21.3	0.39
			28.4	0.50
	B	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	0.36
	C	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--
	D	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--
	E	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--
T3	A	35.5	7.1	--
			21.3	0.67
			28.4	1.03
	B	35.5	7.1	--
			21.3	0.48
			28.4	0.50
	C	35.5	7.1	0.36
			21.3	0.36
			28.4	--
	D	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--
	E	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--
F	35.5	7.1	--	
		21.3	--	
		28.4	--	

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 50. Niveles y velocidades en la entrada de la bocatoma – Serie 2A-4 – $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$

Sección	Tirante (m)	kH (m)	Velocidad (m/s)
B1-A	16	3.2	0.62
		9.6	0.84
		12.8	0.78
B1-B	16	3.2	0.59
		9.6	0.63
		12.8	0.61
B1-C	16	3.2	0.53
		9.6	0.52
		12.8	0.54
B1-D	16	3.2	0.45
		9.6	0.46
		12.8	0.44
B2-A	14.5	2.9	0.65
		8.7	0.82
		11.6	0.81
B2-B	16	3.2	0.64
		9.6	0.66
		12.8	0.63
B2-C	16	3.2	0.52
		9.6	0.50
		12.8	0.51
B2-D	16	3.2	0.45
		9.6	0.43
		12.8	0.45
B3-A	16	3.2	0.44
		9.6	0.43
		12.8	0.45
B3-B	16	3.2	--
		9.6	--
		12.8	--

Fuente: IHHS (2014)

A3.3. Serie 2A-4, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$

A3.3.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-4, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$

El ensayo de la serie 2A-4, correspondiente al caudal de $641 \text{ m}^3/\text{s}$, se realizó con la toma abierta, por la cual pasa un caudal de $152.72 \text{ m}^3/\text{s}$, y las compuertas de los vertederos parcialmente abiertas.

Considerando el caudal a pasar y el nivel del embalse en la cota 1196 m.s.n.m. (NAMO), se obtuvo una abertura de compuertas 1.6 m en prototipo.

A3.3.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-4, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$

Tabla 51.

Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2A-4 – $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$

Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T1	A	35.5	7.1	--
			21.3	1.28
			28.4	2.21
	B	35.5	7.1	0.15
			21.3	1.04
			28.4	1.08
	C	35.5	7.1	0.74
			21.3	0.88
			28.4	0.64
	D	35.5	7.1	0.40
			21.3	0.61
			28.4	0.55
	E	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 51. Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2A-4 – $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$ (continuación)

Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T2	A	35.5	7.1	--
			21.3	1.15
			28.4	2.16
	B	35.5	7.1	0.10
			21.3	0.97
			28.4	1.03
	C	35.5	7.1	0.56
			21.3	0.57
			28.4	0.43
	D	35.5	7.1	0.33
			21.3	0.48
			28.4	0.40
	E	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--
T3	A	35.5	7.1	--
			21.3	1.05
			28.4	2.09
	B	35.5	7.1	0.10
			21.3	0.85
			28.4	0.94
	C	35.5	7.1	0.48
			21.3	0.50
			28.4	0.40
	D	35.5	7.1	0.28
			21.3	0.41
			28.4	0.39
	E	35.5	7.1	--
			21.3	--
			28.4	--
F	35.5	7.1	--	
		21.3	--	
		28.4	--	

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 52.

Niveles y velocidades en la entrada de la bocatoma – Serie 2A-4 – $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$

Sección	Tirante (m)	kH (m)	Velocidad (m/s)
B1-A	16	3.2	1.40
		9.6	0.97
		12.8	--
B1-B	16	3.2	--
		9.6	--
		12.8	--
B1-C	16	3.2	--
		9.6	--
		12.8	--
B1-D	16	3.2	--
		9.6	--
		12.8	--
B2-A	14.5	2.9	1.44
		8.7	1.06
		11.6	--
B2-B	16	3.2	--
		9.6	--
		12.8	--
B2-C	16	3.2	--
		9.6	--
		12.8	--
B2-D	16	3.2	--
		9.6	--
		12.8	--
B3-A	16	3.2	--
		9.6	--
		12.8	--
B3-B	16	3.2	--
		9.6	--
		12.8	--

Fuente: IHHS (2014)

A3.4. Serie 2A-4, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

A3.4.1. Condiciones del ensayo, Serie 2A-4, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

El ensayo de la serie 2A-4, correspondiente al caudal de $641 \text{ m}^3/\text{s}$, se realizó con la toma abierta, por la cual pasa un caudal de $152.72 \text{ m}^3/\text{s}$, y las compuertas de los vertederos parcialmente abiertas.

Considerando el caudal a pasar y el nivel del embalse en la cota 1196 m.s.n.m. (NAMO), se obtuvo una abertura de compuertas 2.78 m en prototipo.

A3.4.2. Resultados del ensayo, Serie 2A-4, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

Tabla 53.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2A-4 – $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$		
Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T1	A	35.5	7.1	0.79
			21.3	1.14
			28.4	2.81
	B	35.5	7.1	1.00
			21.3	1.45
			28.4	1.52
	C	35.5	7.1	0.94
			21.3	0.73
			28.4	0.88
	D	35.5	7.1	0.42
			21.3	0.75
			28.4	0.77
	E	35.5	7.1	0.43
			21.3	0.22
			28.4	0.50

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 53. Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2A-4 – $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$ (continuación)

Túnel	Sección	Tirante prototipo (m)	kH (m)	Velocidad (m/s)
T2	A	35.5	7.1	0.55
			21.3	1.35
			28.4	2.98
	B	35.5	7.1	0.68
			21.3	1.16
			28.4	1.35
	C	35.5	7.1	0.67
			21.3	0.62
			28.4	0.44
	D	35.5	7.1	0.36
			21.3	0.63
			28.4	0.53
	E	35.5	7.1	0.39
			21.3	0.17
			28.4	0.49
T3	A	35.5	7.1	0.50
			21.3	1.59
			28.4	3.03
	B	35.5	7.1	0.58
			21.3	1.07
			28.4	1.33
	C	35.5	7.1	0.57
			21.3	0.55
			28.4	0.56
	D	35.5	7.1	0.33
			21.3	0.58
			28.4	0.51
	E	35.5	7.1	0.31
			21.3	0.16
			28.4	0.51
F	35.5	7.1	--	
		21.3	--	
		28.4	0.44	

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 54. Niveles y velocidades en la entrada de la bocatoma – Serie 2A-4 – $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

Sección	Tirante (m)	kH (m)	Velocidad (m/s)
B1-A	16	3.2	1.02
		9.6	1.38
		12.8	1.39
B1-B	16	3.2	0.93
		9.6	0.95
		12.8	0.93
B1-C	16	3.2	0.87
		9.6	0.83
		12.8	0.84
B1-D	16	3.2	--
		9.6	--
		12.8	--
B2-A	14.5	2.9	1.06
		8.7	1.38
		11.6	1.40
B2-B	16	3.2	0.99
		9.6	1.02
		12.8	0.91
B2-C	16	3.2	0.83
		9.6	0.81
		12.8	0.71
B2-D	16	3.2	--
		9.6	--
		12.8	--
B3-A	16	3.2	--
		9.6	--
		12.8	--
B3-B	16	3.2	--
		9.6	--
		12.8	--

Fuente: IHHS (2014)

A4. Resultados Serie 2C

A4.1. Serie 2C, abertura de compuertas 0.25 m

A4.1.1. Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de 0.25 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2C, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de cada uno de los vertederos con una abertura de 0.25 m Se ensayaron 3 caudales (230 m³/s, 235 m³/s y 236 m³/s) dentro de un rango de niveles comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

A4.1.2. Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de 0.25 m

Tabla 55.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2C – abertura 0.25 m					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.4	C1196	C1195	C1195.4	C1196
1	A	1194.75	1195.45	1196.00	0.50	0.46	0.45
	C	1194.65	1195.40	1195.90	--	--	--
	E	1194.60	1195.40	1196.05	--	--	--
2	A	1194.60	1195.35	1195.90	0.50	0.49	0.50
	C	1194.55	1195.20	1195.75	--	--	--
	E	1194.45	1195.25	1195.95	--	--	--
3	A	1194.85	1195.55	1196.05	0.49	0.47	0.47
	C	1194.65	1195.50	1195.90	--	--	--
	E	1194.85	1195.50	1196.00	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 56. Niveles aguas abajo – Serie 2C – abertura 0.25 m

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.4	C1196
58	MI	998.15	997.75	997.85
	EJE	998.4	997.45	997.95
	MD	998.6	998.2	998.5
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	998.55	998.55	998.35
	3	997.85	997.95	997.95
	3'	997.95	997.85	998
	4	1000.45	1000.45	1000.45
68	MI	997.3	997.3	997.3
	EJE	996.7	996.05	996.35
	MD	997.35	996.6	996.85

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 57. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2C – abertura 0.25 m

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.4	C1196		C1195	C1195.4	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	1.7	1.7	1.5	0.2H	0.87	0.93	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3	2.2	2.2	2.3	0.2H	1.54	1.64	1.87
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3'	2.6	2.6	2.65	0.2H	1.77	1.75	2.01
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
4	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 58. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 0.25 m

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m³/s)
1195	225
1195.4	230
1196	236

Fuente: IHHS (2014)

A4.2. Serie 2C, abertura de compuertas 0.50 m

A4.2.1. Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de 0.50 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2C, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de cada uno de los vertederos con una abertura de 0.50 m Se ensayaron 3 caudales (430 m³/s, 435 m³/s y 440 m³/s) dentro de un rango de niveles comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

A4.2.2. Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de 0.50 m

Tabla 59.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2C – abertura 0.50 m					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.7	C1196	C1195	C1195.7	C1196
1	A	1195.35	1195.75	1196.25	0.81	0.79	0.70
	C	1195.00	1195.55	1196.45	0.30	0.36	--
	E	1195.00	1195.85	1196.30	--	--	--
2	A	1195.35	1195.70	1196.10	0.75	0.74	0.72
	C	1195.00	1195.55	1196.20	--	--	--
	E	1195.00	1195.45	1196.10	--	--	--
3	A	1195.40	1195.80	1196.40	0.76	0.78	0.68
	C	1195.20	1195.90	1196.45	--	--	--
	E	1195.10	1195.75	1196.40	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 60. Niveles aguas abajo – Serie 2C – abertura 0.50 m

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.7	C1196
58	MI	999.85	999.05	998.9
	EJE	999.4	998.95	998.95
	MD	1000	999.7	999.5
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1000.25	999.6	999.85
	3	999.25	999.2	999.15
	3'	999.35	999.1	998.95
	4	1000.95	1000.45	1003
68	MI	998.05	997.3	999.05
	EJE	997.55	997.75	998.4
	MD	998.05	998.15	998.8

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 61. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2C – abertura 0.50 m

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.7	C1196		C1195	C1195.7	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	3.4	2.75	3	0.2H	1.32	1.87	1.77
				0.6H	1.81	--	--
				0.8H	--	--	--
3	3.6	3.55	3.5	0.2H	1.79	1.85	--
				0.6H	1.53	--	--
				0.8H	--	--	--
3'	4	3.75	3.6	0.2H	1.63	2.26	--
				0.6H	1.79	2.09	--
				0.8H	--	--	--
4	0.5	--	2.55	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 62. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 0.50 m

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m³/s)
1195	430
1195.7	435
1196	440

Fuente: IHHS (2014)

A4.3. Serie 2C, abertura de compuertas 1 m

A4.3.1. Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 1 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2C, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de cada uno de los vertederos con una abertura de 1 m. Se ensayaron 3 caudales ($647 \text{ m}^3/\text{s}$, $652 \text{ m}^3/\text{s}$ y $658 \text{ m}^3/\text{s}$) dentro de un rango de niveles comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

A4.3.2. Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 1 m

Tabla 63.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2C – abertura 1 m					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1195	C1195.5	C1195	C1195.5
1	A	1195.10	1195.50	1195.75	1.35	1.29	1.32
	C	1194.85	1195.45	1195.15	0.42	0.45	0.48
	E	1194.70	1195.40	1194.95	--	0.29	--
2	A	1195.00	1195.45	1195.50	1.29	1.25	1.30
	C	1194.65	1195.30	1195.50	0.37	0.35	0.11
	E	1194.80	1195.20	1195.40	--	--	--
3	A	1195.20	1195.55	1195.75	1.26	1.28	1.25
	C	1195.05	1195.50	1195.65	0.35	0.34	0.35
	E	1194.95	1195.55	1195.50	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 64. Niveles aguas abajo – Serie 2C – abertura 1 m

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	1001.5	1001.8	1001.5
	EJE	997.05	1001.9	1001.4
	MD	1001.9	1002.1	1001.85
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1001.15	1001.5	1001.45
	3	996.75	997.25	997.05
	3'	997.95	998.6	997.75
	4	1000.95	1001.45	1001.2
68	MI	997.55	999	1000.95
	EJE	998.8	998.85	998.7
	MD	999.05	999.3	999.55

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 65. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2C – abertura 1 m

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	4.3	4.65	4.6	0.2H	2.81	2.74	3.36
				0.6H	2.73	2.53	2.57
				0.8H	--	--	--
3	1.1	1.6	1.4	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3'	2.6	3.25	2.4	0.2H	3.81	2.72	3.18
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
4	0.5	1	0.75	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 66. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 1 m

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m³/s)
1195	647
1195.5	652
1196	658

Fuente: IHHS (2014)

A4.4. Serie 2C, abertura de compuertas 2 m

A4.4.1. Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 2 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2C, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de cada uno de los vertederos con una abertura de 2 m. Se ensayaron 4 caudales (1415 m³/s, 1445 m³/s, 1450 m³/s y 1470 m³/s) dentro de un rango de niveles comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

A4.4.2. Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 2 m

Tabla 67. Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2C – abertura 2 m

Túnel	Sección	Niveles (m)				Velocidades (m/s)			
		C1195	C1195.4	C1195.6	C1196	C1195	C1195.4	C1195.6	C1196
1	A	-	1195.50	1195.50	-	2.27	2.25	2.24	2.02
	C	-	1195.25	1195.40	-	0.73	0.64	0.47	0.55
	E	-	1195.25	1195.50	-	0.36	0.35	0.56	0.43
2	A	-	1195.00	1195.40	-	2.27	2.30	2.35	2.29
	C	-	1195.25	1195.25	-	0.36	0.48	0.45	0.46
	E	-	1195.00	1195.15	-	0.37	0.29	0.30	0.30
3	A	-	1195.50	1195.55	-	2.16	2.31	2.15	2.17
	C	-	1195.50	1195.50	-	0.49	0.37	0.51	0.45
	E	-	1195.50	1195.55	-	0.32	0.46	0.40	0.37

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 68. Niveles aguas abajo – Serie 2C – abertura 2 m

Sección	Posición	Niveles (m)			
		C1195	C1195.4	C1195.6	C1196
58	MI	--	--	--	--
	EJE	--	--	--	--
	MD	--	--	--	--
63	1	1006.9	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1002.6	1002.6	1002.35	1002.75
	3	1002.15	1002.05	1002.2	1002.65
	3'	1002.85	1002.1	1001.6	1002.35
	4	1003.95	1005.2	1004.95	1003.45
68	MI	--	--	--	--
	EJE	--	--	--	--
	MD	--	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 69. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2C – abertura 2 m

Sección	Niveles (m)				KH	Velocidades (m/s)			
	C1195	C1195.4	C1195.6	C1196		C1195	C1195.4	C1195.6	C1196
1	--	--	--	--	0.2H	--	--	--	--
					0.6H	--	--	--	--
					0.8H	--	--	--	--
2	5.75	5.75	5.5	5.9	0.2H	3.36	3.63	3.63	3.58
					0.6H	3.04	3.13	3.36	3.63
					0.8H	--	--	3.09	--
3	6.5	6.4	6.55	7	0.2H	2.55	2.59	2.28	2.68
					0.6H	2.28	2.32	2.55	2.50
					0.8H	--	1.87	2.37	2.14
3'	7.5	6.75	6.25	7	0.2H	2.23	2.41	2.82	2.41
					0.6H	2.01	2.19	2.68	2.41
					0.8H	1.79	1.70	2.14	1.92
4	3.5	4.75	4.5	3	0.2H	1.29	1.65	2.37	1.57
					0.6H	1.37	1.92	2.28	1.87
					0.8H	--	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 70. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 2 m

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m³/s)
1195	1415
1195.4	1445
1195.6	1450
1196	1470

Fuente: IHHS (2014)

A4.5. Serie 2C, abertura de compuertas 4 m

A4.5.1. Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 4 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2C, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de cada uno de los vertederos con una abertura de 4 m. Se ensayaron 4 caudales (2630 m³/s, 2650 m³/s, 2658 m³/s y 2665 m³/s) dentro de un rango de niveles comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

A4.5.2. Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 4 m

Tabla 71.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2C – abertura 4 m							
Túnel	Sección	Niveles (m)				Velocidades (m/s)			
		C1195	C1195.6	C1195.8	C1196	C1195	C1195.6	C1195.8	C1196
1	A	1195.20	1195.80	1195.25	1196.00	4.35	4.22	4.14	4.38
	C	1195.40	1195.70	1195.55	1196.00	1.10	1.19	0.76	0.70
	E	1195.45	1195.60	1195.50	1196.00	0.48	0.40	0.28	0.50
2	A	1195.15	1195.75	1195.05	1196.05	4.09	4.15	4.20	4.09
	C	1195.50	1195.60	1195.25	1195.90	0.75	0.74	0.70	0.74
	E	1195.50	1195.55	1195.50	1196.00	0.42	0.42	0.44	0.44
3	A	1195.25	1195.80	1195.25	1196.10	4.29	4.21	4.18	4.05
	C	1195.65	1195.75	1195.75	1196.10	0.83	0.84	0.84	0.84
	E	1195.70	1195.80	1195.75	1196.15	0.49	0.51	0.49	0.49

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 72. Niveles aguas abajo – Serie 2C – abertura 4 m

Sección	Posición	Niveles (m)			
		C1195	C1195.6	C1195.8	C1196
58	MI	--	--	--	--
	EJE	--	--	--	--
	MD	--	--	--	--
63	1	1006.9	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1006.25	1006.85	1006.1	1006.35
	3	1004.65	1005.55	1005.55	1005.3
	3'	1005.35	1005.35	1005.6	1005.35
	4	1006.45	1007.95	1006.45	1006.95
68	MI	--	--	--	--
	EJE	--	--	--	--
	MD	--	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 73. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2C – abertura 4 m

Sección	Niveles (m)				KH	Velocidades (m/s)			
	C1195	C1195.6	C1195.8	C1196		C1195	C1195.6	C1195.8	C1196
1	--	--	--	--	0.2H	--	--	--	--
					0.6H	--	--	--	--
					0.8H	--	--	--	--
2	9.4	10	9.25	9.5	0.2H	5.04	4.16	4.99	5.23
					0.6H	3.91	3.96	4.50	4.30
					0.8H	1.85	3.08	3.81	3.17
3	9	9.9	9.9	9.65	0.2H	2.88	2.88	2.88	2.83
					0.6H	2.63	2.34	2.63	2.49
					0.8H	2.09	2.19	2.49	2.49
3'	10	10	10.25	10	0.2H	2.78	2.93	2.78	2.34
					0.6H	2.63	2.68	2.83	2.54
					0.8H	2.68	2.19	2.88	1.76
4	6	7.5	6	6.5	0.2H	2.88	3.22	3.17	2.73
					0.6H	2.93	3.08	3.37	2.68
					0.8H	2.93	3.22	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 74. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 4 m

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m3/s)
1195	2630
1195.6	2650
1195.8	2658
1195	2630

Fuente: IHHS (2014)

A4.6. Serie 2C, abertura de compuertas 6 m

A4.6.1. Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 6 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2C, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de cada uno de los vertederos con una abertura de 6 m. Se ensayaron 3 caudales (3270 m³/s, 3315 m³/s y 3325 m³/s) dentro de un rango de niveles comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

A4.6.2. Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 6 m

Tabla 75.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2C – abertura 6 m					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.8	C1196	C1195	C1195.8	C1196
1	A	1196.40	1195.70	1195.80	5.48	5.25	5.75
	C	1196.45	1195.60	1195.95	1.05	0.91	1.21
	E	1196.50	1196.00	1196.25	0.62	0.91	0.77
2	A	1196.50	1195.55	1195.90	5.45	5.80	5.78
	C	1196.50	1195.55	1196.00	1.22	1.07	1.14
	E	1196.65	1195.75	1196.05	0.76	0.56	0.84
3	A	1196.60	1195.75	1196.00	5.69	5.53	5.44
	C	1196.60	1195.80	1196.15	1.13	1.18	1.14
	E	1196.75	1195.95	1196.25	0.80	0.81	0.82

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 76. Niveles aguas abajo – Serie 2C – abertura 6 m

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.8	C1196
58	MI	1008.25	1009.5	1008.5
	EJE	1008.15	1009.15	1007.9
	MD	1008.5	1009	1008
63	1	1008.4	1009.9	1009.4
	2	1008.85	1009.35	1008.85
	3	1007.05	1008.65	1008.15
	3'	1008.1	1008.1	1007.6
	4	1006.35	1009.05	1010.7
68	MI	1002.3	1007.3	1005.8
	EJE	1003.15	1006.9	1004.4
	MD	1004.05	1007.05	1005.3

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 77. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2C – abertura 6 m

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.8	C1196		C1195	C1195.8	C1196
1	1.5	3	2.5	0.2H	--	3.05	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	12	12.5	12	0.2H	3.48	3.93	4.06
				0.6H	3.41	3.23	3.46
				0.8H	2.95	2.54	2.87
3	11.4	13	12.5	0.2H	3.22	2.62	2.57
				0.6H	3.11	2.31	2.39
				0.8H	2.72	2.14	2.27
3'	12.75	12.75	12.25	0.2H	3.69	3.03	3.06
				0.6H	3.36	2.60	2.78
				0.8H	2.99	2.54	2.48
4	5.9	8.6	10.25	0.2H	3.75	3.42	3.32
				0.6H	3.83	3.71	3.69
				0.8H	--	3.58	3.59

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 78. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 6 m

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m³/s)
1195	3270
1195.8	3315
1196	3325

Fuente: IHHS (2014)

A4.7. Serie 2C, abertura de compuertas 8 m

A4.7.1. Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 8 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2C, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de cada uno de los vertederos con una abertura de 8 m. Se ensayaron 3 caudales ($3850 \text{ m}^3/\text{s}$, $3860 \text{ m}^3/\text{s}$ y $3900 \text{ m}^3/\text{s}$) dentro de un rango de niveles comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

A4.7.2. Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 8 m

Tabla 79.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2C – abertura 8 m					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.2	C1196	C1195	C1195.2	C1196
1	A	1194.90	1195.00	1195.35	7.69	7.16	7.00
	C	1194.70	1194.75	1195.50	1.46	1.99	1.29
	E	1194.70	1194.90	1195.65	1.07	1.24	1.11
2	A	1194.85	1194.85	1195.25	7.17	6.92	7.41
	C	1194.65	1194.65	1195.45	1.24	1.39	1.31
	E	1194.55	1194.75	1195.75	0.90	0.97	0.94
3	A	1195.00	1195.05	1195.60	6.86	6.69	7.04
	C	1194.95	1194.90	1195.75	1.47	1.45	1.48
	E	1194.85	1195.00	1195.90	1.07	0.97	0.96

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 80. Niveles aguas abajo – Serie 2C – abertura 8 m

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.2	C1196
58	MI	1009.55	1009.75	1011
	EJE	1009.7	1010.15	1010.8
	MD	1010.9	1010.5	1011
63	1	1010.65	1010.9	1011.35
	2	1010.9	1009.85	1011.15
	3	1009.4	1007.65	1009.35
	3'	1009.8	1007.45	1008.35
	4	1008.95	1010.45	1009.55
68	MI	1006.35	1004.3	1007.25
	EJE	1005.9	1005.65	1007.85
	MD	1006.65	1006.8	1009.05

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 81. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2C – abertura 8 m

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.2	C1196		C1195	C1195.2	C1196
1	3.75	4	4.45	0.2H	--	--	--
				0.6H	1.44	2.05	2.52
				0.8H	--	--	--
2	14.05	13	14.3	0.2H	3.35	3.46	3.23
				0.6H	3.10	3.33	2.94
				0.8H	2.67	2.69	2.74
3	13.75	12	13.7	0.2H	3.83	4.06	3.78
				0.6H	3.63	3.67	3.42
				0.8H	3.14	3.23	2.94
3'	14.45	12.1	13	0.2H	4.09	4.39	4.21
				0.6H	4.12	4.39	3.90
				0.8H	3.35	3.72	3.77
4	8.5	10	9.1	0.2H	3.89	3.87	4.18
				0.6H	4.58	4.74	4.42
				0.8H	4.07	4.47	4.09

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 82. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 8 m

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m³/s)
1195	3850
1195.2	3860
1196	3900

Fuente: IHHS (2014)

A4.8. Serie 2C, abertura de compuertas 9 m

A4.8.1. Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 9 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2C, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de cada uno de los vertederos con una abertura de 9 m. Se ensayaron 3 caudales (4200 m³/s, 4230 m³/s y 4250 m³/s) dentro de un rango de niveles comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

A4.8.2. Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 9 m

Tabla 83.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2C – abertura 9 m					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.6	C1196	C1195	C1195.6	C1196
1	A	1194.45	1195.25	1195.80	3.46	3.83	3.25
	C	1194.40	1195.20	1195.75	0.94	0.86	0.73
	E	1194.35	1195.30	1195.75	0.62	0.57	0.60
2	A	1194.50	1195.40	1195.85	3.81	4.05	3.63
	C	1194.40	1195.35	1195.75	0.71	0.65	0.87
	E	1194.40	1195.35	1195.75	0.52	0.49	0.86
3	A	1194.75	1195.55	1195.95	3.88	3.66	3.55
	C	1194.60	1195.55	1196.00	0.73	0.70	0.73
	E	1194.60	1195.50	1195.95	0.52	0.53	0.49

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 84. Niveles aguas abajo – Serie 2C – abertura 9 m

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.6	C1196
58	MI	1011	1010.25	1010.3
	EJE	1010.8	1010.3	1009.8
	MD	1011	1010.55	1010.9
63	1	1008.15	1010.25	1011.65
	2	1011.05	1011.1	1011.35
	3	1010.55	1010.4	1010.75
	3'	1010.55	1010.35	1010.45
	4	1008.95	1009.95	1011.45
68	MI	1007.25	1005.55	1007.2
	EJE	1007.85	1007.15	1007.55
	MD	1009.05	1008.3	1008.45

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 85. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2C – abertura 9 m

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.6	C1196		C1195	C1195.6	C1196
1	1.25	3.35	4.75	0.2H	--	--	2.04
				0.6H	--	1.75	1.93
				0.8H	--	--	--
2	14.2	14.25	14.5	0.2H	2.97	2.90	2.80
				0.6H	2.34	2.75	2.53
				0.8H	2.31	2.67	2.39
3	14.9	14.75	15.1	0.2H	3.59	3.63	3.46
				0.6H	3.59	3.41	3.22
				0.8H	3.30	3.04	3.05
3'	15.2	15	15.1	0.2H	4.07	4.18	3.99
				0.6H	4.52	4.52	4.19
				0.8H	4.74	4.63	4.33
4	8.5	9.5	11	0.2H	4.48	4.74	4.26
				0.6H	4.81	5.07	4.58
				0.8H	--	5.07	4.92

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 86. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 9 m

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m³/s)
1195	4200
1195.6	4230
1196	4250

Fuente: IHHS (2014)

A4.9. Serie 2C, abertura de compuertas 10 m

A4.9.1. Condiciones del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 10 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2C, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de cada uno de los vertederos con una abertura de 10 m. Se ensayaron 3 caudales (4475 m³/s, 4500 m³/s y 4520 m³/s) dentro de un rango de niveles comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

A4.9.2. Resultados del ensayo, Serie 2C, abertura de compuertas 10 m

Tabla 87.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2C – abertura 10 m					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.6	C1196	C1195	C1195.6	C1196
1	A	1194.45	1195.20	1195.65	3.91	3.88	3.38
	C	1194.60	1195.25	1195.60	1.06	1.10	0.99
	E	1194.70	1195.25	1195.60	0.62	0.64	0.60
2	A	1194.70	1195.40	1195.70	4.09	4.15	3.94
	C	1194.65	1195.35	1195.55	0.63	0.69	0.78
	E	1194.65	1195.30	1195.60	0.48	0.51	0.54
3	A	1194.95	1195.70	1195.90	4.18	4.19	4.21
	C	1194.95	1195.55	1195.80	0.73	0.72	0.61
	E	1195.00	1195.65	1195.90	0.55	0.53	0.52

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 88. Niveles aguas abajo – Serie 2C – abertura 10 m

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.6	C1196
58	MI	1010.55	1010.65	1011.5
	EJE	1011.25	1010.9	1011
	MD	1012.2	1011.75	1010.65
63	1	1009.65	1010.45	1009.4
	2	1011.85	1011.55	1011.7
	3	1010.9	1011.45	1011
	3'	1011	1011.15	1009.65
	4	1011.6	1010.95	1010.45
	68	MI	1008.05	1009.8
	EJE	1007.4	1008.2	1008.3
	MD	1008.8	1009.8	1009.05

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 89. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2C – abertura 10 m

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.6	C1196		C1195	C1195.6	C1196
1	2.75	3.55	2.5	0.2H	2.15	2.69	2.53
				0.6H	--	1.87	--
				0.8H	--	--	--
2	15	14.7	14.85	0.2H	2.77	2.86	2.86
				0.6H	2.53	2.62	2.71
				0.8H	2.53	2.45	2.60
3	15.25	15.8	15.35	0.2H	3.60	3.54	3.71
				0.6H	3.29	3.37	3.63
				0.8H	3.05	2.99	3.30
3'	15.65	15.8	14.3	0.2H	3.87	4.02	4.29
				0.6H	4.11	4.22	4.52
				0.8H	4.11	4.29	4.29
4	11.15	10.5	10	0.2H	4.21	4.09	4.33
				0.6H	4.63	4.50	4.96
				0.8H	4.59	4.70	4.85

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 90. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 10 m

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m³/s)
1195	4475
1195.6	4500
1196	4520

Fuente: IHHS (2014)

A5. Resultados de la Serie 2E

A5.1. Aberturas parciales

A5.1.1. Serie 2E, abertura de compuerta 0.25 m

Condiciones del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 0.25 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2-E, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos abiertas individualmente (una abierta y las otras 2 cerradas) a 0.25 m. Se ensayaron 3 caudales dentro de un rango de niveles generalmente comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

Resultados del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 0.25 m

Tabla 91.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 0.25 m en el túnel 1					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1196	C1195	C1195.5	C1196
1	A	1195.25	1195.75	1195.90	0.51	0.55	0.51
	C	1195.20	1196.25	1196.00	--	--	--
	E	1195.30	1196.25	1514.50	--	--	--
2	A	1195.15	1195.75	1195.75	--	--	--
	C	1195.05	1196.00	1195.75	--	--	--
	E	1195.15	1196.00	1195.75	--	--	--
3	A	1195.05	1195.75	1196.05	--	--	--
	C	1195.25	1196.25	1196.10	--	--	--
	E	1195.10	1196.25	1196.10	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 92.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 0.25 m en el túnel 2					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.6	C1196	C1195	C1195.6	C1196
1	A	1194.15	1195.10	1196.55	--	--	--
	C	1194.20	1195.10	1196.65	--	--	--
	E	1194.10	1195.05	1196.60	--	--	--
2	A	1194.00	1195.05	1196.50	0.46	0.53	0.11
	C	1193.95	1194.95	1196.50	--	--	--
	E	1193.95	1195.00	1196.45	--	--	--
3	A	1194.15	1195.30	1196.75	--	--	--
	C	1194.15	1195.15	1196.70	--	--	--
	E	1194.15	1195.15	1196.80	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 93.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 0.25 m en el túnel 3					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1196	C1195	C1195.5	C1196
1	A	1195.00	1195.50	1196.00	--	--	--
	C	1194.90	1195.45	1196.00	--	--	--
	E	1195.00	1195.40	1196.10	--	--	--
2	A	1194.75	1195.40	1196.05	--	--	--
	C	1194.65	1195.30	1195.95	--	--	--
	E	1194.75	1195.25	1196.05	--	--	--
3	A	1195.00	1195.60	1195.95	0.50	1.23	0.52
	C	1194.90	1195.60	1195.90	--	--	--
	E	1194.65	1195.65	1196.00	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 94. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 0.25 m en el túnel 1

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	997.45	997.25	997.35
	EJE	997.15	997.15	997.15
	MD	997.65	997.5	997.6
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	997.8	997.6	997.95
	3	997.2	996.95	997.15
	3'	997.15	996.7	996.9
	4	1000.45	1000.45	1000.45
68	MI	997.3	997.3	997.3
	EJE	995.45	995.45	995.4
	MD	995.8	995.95	996

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 95. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 0.25 m en el túnel 2

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.6	C1196
58	MI	997.45	997	997.3
	EJE	997.35	997.3	997.15
	MD	997.55	998	997.75
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	997.95	997.75	998
	3	997.2	997.15	997.2
	3'	996.9	997.05	997.1
	4	1000.45	1000.45	1000.45
68	MI	998.9	997.3	997.3
	EJE	996.1	995.7	995.8
	MD	996.55	996.2	996.1

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 96. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 0.25 m en el túnel 3

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	997.5	997.5	997.7
	EJE	997.55	997.5	997.5
	MD	998.05	998.05	997.95
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	998.05	998.4	998.3
	3	997.5	997.7	997.65
	3'	997.45	997.4	997.35
	4	1000.45	1000.45	1000.45
68	MI	998.9	997.95	998.75
	EJE	995.95	996.05	996.3
	MD	995.3	996.65	996.6

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 97. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 0.25 m en el túnel 1

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	0.95	0.75	1.1	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3	1.55	1.3	1.5	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3'	1.8	1.35	1.55	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
4	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 98. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 0.25 m en el túnel 1

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	68
1195.5	73
1196	78

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 99. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 0.25 m en el túnel 2

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.6	C1196		C1195	C1195.6	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	1.1	0.9	1.15	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3	1.55	1.5	1.55	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3'	1.55	1.7	1.75	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
4	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 100. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 0.25 m en el túnel 2

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	56
1195.6	60
1196	64

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 101.		Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 0.25 m en el túnel 3					
Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	1.2	1.55	1.45	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3	1.85	2.05	2	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3'	2.1	2.05	2	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
4	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 102.		Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 0.25 m en el túnel 3	
Nivel del embalse (msnm)		Caudal aforado (m³/s)	
1195		80	
1195.5		85	
1196		90	

Fuente: IHHS (2014)

A5.1.2. Serie 2E, abertura de compuerta 0.50 m

Condiciones del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 0.50 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2-E, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos abiertas individualmente (una abierta y las otras 2 cerradas) a 0.50 m. Se ensayaron 3 caudales dentro de un rango de niveles generalmente comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

Resultados del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 0.50 m

Tabla 103.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 0.50 m en el túnel 1					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.4	C1196	C1195	C1195.4	C1196
1	A	1195.25	1195.25	1195.95	0.75	0.77	0.74
	C	1195.60	1195.30	1195.90	0.38	0.37	0.35
	E	1195.55	1195.25	1195.90	--	--	--
2	A	1195.00	1195.20	1195.85	--	--	--
	C	1195.50	1195.10	1195.70	--	--	--
	E	1195.60	1195.05	1195.75	--	--	--
3	A	1195.25	1195.40	1196.00	--	--	--
	C	1195.70	1195.40	1196.00	--	--	--
	E	1195.65	1195.40	1196.00	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 104. Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 0.50 m en el túnel 2

Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1196	C1195	C1195.5	C1196
1	A	1195.10	1195.25	1196.25	--	--	--
	C	1195.15	1195.90	1196.25	--	--	--
	E	1195.10	1195.40	1196.25	--	--	--
2	A	1195.05	1195.25	1196.15	0.75	0.76	0.77
	C	1194.95	1195.25	1196.15	--	--	--
	E	1194.90	1195.30	1196.20	--	--	--
3	A	1195.15	1195.40	1196.40	--	--	--
	C	1195.10	1195.50	1196.40	--	--	--
	E	1195.15	1195.50	1196.35	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 105. Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 0.50 m en el túnel 3

Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1196	C1195	C1195.5	C1196
1	A	1195.00	1195.60	1196.00	--	--	--
	C	1195.05	1195.55	1196.00	--	--	--
	E	1195.00	1195.65	1196.10	--	--	--
2	A	1194.95	1195.65	1196.10	--	--	--
	C	1195.00	1195.60	1196.15	--	--	--
	E	1195.05	1195.60	1196.25	--	--	--
3	A	1195.00	1195.75	1196.25	0.74	0.78	0.74
	C	1195.00	1195.65	1196.15	--	--	--
	E	1195.05	1195.60	1196.25	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 106. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 0.50 m en el túnel 1

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.4	C1196
58	MI	997.5	997.6	997.65
	EJE	997.85	997.7	997.25
	MD	997.85	998	998
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	998.3	998.35	998.25
	3	997.65	997.5	997.5
	3'	997.55	997.45	997.3
	4	1000.65	1000.45	1000.45
68	MI	997.3	997.45	997.3
	EJE	996.25	996.15	995.95
	MD	996.6	996.6	996.4

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 107. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 0.50 m en el túnel 2

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	997.75	997.925	999.675
	EJE	997.65	997.8	999
	MD	998.1	997.5	999.5
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	998.25	998.6	998.85
	3	997.55	997.9	997.65
	3'	997.55	997.85	997.6
	4	1000.45	1000.45	1000.45
68	MI	997.3	997.3	997.3
	EJE	996	995.9	995.8
	MD	996.5	996.55	996.5

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 108.		Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 0.50 m en el túnel 3		
Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	997.5	997.65	997
	EJE	998.15	997.8	998.15
	MD	999	998.1	999.15
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	998.75	998.75	998.6
	3	998.15	998	998
	3'	997.95	997.85	997.85
	4	1002.2	1000.45	1000.85
68	MI	998.55	999	998.55
	EJE	996.25	996.35	996.05
	MD	995.8	996.8	995.45

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 109.		Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 0.50 m en el túnel 1					
Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.4	C1196		C1195	C1195.4	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	1.45	1.5	1.4	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3	2	1.85	1.85	0.2H	1.14	1.61	1.40
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3'	2.2	2.1	1.95	0.2H	1.32	1.37	1.36
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
4	0.2	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 110. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 0.50 m en el túnel 1

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	145
1195.4	147
1196	150

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 111. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 0.50 m en el túnel 2

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	1.4	1.75	2	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3	1.9	2.25	2	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3'	2.2	2.5	2.25	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
4	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 112. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 0.50 m en el túnel 2

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	126
1195.5	132
1196	138

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 113. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 0.50 m en el túnel 3

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	1.9	1.9	1.75	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3	2.5	2.35	2.35	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3'	2.6	2.5	2.5	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
4	1.75	--	0.425	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 114. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 0.50 m en el túnel 3

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	156
1195.5	162
1196	167

Fuente: IHHS (2014)

A5.1.3. Serie 2E, abertura de compuerta 1 m

Condiciones del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 1 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2-E, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos abiertas individualmente (una abierta y las otras 2 cerradas) a 1 m. Se ensayaron 3 caudales dentro de un rango de niveles generalmente comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

Resultados del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 1 m

Tabla 115.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 1 m en el túnel 1					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.6	C1196	C1195	C1195.6	C1196
1	A	1194.75	1195.50	1196.40	1.26	1.19	1.22
	C	1194.75	1195.75	1196.50	0.46	0.46	0.43
	E	1194.80	1195.80	1196.45	--	--	--
2	A	1194.50	1195.60	1196.35	--	--	--
	C	1194.75	1195.55	1196.45	--	--	--
	E	1194.65	1195.70	1196.30	--	--	--
3	A	1195.00	1196.00	1196.60	--	--	--
	C	1195.00	1195.85	1196.50	--	--	--
	E	1195.00	1195.95	1196.55	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 116. Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 1 m en el túnel 2

Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.3	C1196	C1195	C1195.3	C1196
1	A	1194.80	1194.75	1195.95	--	--	--
	C	1194.80	1194.75	1195.95	--	--	--
	E	1194.85	1194.80	1196.05	--	--	--
2	A	1194.75	1194.60	1195.80	1.31	1.31	1.29
	C	1194.80	1194.65	1195.85	0.38	0.38	1.32
	E	1194.85	1194.50	1195.90	--	--	--
3	A	1194.95	1194.75	1196.00	--	--	--
	C	1194.95	1194.70	1195.95	--	--	--
	E	1194.90	1194.70	1196.00	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 117. Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 1 m en el túnel 3

Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1196	C1195	C1195.5	C1196
1	A	1195.00	1195.40	1195.90	--	--	--
	C	1195.05	1195.45	1195.90	--	--	--
	E	1195.10	1195.40	1195.95	--	--	--
2	A	1194.95	1195.25	1195.85	--	--	--
	C	1195.00	1195.35	1195.85	--	--	--
	E	1194.50	1195.40	1195.90	--	--	--
3	A	1194.90	1195.45	1196.05	1.14	1.18	1.11
	C	1194.90	1195.40	1196.05	--	--	--
	E	1195.00	1195.45	1196.00	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 118. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 1 m en el túnel 1

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.6	C1196
58	MI	998.7	998.65	998.2
	EJE	998.25	998.55	997.85
	MD	998.5	998.35	998.25
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	998.75	998.6	998.55
	3	998.1	998.05	998.15
	3'	997.95	997.9	997.75
	4	1000.45	1000.45	1000.45
68	MI	997.7	997.85	997.5
	EJE	996.35	996.55	996.3
	MD	997.2	997.05	996.95

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 119. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 1 m en el túnel 2

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.3	C1196
58	MI	998.5	999.25	998.75
	EJE	998.65	998.9	998.65
	MD	998.65	999.2	999.2
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	999.1	999.4	999.75
	3	998.65	999	998.9
	3'	998.45	998.85	998.6
	4	1000.45	1000.45	1000.45
68	MI	998.4	998.05	998.3
	EJE	997.7	997.75	997.65
	MD	998.2	998.35	998.15

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 120.		Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 1 m en el túnel 3		
Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	998.4	998.75	999.15
	EJE	998.45	999.5	999.75
	MD	999.2	1000.65	1000.45
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	999.2	999.75	999.6
	3	998.75	998.95	999.05
	3'	998.5	998.75	998.9
	4	1000.45	1000.45	1001.8
68	MI	999.05	1000	999.55
	EJE	997.7	997.8	997.15
	MD	998.15	996.45	997.05

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 121.		Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 1 m en el túnel 1					
Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.6	C1196		C1195	C1195.6	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	1.9	1.75	1.7	0.2H	1.13	1.23	0.99
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3	2.45	2.4	2.5	0.2H	2.09	2.17	2.17
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3'	2.6	2.55	2.4	0.2H	1.75	2.09	1.93
				0.6H	1.85	--	--
				0.8H	--	--	--
4	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 122. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 1 m en el túnel 1

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	274
1195.6	277
1196	280

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 123. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 1 m en el túnel 2

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.3	C1196		C1195	C1195.3	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	2.25	2.55	2.9	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3	3	3.35	3.25	0.2H	--	--	0.87
				0.6H	--	1.15	--
				0.8H	--	--	--
3'	3.1	3.5	3.25	0.2H	0.57	--	0.61
				0.6H	--	0.69	--
				0.8H	--	--	--
4	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 124. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 1 m en el túnel 2

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	257
1195.3	273
1196	300

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 125. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 1 m en el túnel 3

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	2.35	2.9	2.75	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3	3.1	3.3	3.4	0.2H	1.36	0.74	1.05
				0.6H	2.09	0.00	1.26
				0.8H	--	--	--
3'	3.15	3.4	3.55	0.2H	--	1.24	1.13
				0.6H	1.49	1.03	0.77
				0.8H	--	--	--
4	--	--	1.35	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 126. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 1 m en el túnel 2

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	286
1195.5	290
1196	295

Fuente: IHHS (2014)

A5.1.4. Serie 2E, abertura de compuerta 2 m

Condiciones del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 2 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2-E, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos abiertas individualmente (una abierta y las otras 2 cerradas) a 2 m. Se ensayaron 3 caudales dentro de un rango de niveles generalmente comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

Resultados del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 2 m

Tabla 127.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 2 m en el túnel 1					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.4	C1196	C1195	C1195.4	C1196
1	A	1194.80	1195.25	1196.10	2.21	2.23	2.33
	C	1194.85	1195.35	1196.00	0.73	0.70	0.72
	E	1194.80	1195.25	1196.50	--	--	--
2	A	1194.70	1195.25	1196.00	--	--	--
	C	1194.60	1195.25	1196.40	--	--	--
	E	1194.65	1195.30	1196.00	--	--	--
3	A	1194.90	1195.00	1196.35	--	--	--
	C	1194.90	1195.30	1196.75	--	--	--
	E	1194.90	1195.40	1196.75	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 128. Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 2 m en el túnel 2

Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1196	C1195	C1195.5	C1196
1	A	1194.55	1195.30	1196.45	--	--	--
	C	1194.50	1195.35	1196.45	--	--	--
	E	1194.50	1195.25	1196.50	0.24	0.28	0.25
2	A	1194.50	1195.20	1196.35	2.22	2.20	2.22
	C	1194.65	1195.30	1196.50	0.45	0.41	0.40
	E	1194.50	1195.25	1196.40	--	--	--
3	A	1194.75	1195.50	1196.65	--	--	--
	C	1194.75	1195.50	1196.65	--	--	--
	E	1194.80	1195.45	1196.65	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 129. Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 2 m en el túnel 3

Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1196	C1195	C1195.5	C1196
1	A	1195.55	1195.55	1195.90	--	--	--
	C	1195.55	1195.55	1195.90	--	--	--
	E	1195.60	1195.60	1195.95	--	--	--
2	A	1195.45	1195.45	1195.90	--	--	--
	C	1195.50	1195.50	1195.85	--	--	--
	E	1195.50	1195.50	1195.50	--	--	--
3	A	1195.55	1195.55	1196.00	2.26	2.26	2.09
	C	1195.55	1195.55	1196.00	0.38	0.37	0.38
	E	1195.55	1195.55	1196.05	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 130. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 2 m en el túnel 1

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.4	C1196
58	MI	999.25	999.8	999.95
	EJE	998.9	999.55	999.5
	MD	999.25	1000.3	1000.1
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1000	1000.2	1000.05
	3	999.4	999.5	999.25
	3'	999.1	999.3	999.3
	4	1000.45	1000.65	1000.6
68	MI	1000.5	999.75	999
	EJE	998	998.25	998.35
	MD	997.6	998.8	998.85

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 131. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 2 m en el túnel 2

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	1011	1009.75	1009.55
	EJE	1010.8	1010.15	1009.7
	MD	1011	1010.5	1010.9
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1001	1000.35	1000.35
	3	1000.3	999.9	999.85
	3'	999.95	999.6	999.7
	4	1002.7	1002.7	1002.3
68	MI	1007.25	1004.3	1006.35
	EJE	1007.85	1005.65	1005.9
	MD	1009.05	1006.8	1006.65

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 132. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 2 m en el túnel 3

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	1011	1009.75	1009.55
	EJE	1010.8	1010.15	1009.7
	MD	1011	1010.5	1010.9
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1000.7	1000.7	1000.6
	3	999.85	999.9	999.8
	3'	999.8	999.55	999.6
	4	1002.3	1002.45	1002.95
68	MI	999.4	1004.3	1006.35
	EJE	998.7	1005.65	1005.9
	MD	999.45	1006.8	1006.65

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 133. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 2 m en el túnel 1

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.4	C1196		C1195	C1195.4	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	3.15	3.35	3.2	0.2H	1.40	1.60	1.52
				0.6H	1.83	1.66	1.32
				0.8H	--	--	--
3	3.75	3.85	3.6	0.2H	1.93	2.17	2.44
				0.6H	2.17	1.83	2.13
				0.8H	--	--	--
3'	3.75	3.95	3.95	0.2H	2.11	2.40	2.69
				0.6H	2.28	2.13	2.28
				0.8H	--	--	--
4	--	0.2	0.15	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 134. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 2 m en el túnel 1

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	478
1195.4	482
1196	488

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 135. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 2 m en el túnel 2

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	4.15	3.5	3.5	0.2H	--	0.51	--
				0.6H	1.51	1.36	--
				0.8H	--	--	--
3	4.65	4.25	4.2	0.2H	1.12	2.34	1.32
				0.6H	1.29	2.04	1.70
				0.8H	--	--	--
3'	4.6	4.25	4.35	0.2H	1.32	1.67	2.11
				0.6H	1.42	2.24	1.83
				0.8H	--	--	--
4	2.25	2.25	1.85	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 136. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 2 m en el túnel 2

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	469
1195.5	483
1196	496

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 137. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 2 m en el túnel 3

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	3.85	3.85	3.75	0.2H	0.88	1.53	1.53
				0.6H	2.10	2.55	2.14
				0.8H	--	--	--
3	4.2	4.25	4.15	0.2H	1.83	0.52	1.83
				0.6H	1.53	1.87	1.61
				0.8H	--	--	--
3'	4.45	4.2	4.25	0.2H	0.80	--	1.25
				0.6H	1.25	1.33	1.12
				0.8H	--	--	--
4	1.85	2	2.5	0.2H	0.64	--	0.48
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 138. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 2 m en el túnel 3

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	480
1195.5	486
1196	490

Fuente: IHHS (2014)

A5.1.5. Serie 2E, abertura de compuerta 4 m

Condiciones del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 4 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2-E, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos abiertas individualmente (una abierta y las otras 2 cerradas) a 4 m. Se ensayaron 3 caudales dentro de un rango de niveles generalmente comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

Resultados del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 4 m

Tabla 139.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 4 m en el túnel 1					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1196	C1195	C1195.5	C1196
1	A	1195.00	1195.40	1196.15	4.13	3.91	4.16
	C	1195.40	1196.00	1196.20	1.30	1.05	1.27
	E	1195.40	1195.25	1196.15	--	--	--
2	A	1194.70	1194.50	1196.05	--	--	--
	C	1195.20	1195.50	1196.20	--	--	--
	E	1195.20	1195.25	1196.10	--	--	--
3	A	1194.50	1195.10	1196.35	--	--	--
	C	1195.40	1195.50	1196.30	--	--	--
	E	1195.50	1195.60	1196.35	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 140.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 4 m en el túnel 2					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1196	C1195	C1195.5	C1196
1	A	1193.50	1195.50	1196.60	--	--	--
	C	1194.50	1196.00	1197.10	--	--	--
	E	1194.50	1196.00	1197.05	--	--	--
2	A	1194.25	1195.40	1196.35	4.23	4.19	4.10
	C	1194.25	1195.75	1196.90	0.70	0.63	0.60
	E	1194.25	1195.95	1196.90	--	--	--
3	A	1194.50	1195.70	1196.75	--	--	--
	C	1193.50	1196.00	1197.05	--	--	--
	E	1194.50	1196.05	1197.05	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 141.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 4 m en el túnel 3					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.8	C1196	C1195	C1195.8	C1196
1	A	1194.90	1196.00	1196.05	--	--	--
	C	1194.75	1195.95	1196.10	--	--	--
	E	1194.80	1195.95	1196.00	--	--	--
2	A	1194.85	1195.85	1195.90	--	--	--
	C	1194.75	1195.90	1195.95	--	--	--
	E	1194.90	1195.85	1196.00	--	--	--
3	A	1194.95	1196.05	1196.20	3.96	3.71	3.56
	C	1194.95	1196.05	1196.15	0.42	0.43	0.42
	E	1194.95	1196.00	1196.15	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 142. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 4 m en el túnel 1

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	1001.65	1001.5	1000.75
	EJE	1001.4	1000.9	1000.65
	MD	1001.75	1001.25	1000.25
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1001.95	1001.6	1001.85
	3	1001.15	1000.9	1001.15
	3'	1000.75	1000.85	1000.6
	4	1003.95	1000.45	1001.45
68	MI	1000.3	999.05	1001.95
	EJE	999.35	999.15	999.15
	MD	999.8	999.65	998.8

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 143. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 4 m en el túnel 2

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	1001.5	1001	1000.75
	EJE	1001.4	1001.25	1000.9
	MD	1002.15	1001.75	1001.75
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1001.85	1001.95	1001.85
	3	1000.95	1001.05	1001.15
	3'	1000.85	1001	1000.95
	4	1002.2	1000.45	1000.45
68	MI	1001.2	999.55	1000.05
	EJE	999.4	998.55	999.4
	MD	1000.05	999.2	999.9

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 144. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 4 m en el túnel 3

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.8	C1196
58	MI	1001.85	1002.25	1001.25
	EJE	1001.45	1001.65	1001.15
	MD	1001.65	1001.25	1001.5
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1002.35	1002.1	1002.5
	3	1001.55	1001.4	1001.65
	3'	1001.35	1001.35	1001.5
	4	1002.7	1001.45	1001.95
68	MI	1001.2	999.55	999.95
	EJE	999.4	998.55	999.15
	MD	1000.05	999.2	1000.05

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 145. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 4 m en el túnel 1

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	5.1	4.75	5	0.2H	1.92	1.70	1.79
				0.6H	2.07	2.23	2.15
				0.8H	--	--	--
3	5.5	5.25	5.5	0.2H	1.96	1.74	2.09
				0.6H	1.74	1.96	2.11
				0.8H	--	--	--
3'	5.4	5.5	5.25	0.2H	2.27	2.82	2.64
				0.6H	2.02	2.59	2.36
				0.8H	--	--	--
4	3.5	--	1	0.2H	1.79	--	--
				0.6H	1.62	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 146. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 4 m en el túnel 1

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	800
1195.5	815
1196	830

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 147. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 4 m en el túnel 2

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	5	5.1	5	0.2H	2.03	1.58	1.54
				0.6H	1.70	1.91	1.99
				0.8H	--	--	--
3	5.3	5.4	5.5	0.2H	2.11	2.24	2.32
				0.6H	1.91	2.40	2.19
				0.8H	--	--	--
3'	5.5	5.65	5.6	0.2H	2.40	2.60	2.44
				0.6H	2.52	2.56	2.36
				0.8H	--	--	--
4	1.75	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 148. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 4 m en el túnel 2

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	850
1195.5	865
1196	880

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 149. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 4 m en el túnel 3

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.8	C1196		C1195	C1195.8	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	5.5	5.25	5.65	0.2H	1.58	1.71	--
				0.6H	1.28	2.32	2.32
				0.8H	--	--	1.95
3	5.9	5.75	6	0.2H	2.52	1.74	1.21
				0.6H	2.32	2.52	2.44
				0.8H	2.15	1.99	2.28
3'	6	6	6.15	0.2H	1.83	1.66	1.83
				0.6H	1.58	2.19	2.07
				0.8H	1.47	1.99	1.79
4	2.25	1	1.5	0.2H	1.02	--	1.47
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 150. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 4 m en el túnel 3

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	830
1195.8	842
1196	845

Fuente: IHHS (2014)

A5.1.6. Serie 2E, abertura de compuerta 6 m

Condiciones del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 6 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2-E, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos abiertas individualmente (una abierta y las otras 2 cerradas) a 6 m. Se ensayaron 3 caudales dentro de un rango de niveles generalmente comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

Resultados del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 6 m

Tabla 151.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 6 m en el túnel 1					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.7	C1196	C1195	C1195.7	C1196
1	A	1194.95	1195.55	1195.95	4.84	5.54	5.34
	C	1194.95	1195.55	1195.90	1.57	1.53	1.57
	E	1195.05	1195.60	1195.90	0.39	0.35	0.39
2	A	1195.00	1195.55	1195.85	--	--	--
	C	1194.95	1195.50	1195.85	0.39	0.42	0.39
	E	1194.95	1195.55	1195.90	--	--	--
3	A	1195.15	1195.80	1196.15	--	--	--
	C	1195.10	1195.80	1196.15	--	--	--
	E	1195.10	1195.70	1196.05	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 152. Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 6 m en el túnel 2

Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1196	C1195	C1195.5	C1196
1	A	1195.00	1195.30	1196.50	--	--	--
	C	1194.90	1195.35	1196.25	--	--	--
	E	1194.75	1195.40	1195.90	0.31	0.33	0.41
2	A	1194.50	1195.15	1195.75	5.07	5.16	4.81
	C	1194.50	1195.15	1195.90	0.70	0.70	0.65
	E	1194.50	1195.15	1195.75	--	--	--
3	A	1194.90	1195.45	1196.20	--	--	--
	C	1194.75	1195.50	1195.95	--	--	--
	E	1194.60	1195.40	1196.00	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 153. Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 6 m en el túnel 3

Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1196	C1195	C1195.5	C1196
1	A	1194.80	1195.50	1196.10	--	--	--
	C	1194.80	1195.50	1196.10	--	--	--
	E	1194.75	1195.45	1196.15	--	--	--
2	A	1194.55	1195.30	1196.45	--	--	--
	C	1194.55	1195.35	1196.10	--	--	--
	E	1194.50	1195.35	1196.05	0.33	0.39	0.37
3	A	1194.75	1195.60	1196.25	5.31	4.69	4.77
	C	1194.80	1195.50	1196.30	0.62	0.58	0.65
	E	1194.80	1195.55	1196.25	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 154. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 6 m en el túnel 1

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.7	C1196
58	MI	1002.75	1002.2	1002.75
	EJE	1002.15	1002.3	1002.15
	MD	1002.8	1003	1003.15
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1002.95	1003.1	1003.35
	3	1002.3	1002.45	1002.55
	3'	1002.1	1002.35	1002.35
	4	1005.2	1004.8	1004.45
68	MI	1000.55	1000.5	1000.55
	EJE	1000.3	1000.3	1000.3
	MD	1000.7	1000.65	1000.95

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 155. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 6 m en el túnel 2

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	1002.35	1003	1002.3
	EJE	1002.3	1002.65	1002.2
	MD	1003	1003.25	1003.15
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1002.7	1003.9	1003.1
	3	1002.65	1002.9	1002.5
	3'	1002.4	1002.35	1002.05
	4	1006	1003.95	1005.45
68	MI	1001.55	1001.05	1001.65
	EJE	1000.4	1000.55	1000.5
	MD	1000.9	1001.8	1000.75

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 156. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 6 m en el túnel 3

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	1002.05	1002.15	1002.4
	EJE	1002.35	1002.3	1002.55
	MD	1003.3	1003.3	1002.6
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1003.25	1003	1003.35
	3	1002.7	1002.65	1002.5
	3'	1002.1	1002.2	1002.35
	4	1004.7	1005	1004.7
68	MI	1000.05	1000.85	1000.3
	EJE	1000.4	1000.4	1000.45
	MD	1000.9	1001.05	1001.05

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 157. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 6 m en el túnel 1

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.7	C1196		C1195	C1195.7	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	6.1	6.25	6.5	0.2H	2.42	2.16	1.47
				0.6H	2.31	2.66	2.52
				0.8H	--	--	--
3	6.65	6.8	6.9	0.2H	1.94	2.34	1.99
				0.6H	1.57	2.06	1.83
				0.8H	1.64	1.70	--
3'	6.75	7	7	0.2H	2.31	2.06	2.73
				0.6H	2.09	2.20	2.60
				0.8H	1.98	1.57	2.19
4	4.75	4.35	4	0.2H	2.53	2.85	2.69
				0.6H	2.53	2.80	2.60
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 158. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 6 m en el túnel 1

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	1200
1195.7	1230
1196	1245

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 159. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 6 m en el túnel 2

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	5.85	7.05	6.25	0.2H	2.56	1.99	2.52
				0.6H	2.40	2.40	2.44
				0.8H	1.83	2.11	2.19
3	7	7.25	6.85	0.2H	2.07	1.95	2.32
				0.6H	2.03	1.99	2.07
				0.8H	1.83	1.79	1.95
3'	7.05	7	6.7	0.2H	2.44	2.56	2.44
				0.6H	2.40	2.40	2.44
				0.8H	1.74	2.07	2.15
4	5.55	3.5	5	0.2H	2.24	2.32	2.44
				0.6H	2.32	2.40	2.44
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 160. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 6 m en el túnel 2

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	1245
1195.5	1260
1196	1275

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 161. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 6 m en el túnel 3

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	6.4	6.15	6.5	0.2H	1.24	2.03	1.95
				0.6H	0.88	1.06	1.21
				0.8H	0.77	0.99	0.95
3	7.05	7	6.85	0.2H	3.42	3.42	3.18
				0.6H	3.30	3.42	2.93
				0.8H	2.44	2.69	2.19
3'	6.75	6.85	7	0.2H	4.12	3.67	3.50
				0.6H	4.20	3.71	3.30
				0.8H	3.09	2.77	2.56
4	4.25	4.55	4.25	0.2H	3.50	2.97	2.77
				0.6H	3.63	3.22	2.85
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 162. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 6 m en el túnel 3

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	1250
1195.5	1270
1196	1290

Fuente: IHHS (2014)

A5.1.7. Serie 2E, abertura de compuerta 8 m

Condiciones del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 8 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2-E, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos abiertas individualmente (una abierta y las otras 2 cerradas) a 8 m. Se ensayaron 3 caudales dentro de un rango de niveles generalmente comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

Resultados del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 8 m

Tabla 163.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 8 m en el túnel 1					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1196	C1195	C1195.5	C1196
1	A	1194.90	1195.40	1196.00	6.84	7.33	7.25
	C	1194.75	1195.30	1196.00	2.16	2.33	1.87
	E	1194.80	1195.45	1196.25	0.51	0.58	0.50
2	A	1194.75	1195.35	1196.25	--	--	--
	C	1194.70	1195.30	1196.25	0.63	0.68	0.58
	E	1194.65	1195.30	1196.40	--	--	--
3	A	1194.85	1195.55	1196.50	--	--	--
	C	1194.90	1195.55	1196.60	--	--	--
	E	1194.90	1195.60	1196.75	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 164.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 8 m en el túnel 2					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1196	C1195	C1195.5	C1196
1	A	1194.80	1195.45	1197.45	--	--	--
	C	1194.90	1195.45	1197.40	--	--	--
	E	1194.85	1195.40	1197.45	0.54	0.53	0.56
2	A	1194.65	1195.30	1197.40	7.33	7.14	7.45
	C	1194.80	1195.20	1197.30	0.96	1.03	0.99
	E	1194.70	1195.25	1197.40	--	--	--
3	A	1194.90	1195.20	1197.25	--	--	--
	C	1194.90	1195.55	1197.55	--	--	--
	E	1194.95	1195.55	1197.60	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 165.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 8 m en el túnel 3					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1196	C1195	C1195.5	C1196
1	A	1195.45	1195.40	1196.40	--	--	--
	C	1195.45	1195.40	1196.40	--	--	--
	E	1195.45	1195.35	1196.35	0.21	0.23	0.23
2	A	1195.40	1195.20	1196.25	--	--	--
	C	1195.20	1195.25	1196.30	0.31	0.30	0.27
	E	1195.15	1195.20	1196.25	0.35	0.37	0.35
3	A	1195.35	1195.45	1196.40	6.00	6.47	6.50
	C	1195.30	1195.35	1196.35	0.73	0.72	0.74
	E	1195.35	1195.35	1196.35	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 166. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 8 m en el túnel 1

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	1003.05	1003	1003.25
	EJE	1002.9	1002.9	1002.9
	MD	1003.25	1003.75	1003.5
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1003.8	1004	1003.35
	3	1003.05	1003.4	1002.9
	3'	1003.05	1003.25	1002.55
	4	1005.2	1002.85	1003.25
68	MI	1000.85	1001.95	999.55
	EJE	1000.35	1001.15	1000.8
	MD	1001	1001.65	1001.05

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 167. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 8 m en el túnel 2

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	1009.55	1009.75	1011
	EJE	1009.7	1010.15	1010.8
	MD	1010.9	1010.5	1011
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1004.2	1003.85	1004.4
	3	1003.5	1003.4	1003.9
	3'	1003.4	1003.6	1003.55
	4	1005.35	1006.45	1004.85
68	MI	1006.35	1004.3	1007.25
	EJE	1005.9	1005.65	1007.85
	MD	1006.65	1006.8	1009.05

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 168. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 8 m en el túnel 3

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	1009.55	1009.75	1011
	EJE	1009.7	1010.15	1010.8
	MD	1010.9	1010.5	1011
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1003.85	1004.35	1004.45
	3	1003.3	1003.4	1003.65
	3'	1003.1	1003.75	1003.65
	4	1003.7	1004.2	1004.7
68	MI	1006.35	1004.3	1007.25
	EJE	1005.9	1005.65	1007.85
	MD	1006.65	1006.8	1009.05

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 169. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 8 m en el túnel 1

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	6.95	7.15	6.5	0.2H	2.69	2.89	3.04
				0.6H	2.52	2.85	2.82
				0.8H	--	--	--
3	7.4	7.75	7.25	0.2H	2.60	2.36	2.55
				0.6H	2.19	2.19	2.28
				0.8H	--	1.91	2.05
3'	7.7	7.9	7.2	0.2H	3.30	3.18	3.63
				0.6H	3.22	3.14	3.54
				0.8H	2.97	3.01	3.09
4	4.75	2.4	2.8	0.2H	2.56	2.52	3.04
				0.6H	2.69	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 170. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 8 m en el túnel 1

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	1630
1195.5	1650
1196	1665

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 171. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 8 m en el túnel 2

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	7.35	7	7.55	0.2H	2.81	2.93	2.60
				0.6H	2.64	2.36	2.64
				0.8H	2.36	2.15	2.40
3	7.85	7.75	8.25	0.2H	2.07	2.15	2.40
				0.6H	1.83	2.03	2.15
				0.8H	1.91	1.99	1.95
3'	8.05	8.25	8.2	0.2H	2.77	2.73	2.77
				0.6H	2.69	2.60	2.93
				0.8H	2.69	2.48	2.69
4	4.9	6	4.4	0.2H	1.91	2.48	2.64
				0.6H	2.36	2.24	2.77
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 172. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 8 m en el túnel 2

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	1550
1195.5	1575
1196	1600

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 173. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 8 m en el túnel 3

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	7	7.5	7.6	0.2H	1.24	0.95	1.22
				0.6H	0.95	0.62	0.72
				0.8H	0.47	0.58	0.62
3	7.65	7.75	8	0.2H	3.99	3.87	3.45
				0.6H	4.08	3.91	3.56
				0.8H	3.22	3.67	3.19
3'	7.75	8.4	8.3	0.2H	5.38	5.10	4.66
				0.6H	5.38	5.51	4.81
				0.8H	4.65	4.98	4.52
4	3.25	3.75	4.25	0.2H	3.46	3.30	2.86
				0.6H	4.53	4.28	4.18
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 174. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 8 m en el túnel 3

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	1600
1195.5	1613
1196	1625

Fuente: IHHS (2014)

A5.1.8. Serie 2E, abertura de compuerta 9 m

Condiciones del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 9 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2-E, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos abiertas individualmente (una abierta y las otras 2 cerradas) a 9 m. Se ensayaron 3 caudales dentro de un rango de niveles generalmente comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

Resultados del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 9 m

Tabla 175.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 9 m en el túnel 1					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.6	C1196	C1195	C1195.6	C1196
1	A	1194.55	1195.50	1196.00	7.64	7.45	7.64
	C	1194.55	1195.50	1196.00	2.21	2.28	2.24
	E	1194.60	1195.55	1196.15	0.46	0.49	0.43
2	A	1194.55	1195.50	1196.05	--	--	--
	C	1194.50	1195.45	1196.05	0.56	0.54	0.55
	E	1194.50	1195.45	1196.15	--	--	--
3	A	1194.75	1195.75	1196.35	--	--	--
	C	1194.80	1195.75	1196.30	--	--	--
	E	1194.80	1195.80	1196.35	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 176.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 9 m en el túnel 2					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.6	C1196	C1195	C1195.6	C1196
1	A	1194.60	1195.45	1197.00	--	--	--
	C	1194.75	1195.50	1197.05	--	--	--
	E	1194.60	1195.40	1197.10	0.55	0.60	0.44
2	A	1194.60	1195.40	1196.95	8.35	7.68	8.55
	C	1194.50	1195.30	1196.95	0.99	1.13	1.02
	E	1194.55	1195.35	1197.05	--	--	--
3	A	1194.35	1195.60	1197.40	--	--	--
	C	1194.75	1195.50	1197.35	--	--	--
	E	1194.80	1195.55	1197.30	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 177.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 9 m en el túnel 3					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1196	C1195	C1195.5	C1196
1	A	1194.95	1195.25	1196.35	--	--	--
	C	1195.00	1195.30	1196.35	--	--	--
	E	1195.05	1195.35	1196.40	0.24	0.28	0.26
2	A	1194.85	1195.20	1196.25	--	--	--
	C	1194.85	1195.20	1196.30	0.35	0.34	0.34
	E	1194.85	1195.25	1196.25	0.37	0.42	0.42
3	A	1195.15	1195.50	1196.50	6.84	6.59	6.81
	C	1195.10	1195.40	1196.50	0.76	0.80	0.74
	E	1195.15	1195.45	1196.50	0.34	0.38	0.34

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 178. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 9 m en el túnel 1

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.6	C1196
58	MI	1004.5	1003.95	1004.5
	EJE	1003.9	1003.8	1003.9
	MD	1004.9	1004.5	1005
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1005.6	1004.65	1005.1
	3	1004.65	1003.9	1004.15
	3'	1004.5	1004	1004.05
	4	1004.45	1005.75	1003.05
68	MI	1002.8	1002.85	1002.8
	EJE	1001.9	1001.85	1001.9
	MD	1003.05	1002.5	1002.8

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 179. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 9 m en el túnel 2

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.6	C1196
58	MI	1009.55	1009.75	1011
	EJE	1009.7	1010.15	1010.8
	MD	1010.9	1010.5	1011
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1005.1	1005.1	1004.75
	3	1004.15	1004.15	1003.9
	3'	1003.85	1004.35	1003.5
	4	1003.45	1004.95	1005.85
68	MI	1006.35	1004.3	1007.25
	EJE	1005.9	1005.65	1007.85
	MD	1006.65	1006.8	1009.05

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 180. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 9 m en el túnel 3

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	1009.55	1009.75	1011
	EJE	1009.7	1010.15	1010.8
	MD	1010.9	1010.5	1011
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1004.35	1004.1	1004.15
	3	1003.4	1003.45	1003.4
	3'	1003.35	1003.65	1003.75
	4	1006.95	1006.3	1006.1
68	MI	1006.35	1004.3	1007.25
	EJE	1005.9	1005.65	1007.85
	MD	1006.65	1006.8	1009.05

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 181. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 9 m en el túnel 1

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.6	C1196		C1195	C1195.6	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	8.75	7.8	8.25	0.2H	1.65	2.68	2.32
				0.6H	2.91	3.31	2.82
				0.8H	2.55	2.68	2.82
3	9	8.25	8.5	0.2H	2.14	2.37	2.50
				0.6H	2.46	2.01	2.23
				0.8H	2.19	1.74	1.74
3'	9.15	8.65	8.7	0.2H	2.95	3.09	3.22
				0.6H	2.95	2.95	3.27
				0.8H	2.77	2.46	2.95
4	4	5.3	2.6	0.2H	2.55	3.09	2.77
				0.6H	2.55	2.95	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 182. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 9 m en el túnel 1

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	1795
1195.6	1815
1196	1840

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 183. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 9 m en el túnel 2

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.6	C1196		C1195	C1195.6	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	8.25	8.25	7.9	0.2H	2.14	1.53	3.22
				0.6H	3.27	2.98	2.81
				0.8H	3.08	3.08	2.69
3	8.5	8.5	8.25	0.2H	1.90	2.34	2.32
				0.6H	2.34	2.44	2.32
				0.8H	2.24	2.44	1.95
3'	8.5	9	8.15	0.2H	2.73	2.93	2.85
				0.6H	3.37	3.22	2.77
				0.8H	3.17	3.03	2.64
4	3	4.5	5.4	0.2H	2.39	2.49	2.89
				0.6H	0.00	2.78	2.93
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 184. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 9 m en el túnel 2

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	1760
1195.6	1780
1196	1800

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 185. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 9 m en el túnel 3

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	7.5	7.25	7.3	0.2H	1.24	1.39	1.13
				0.6H	0.91	1.02	0.77
				0.8H	0.91	0.91	0.69
3	7.75	7.8	7.75	0.2H	3.63	3.79	3.91
				0.6H	3.71	3.79	3.91
				0.8H	3.50	3.42	3.54
3'	8	8.3	8.4	0.2H	5.59	5.55	5.88
				0.6H	5.63	5.79	5.83
				0.8H	4.77	4.98	4.85
4	6.5	5.85	5.65	0.2H	3.79	4.36	4.40
				0.6H	4.32	4.40	4.89
				0.8H	4.53	4.32	4.61

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 186. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 9 m en el túnel 3

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	1800
1195.5	1817
1196	1835

Fuente: IHHS (2014)

A5.1.9. Serie 2E, abertura de compuerta 10 m

Condiciones del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 10 m

Este ensayo correspondiente a la serie 2-E, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos abiertas individualmente (una abierta y las otras 2 cerradas) a 10 m. Se ensayaron 3 caudales dentro de un rango de niveles generalmente comprendidos entre el NAMO (1196 m.s.n.m.) y NAMI (1195 m.s.n.m.).

Resultados del ensayo, Serie 2E, abertura de compuerta 10 m

Tabla 187.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 10 m en el túnel 1					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1196	C1195	C1195.5	C1196
1	A	1194.65	1195.40	1196.05	7.78	8.11	8.49
	C	1194.60	1196.00	1195.85	2.60	2.67	1.94
	E	1194.65	1195.25	1196.00	0.61	0.57	0.57
2	A	1194.45	1194.50	1195.75	--	--	--
	C	1194.50	1195.50	1195.90	0.61	0.59	0.57
	E	1194.40	1195.25	1195.80	--	--	--
3	A	1194.75	1195.10	1196.25	--	--	--
	C	1194.65	1195.50	1196.20	--	--	--
	E	1194.75	1195.60	1196.25	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 188. Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 10 m en el túnel 2

Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.6	C1196	C1195	C1195.6	C1196
1	A	1194.20	1195.65	1196.35	--	--	--
	C	1194.20	1195.70	1196.30	--	--	--
	E	1194.15	1195.75	1196.35	0.57	0.58	0.52
2	A	1194.00	1195.70	1196.25	8.98	8.89	9.15
	C	1194.10	1195.50	1196.25	1.11	1.11	1.11
	E	1194.10	1195.60	1196.10	--	--	--
3	A	1194.40	1195.75	1196.40	--	--	--
	C	1194.20	1195.70	1196.40	--	--	--
	E	1194.35	1195.80	1196.50	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 189. Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura 10 m en el túnel 3

Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		C1195	C1195.5	C1196	C1195	C1195.5	C1196
1	A	1194.60	1195.30	1195.95	--	--	--
	C	1194.65	1195.35	1195.95	--	--	--
	E	1194.60	1195.35	1195.95	0.28	0.30	0.35
2	A	1194.40	1195.25	1195.75	--	--	--
	C	1194.45	1195.25	1195.80	0.37	0.49	0.48
	E	1194.40	1195.35	1195.75	0.43	0.44	0.46
3	A	1194.70	1195.55	1196.00	7.26	7.56	7.51
	C	1194.60	1195.55	1196.00	0.87	0.86	0.80
	E	1194.60	1195.60	1196.00	0.42	0.34	0.34

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 190. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 10 m en el túnel 1

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	1005	1005.25	1004.75
	EJE	1004.65	1004	1004.65
	MD	1004.75	1004.25	1005
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1005.55	1005.35	1005.5
	3	1004.8	1004.5	1004.65
	3'	1004.6	1004.55	1004.6
	4	1005.95	1005.45	1005.2
68	MI	1005.55	1002.55	1003.05
	EJE	1002.3	1002.05	1002.15
	MD	1002.8	1002.65	1003.3

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 191. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 10 m en el túnel 2

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.6	C1196
58	MI	1009.55	1011	1009.75
	EJE	1009.7	1010.8	1010.15
	MD	1010.9	1011	1010.5
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1004.6	1004.9	1004.6
	3	1004.4	1004.05	1004
	3'	1004.35	1003.85	1004.1
	4	1005.95	1005.2	1005.45
68	MI	1006.35	1007.25	1004.3
	EJE	1005.9	1007.85	1005.65
	MD	1006.65	1009.05	1006.8

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 192. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura 10 m en el túnel 3

Sección	Posición	Niveles (m)		
		C1195	C1195.5	C1196
58	MI	1009.55	1011	1009.75
	EJE	1009.7	1010.8	1010.15
	MD	1010.9	1011	1010.5
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1004.6	1004.6	1005
	3	1004.05	1004.2	1004.15
	3'	1003.75	1004.05	1003.95
	4	1006.55	1006.45	1006.55
68	MI	1006.35	1007.25	1004.3
	EJE	1005.9	1007.85	1005.65
	MD	1006.65	1009.05	1006.8

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 193. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 10 m en el túnel 1

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	8.7	8.5	8.65	0.2H	3.01	2.44	3.52
				0.6H	3.01	2.73	3.48
				0.8H	2.85	2.69	2.20
3	9.15	8.85	9	0.2H	2.11	2.44	3.01
				0.6H	2.15	2.15	2.75
				0.8H	1.95	2.07	2.42
3'	9.25	9.2	9.25	0.2H	2.81	2.64	2.64
				0.6H	2.89	2.93	2.53
				0.8H	2.81	2.60	3.08
4	5.5	5	4.75	0.2H	2.44	2.32	2.31
				0.6H	2.85	2.36	2.42
				0.8H	2.69	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 194. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 10 m en el túnel 1

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	1975
1195.5	1990
1196	2005

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 195. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 10 m en el túnel 2

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.6	C1196		C1195	C1195.6	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	7.75	8.05	7.75	0.2H	2.91	2.63	3.42
				0.6H	3.49	3.42	3.09
				0.8H	2.95	3.47	2.89
3	8.75	8.4	8.35	0.2H	1.87	2.19	2.36
				0.6H	2.01	2.00	1.99
				0.8H	1.87	2.00	1.99
3'	9	8.5	8.75	0.2H	2.55	3.22	2.85
				0.6H	2.95	3.17	2.73
				0.8H	2.77	3.03	2.81
4	5.5	4.75	5	0.2H	2.05	2.58	2.93
				0.6H	2.14	2.49	2.69
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 196. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 10 m en el túnel 2

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	1900
1195.6	1916
1196	1930

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 197. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura 10 m en el túnel 3

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	C1195	C1195.5	C1196		C1195	C1195.5	C1196
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	7.75	7.75	8.15	0.2H	1.17	1.11	0.91
				0.6H	0.84	0.87	0.91
				0.8H	0.58	0.76	0.88
3	8.4	8.55	8.5	0.2H	3.63	3.72	3.67
				0.6H	3.42	3.60	3.67
				0.8H	3.05	3.48	2.93
3'	8.4	8.7	8.6	0.2H	5.38	5.15	5.38
				0.6H	5.18	5.23	5.38
				0.8H	4.69	4.65	4.28
4	6.1	6	6.1	0.2H	4.89	4.38	4.77
				0.6H	4.65	4.88	5.02
				0.8H	4.89	4.65	4.77

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 198. Aforos en la sección 63 – Serie 2C – abertura 10 m en el túnel 3

Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m ³ /s)
1195	1955
1195.5	1973
1196	1990

Fuente: IHHS (2014)

A5.2. Aberturas totales

A5.2.1. Serie 2E, abertura aislada total de compuerta, $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$

Condiciones del ensayo, Serie 2E, abertura total, $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$

Este ensayo correspondiente a la serie 2-E, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas individualmente (una abierta y las otras 2 cerradas). El nivel en el embalse se estableció haciendo pasar un caudal de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ por cada túnel según el ensayo que corresponda.

Resultados del ensayo, Serie 2E, abertura total, $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$

Tabla 199.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura total – $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
1	A	1162.75	1163.25	1162.95	--	--	--
	C	1163.00	1163.20	1162.90	--	--	--
	E	1163.00	1163.15	1162.75	--	--	--
2	A	1163.10	1162.85	1162.70	--	--	--
	C	1163.00	1163.10	1162.65	--	--	--
	E	1163.05	1163.10	1162.65	--	--	--
3	A	1163.25	1163.35	1162.65	--	--	--
	C	1163.15	1163.30	1162.90	--	--	--
	E	1163.15	1163.35	1163.05	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 200.		Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura total – $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$		
Sección	Posición	Niveles (m)		
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
58	MI	998	997.6	997.75
	EJE	997.4	997.35	997.4
	MD	997.6	997.85	998.15
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	997.95	997.75	997.9
	3	997.2	996.9	997.35
	3'	997	996.8	997.2
	4	1000.45	1000.45	1000.45
68	MI	997.3	997.3	997.3
	EJE	995.7	995.65	995.65
	MD	996.3	996.15	996.05

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 201.		Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura total – $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$					
Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	1.1	0.9	1.2	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3	1.55	1.25	1.85	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3'	1.65	1.45	2.1	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
4	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 202. Aforos en la sección 63 – Serie 2E – abertura total – $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$

Túnel	Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m^3/s)
1	1163.2	40
2	1163.3	40
3	1163	40

Fuente: IHHS (2014)

A5.2.2. Serie 2E, abertura aislada total de compuerta, $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$

Condiciones del ensayo, Serie 2E, abertura total, $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$

Este ensayo correspondiente a la serie 2-E, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas individualmente (una abierta y las otras 2 cerradas). El nivel en el embalse se estableció haciendo pasar un caudal de $120 \text{ m}^3/\text{s}$ por cada túnel según el ensayo que corresponda.

Resultados del ensayo, Serie 2E, abertura total, $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$

Tabla 203.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura total – $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
1	A	1163.50	1164.50	1164.25	2.67	--	--
	C	1164.00	1164.50	1164.25	1.47	--	--
	E	1164.10	1164.50	1164.40	0.48	0.43	0.37
2	A	1164.10	1163.90	1164.15	--	2.45	--
	C	1164.05	1164.15	1164.40	0.63	0.71	--
	E	1164.10	1164.15	1164.25	--	0.27	--
3	A	1164.30	1164.50	1164.10	--	--	2.02
	C	1164.25	1164.50	1164.40	--	--	0.52
	E	1164.30	1164.50	1164.40	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 204. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura total – $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$

Sección	Posición	Niveles (m)		
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
58	MI	997.5	997.85	997.65
	EJE	997.65	997.9	997.9
	MD	998	998.05	998.45
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	998.45	998.2	998.45
	3	997.6	997.55	997.95
	3'	997.35	997.4	997.65
	4	1001.7	1002.45	1000.45
68	MI	997.3	997.3	997.85
	EJE	995.9	996	995.9
	MD	996.3	996.6	996.65

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 205. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura total – $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	1.6	1.35	1.6	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3	1.95	1.9	2.3	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
3'	2	2.05	2.3	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
4	1.25	2	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 206. Aforos en la sección 63 – Serie 2E – abertura total – $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$

Túnel	Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m^3/s)
1	1164.3	120
2	1164.5	120
3	1164.5	120

Fuente: IHHS (2014)

A5.2.3. Serie 2E, abertura aislada total de compuerta, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Condiciones del ensayo, Serie 2E, abertura total, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Este ensayo correspondiente a la serie 2-E, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas individualmente (una abierta y las otras 2 cerradas). El nivel en el embalse se estableció haciendo pasar un caudal de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ por cada túnel según el ensayo que corresponda.

Resultados del ensayo, Serie 2E, abertura total, $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Tabla 207.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura total – $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
1	A	1165.50	1166.65	1166.65	3.78	--	--
	C	1166.25	1166.65	1166.70	1.85	--	--
	E	1166.50	1166.65	1166.65	0.57	0.54	0.40
2	A	1166.40	1165.75	1166.40	--	3.58	--
	C	1166.40	1166.55	1166.45	0.75	0.93	0.33
	E	1166.45	1166.60	1166.45	--	0.32	0.52
3	A	1166.60	1166.90	1165.75	--	--	2.96
	C	1166.60	1166.90	1166.60	--	--	0.70
	E	1166.60	1166.90	1166.65	--	--	--

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 208.		Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura total – $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$		
Sección	Posición	Niveles (m)		
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
58	MI	999.5	998.5	999.15
	EJE	999.9	999.5	999.15
	MD	1000.85	1000.5	999.9
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	999.6	999.35	999.7
	3	998.9	998.55	999
	3'	998.7	998.35	998.8
	4	1002.8	1002.95	1003.55
68	MI	998.95	998.95	999.15
	EJE	997.1	996.9	998.15
	MD	997.15	997.3	998.65

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 209.		Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura total – $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$					
Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	2.75	2.5	2.85	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	1.43	--	--
3	3.25	2.9	3.35	0.2H	--	0.95	--
				0.6H	--	--	1.02
				0.8H	0.99	--	--
3'	3.35	3	3.45	0.2H	0.88	1.47	--
				0.6H	0.73	--	1.13
				0.8H	--	--	--
4	2.35	2.5	3.1	0.2H	0.95	1.06	0.76
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 210. Aforos en la sección 63 – Serie 2E – abertura total – $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Túnel	Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m^3/s)
1	1166.6	300
2	1166.9	300
3	1166.6	300

Fuente: IHHS (2014)

A5.2.4. Serie 2E, abertura aislada total de compuerta, Q = 641 m³/s**Condiciones del ensayo, Serie 2E, abertura total, Q = 641 m³/s**

Este ensayo correspondiente a la serie 2-E, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas individualmente (una abierta y las otras 2 cerradas). El nivel en el embalse se estableció haciendo pasar un caudal de 641 m³/s por cada túnel según el ensayo que corresponda.

Resultados del ensayo, Serie 2E, abertura total, Q = 641 m³/s

Tabla 211.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura total – Q = 641 m ³ /s					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
1	A	1170.50	1172.25	1172.20	5.59	--	--
	C	1171.50	1172.40	1172.25	2.95	--	--
	E	1172.10	1172.30	1172.25	0.70	0.64	0.58
2	A	1172.10	1170.75	1172.25	--	5.28	--
	C	1172.05	1172.10	1172.25	1.05	1.23	0.55
	E	1172.10	1172.30	1172.20	0.33	0.33	0.61
3	A	1172.40	1172.60	1171.25	--	--	4.30
	C	1172.35	1172.55	1172.35	0.33	0.38	1.01
	E	1172.40	1172.60	1172.45	--	--	0.40

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 212. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura total – $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$

Sección	Posición	Niveles (m)		
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
58	MI	999.75	999.75	1000.8
	EJE	1000.65	1000.3	1000.65
	MD	1001.5	1001.15	1001.35
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1001.35	1001.35	1001.2
	3	1000.55	1000.6	1000.75
	3'	1000.35	1000.3	1000.6
	4	1002.45	1001.95	1001.65
68	MI	1000.05	998.45	999.55
	EJE	998.7	998.85	998.75
	MD	999.4	999.45	999.55

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 213. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura total – $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	4.5	4.5	4.35	0.2H	0.77	0.64	0.91
				0.6H	1.47	2.01	1.54
				0.8H	--	--	--
3	4.9	4.95	5.1	0.2H	2.24	2.01	2.24
				0.6H	1.95	1.87	2.15
				0.8H	--	--	--
3'	5	4.95	5.25	0.2H	2.69	2.68	2.69
				0.6H	2.44	2.32	2.44
				0.8H	--	--	--
4	2	1.5	1.2	0.2H	1.43	1.61	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 214. Aforos en la sección 63 – Serie 2E – abertura total – $Q = 641 \text{ m}^3/\text{s}$

Túnel	Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m^3/s)
1	1172.6	641
2	1172.4	641
3	1172.5	641

Fuente: IHHS (2014)

A5.2.5. Serie 2E, abertura aislada total de compuerta, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$

Condiciones del ensayo, Serie 2E, abertura total, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$

Este ensayo correspondiente a la serie 2-E, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas individualmente (una abierta y las otras 2 cerradas). El nivel en el embalse se estableció haciendo pasar un caudal de $1276 \text{ m}^3/\text{s}$ por cada túnel según el ensayo que corresponda.

Resultados del ensayo, Serie 2E, abertura total, $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$

Tabla 215.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura total – $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
1	A	1176.25	1177.00	1177.60	6.66	--	--
	C	1177.25	1177.05	1177.75	3.94	0.23	--
	E	1177.40	1177.05	1177.60	1.01	0.75	0.54
2	A	1177.40	1175.25	1177.60	--	6.41	--
	C	1177.30	1176.75	1177.55	1.17	1.42	0.23
	E	1177.40	1177.05	1177.55	0.42	0.40	0.76
3	A	1177.60	1177.30	1177.25	--	--	6.07
	C	1177.55	1177.25	1177.65	0.37	0.49	1.21
	E	1177.65	1177.35	1177.70	0.27	0.34	0.43

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 216.		Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura total – $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$		
Sección	Posición	Niveles (m)		
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
58	MI	1002.55	1001.8	1002
	EJE	1002.55	1002.45	1002.05
	MD	1002.35	1003.1	1003
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1003.15	1003.25	1003.05
	3	1002.4	1002.5	1002
	3'	1002.4	1002.55	1002.3
	4	1003.95	1004.3	1003.95
68	MI	1002.2	1001.65	1000.3
	EJE	1000.4	1000.5	1000.3
	MD	1000.7	1001.1	1000.8

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 217.		Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura total – $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$					
Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	6.3	6.4	6.2	0.2H	2.64	2.40	2.40
				0.6H	1.83	1.91	1.79
				0.8H	--	--	--
3	6.75	6.85	6.35	0.2H	2.64	2.93	2.44
				0.6H	2.32	2.81	2.28
				0.8H	--	--	--
3'	7.05	7.2	6.95	0.2H	2.97	2.97	3.46
				0.6H	2.93	2.19	3.01
				0.8H	2.69	2.28	2.97
4	3.5	3.85	3.5	0.2H	2.69	2.60	2.24
				0.6H	2.85	2.56	2.64
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 218. Aforos en la sección 63 – Serie 2E – abertura total – $Q = 1276 \text{ m}^3/\text{s}$

Túnel	Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m^3/s)
1	1177.5	1276
2	1177.5	1276
3	1178	1276

Fuente: IHHS (2014)

A5.2.6. Serie 2E, abertura aislada total de compuerta, Q = 1595 m³/s**Condiciones del ensayo, Serie 2E, abertura total, Q = 1595 m³/s**

Este ensayo correspondiente a la serie 2-E, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas individualmente (una abierta y las otras 2 cerradas). El nivel en el embalse se estableció haciendo pasar un caudal de 1595 m³/s por cada túnel según el ensayo que corresponda.

Resultados del ensayo, Serie 2E, abertura total, Q = 1595 m³/s

Tabla 219.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura total – Q = 1595 m ³ /s					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
1	A	1178.00	1180.10	1180.25	7.63	--	--
	C	1178.25	1180.35	1180.40	4.24	--	--
	E	1178.95	1180.40	1180.35	1.08	0.68	0.55
2	A	1178.90	1180.00	1180.25	--	7.32	--
	C	1178.85	1180.00	1180.30	1.18	1.42	0.45
	E	1178.90	1180.35	1180.25	0.51	0.40	0.79
3	A	1179.15	1180.50	1180.45	--	--	6.20
	C	1179.15	1180.45	1180.25	0.39	0.42	1.14
	E	1179.15	1180.50	1180.55	0.35	0.29	0.52

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 220. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura total – $Q = 1595 \text{ m}^3/\text{s}$

Sección	Posición	Niveles (m)		
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
58	MI	1003.7	1003.15	1003.25
	EJE	1003.45	1003.4	1003.25
	MD	1004.25	1004	1003.9
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1004.05	1004.25	1003.95
	3	1003.7	1003.5	1003.3
	3'	1003.35	1003.6	1003.3
	4	1004.8	1004.6	1006.25
68	MI	1001.55	1001.7	1001.55
	EJE	1001.25	1001.4	1001.25
	MD	1001.8	1002.15	1002.05

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 221. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura total – $Q = 1595 \text{ m}^3/\text{s}$

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	7.2	7.4	7.1	0.2H	2.24	1.83	2.56
				0.6H	1.83	1.46	1.46
				0.8H	1.47	1.43	1.28
3	8.05	7.85	7.65	0.2H	2.64	2.69	2.81
				0.6H	2.52	2.56	2.44
				0.8H	2.40	2.19	2.15
3'	8	8.25	7.95	0.2H	3.30	3.30	4.12
				0.6H	3.22	3.30	4.20
				0.8H	2.81	3.42	3.54
4	4.35	4.15	5.8	0.2H	2.89	3.14	3.42
				0.6H	3.63	3.38	3.67
				0.8H	--	--	--

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 222. Aforos en la sección 63 – Serie 2E – abertura total – $Q = 1595 \text{ m}^3/\text{s}$

Túnel	Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m^3/s)
1	1179.5	1595
2	1180.5	1595
3	1181	1595

Fuente: IHHS (2014)

A5.2.7. Serie 2E, abertura aislada total de compuerta, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

Condiciones del ensayo, Serie 2E, abertura total, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

Este ensayo correspondiente a la serie 2-E, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas individualmente (una abierta y las otras 2 cerradas). El nivel en el embalse se estableció haciendo pasar un caudal de $1832 \text{ m}^3/\text{s}$ por cada túnel según el ensayo que corresponda.

Resultados del ensayo, Serie 2E, abertura total, $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

Tabla 223.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura total – $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
1	A	1183.25	1185.00	1188.50	7.97	--	--
	C	1183.30	1185.10	1188.20	3.74	--	--
	E	1183.65	1185.10	1188.15	0.90	0.71	0.41
2	A	1183.65	1184.90	1188.00	--	8.11	--
	C	1183.60	1184.75	1188.00	0.96	1.51	0.50
	E	1183.65	1184.80	1188.15	0.39	0.39	0.68
3	A	1183.90	1185.10	1188.50	--	--	6.84
	C	1183.85	1185.00	1188.60	0.35	0.43	1.04
	E	1183.95	1185.10	1188.50	0.35	0.34	0.52

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 224.		Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura total – Q = 1832 m ³ /s		
Sección	Posición	Niveles (m)		
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
58	MI	1004	1004.25	1003.7
	EJE	1003.9	1004.15	1004.15
	MD	1004.75	1004.75	1004.2
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1004.5	1004.6	1004.55
	3	1004.15	1004.25	1004.05
	3'	1003.85	1004.1	1003.9
	4	1005.35	1005.25	1007.25
68	MI	1001.8	1002.55	1002.05
	EJE	1001.8	1001.9	1001.9
	MD	1002.3	1002.8	1002.5

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 225.		Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura total – Q = 1832 m ³ /s					
Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	7.65	7.75	7.7	0.2H	3.30	1.95	0.82
				0.6H	2.89	1.91	0.82
				0.8H	2.60	1.51	0.85
3	8.5	8.6	8.4	0.2H	2.36	3.18	3.19
				0.6H	2.19	3.05	2.71
				0.8H	2.07	2.44	2.67
3'	8.5	8.75	8.55	0.2H	2.60	3.54	4.81
				0.6H	2.24	3.50	4.85
				0.8H	1.99	3.34	4.37
4	4.9	4.8	6.8	0.2H	2.89	3.22	4.88
				0.6H	2.56	3.54	4.74
				0.8H	--	--	4.37

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 226. Aforos en la sección 63 – Serie 2E – abertura total – $Q = 1832 \text{ m}^3/\text{s}$

Túnel	Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m^3/s)
1	1184	1832
2	1185	1832
3	1186	1832

Fuente: IHHS (2014)

A5.2.8. Serie 2E, abertura aislada total de compuerta, Q = 2068 m³/s**Condiciones del ensayo, Serie 2E, abertura total, Q = 2068 m³/s**

Este ensayo correspondiente a la serie 2-E, se realizó con la toma cerrada y las compuertas de los vertederos completamente abiertas individualmente (una abierta y las otras 2 cerradas). El nivel en el embalse se estableció haciendo pasar un caudal de 2068 m³/s por cada túnel según el ensayo que corresponda.

Resultados del ensayo, Serie 2E, abertura total, Q = 2068 m³/s

Tabla 227.		Niveles y velocidades aguas arriba – Serie 2E – abertura total – Q = 2068 m ³ /s					
Túnel	Sección	Niveles (m)			Velocidades (m/s)		
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
1	A	1189.75	1189.75	1193.20	9.21	--	--
	C	1189.85	1189.75	1193.20	3.27	--	--
	E	1190.15	1189.70	1193.15	0.74	0.69	0.38
2	A	1190.05	1189.70	1193.05	--	8.26	--
	C	1190.05	1189.60	1193.10	0.79	1.27	0.42
	E	1190.00	1189.60	1193.10	0.39	0.35	0.65
3	A	1190.30	1190.00	1193.50	--	--	7.66
	C	1190.25	1189.85	1193.40	0.26	0.33	1.02
	E	1190.25	1190.00	1193.45	0.26	0.33	0.49

Velocidades medidas en la cota 1167 m.s.n.m.

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 228. Niveles aguas abajo – Serie 2E – abertura total – $Q = 2068 \text{ m}^3/\text{s}$

Sección	Posición	Niveles (m)		
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
58	MI	1002.25	1004.25	1004.7
	EJE	1004.1	1003.95	1004.2
	MD	1005.25	1004.5	1004.5
63	1	1006.9	1006.9	1006.9
	2	1005.4	1005.05	1004.95
	3	1004.8	1004.7	1004.7
	3'	1004.4	1004.6	1004.2
	4	1005.95	1007.6	1007.45
68	MI	1004.45	1002.8	1002.8
	EJE	1002.55	1001.9	1002.4
	MD	1003.05	1002.55	1002.3

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 229. Velocidades aguas abajo – Sección 63 – Serie 2E – abertura total – $Q = 2068 \text{ m}^3/\text{s}$

Posición	Niveles (m)			KH	Velocidades (m/s)		
	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3
1	--	--	--	0.2H	--	--	--
				0.6H	--	--	--
				0.8H	--	--	--
2	8.55	8.2	8.1	0.2H	3.42	3.05	1.18
				0.6H	3.09	2.69	1.18
				0.8H	2.97	2.81	1.02
3	9.15	9.05	9.05	0.2H	2.15	3.18	3.52
				0.6H	1.95	3.01	3.26
				0.8H	1.62	2.44	2.86
3'	9.05	9.25	8.85	0.2H	2.85	2.93	4.92
				0.6H	2.69	2.93	4.85
				0.8H	2.44	3.18	4.15
4	5.5	7.15	7	0.2H	2.73	2.73	4.07
				0.6H	2.85	2.56	4.63
				0.8H	--	2.44	4.37

Fuente: IHHS (2014)

Tabla 230. Aforos en la sección 63 – Serie 2E – abertura total – $Q = 2068 \text{ m}^3/\text{s}$

Túnel	Nivel del embalse (msnm)	Caudal aforado (m^3/s)
1	1190	2068
2	1190	2068
3	1193	2068

Fuente: IHHS (2014)