

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DEL TÚNEL DE DESVÍO Y  
EL TÚNEL DE DESCARGA INTERMEDIA DE LA CENTRAL  
HIDROELÉCTRICA SOPLADORA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**JENNY MARITZA CARRERA CASA**

**jen.carrera@gmail.com**

**VICTORIA ELIZABETH LARA BARBA**

**vicky22\_elizabeth@hotmail.com**

**DIRECTORA: ING. XIMENA HIDALGO B. M. Sc.**

**ximena.hidalgob@gmail.com**

**Quito, Septiembre 2010.**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Jenny Maritza Carrera Casa y Victoria Elizabeth Lara Barba, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**Jenny Carrera C.**

---

**Victoria Lara B.**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jenny Maritza Carrera Casa y Victoria Elizabeth Lara Barba, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Ximena Hidalgo.**

**DIRECTORA DE PROYECTO**

## AGRADECIMIENTO

A Dios por estar presente en cada paso que doy y colmarme de bendiciones, por la fortaleza para no decaer.

A mi familia, mis padres Mario e Hilda, gratitud eterna por su apoyo incondicional en todo momento, por la confianza depositada, gracias por los consejos que han permitido ser una guía en mi vida y por los valores que han sembrado en mí para ser una persona de bien. Por darnos siempre lo mejor.

A mi hermano David por ver en mí un ejemplo.

A Santy L., gracias por tu apoyo total y sincero, por estar a mi lado para salir juntos adelante, has llenado mi vida de amor, eres la fuerza que me motiva cada día.

A Vicky amiga y compañera, gracias por ser parte de este proyecto que nos ha permitido compartir conocimientos y vivir experiencias. Hemos formado un gran equipo de trabajo y una gran amistad.

A Ing. Ximena Hidalgo, Dr. Marco Castro e Ing. Marcelo Hidalgo quienes han dirigido este proyecto compartiendo sus conocimientos, gracias por la confianza y el apoyo mostrado en este tiempo.

A mis amigos de facultad, gracias por su amistad desinteresada, por tantos momentos agradables y sus palabras de cariño, apoyo y ánimo.

Y a todos quienes de una u otra forma han contribuido a que este proyecto de titulación sea posible.

Jenny Carrera Casa.



## AGRADECIMIENTO

“Palabras colocadas con dulzura y dirigidas con modestia.”

Shakespeare.

Muchas han sido las personas que desinteresadamente han colaborado en la culminación de mi formación profesional.

A mis padres y hermanos por brindarme su cariño, comprensión, por su apoyo incondicional y por creer en mí.

A los profesores que formaron parte del desarrollo de la presente investigación, Dr. Ing. Marco Castro e Ing. Ximena Hidalgo.

Y a mi compañera y amiga por recordarme siempre que la perseverancia es el camino hacia el éxito.

Sus esfuerzos no serán inútiles, serán multiplicados y llevados en alto en el buen obrar de mi vida profesional.

Vicky.

## DEDICATORIA

Esta meta es un peldaño más en mi vida, ha sido un largo proceso de preparación que con constancia y esfuerzo está cumplida. A Dios por ser mi guía. Con todo amor y cariño para las personas más importantes: para mis padres, hermano y Santy quienes han confiado en mí.

Jenny Carrera Casa.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo que fue realizado con mucho esfuerzo, constancia y responsabilidad está dedicado con amor para toda mi familia.

Vicky.

## CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
AGRADECIMIENTO .....	V
DEDICATORIA .....	VI
DEDICATORIA .....	VII
CONTENIDO.....	VIII
SIMBOLOGÍA .....	XVIII
RESUMEN .....	XX
ABSTRACT.....	XXI
PRESENTACIÓN.....	XXII
CAPÍTULO 1 .....	1
ANTECEDENTES .....	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO SOPLADORA.....	1
1.2 DESCRIPCIÓN PARTICULAR DEL TÚNEL DE DESVÍO Y DEL TÚNEL DE DESCARGA INTERMEDIA CON SUS DIFERENTES COMPONENTES. OPERACIÓN EN PROTOTIPO.....	2
1.2.1 TÚNEL DE DESVÍO.....	2
1.2.1.1 Objetivos Técnicos del Túnel de Desvío.....	2
1.2.1.2 Elementos del Túnel de Desvío.....	3
1.2.1.3 Estructura de derivación o de entrada.....	3
1.2.1.4 Conducción principal del Túnel de Desvío.....	3
1.2.1.5 Estructura de Unión .....	4
1.2.1.6 Disipador de energía .....	4
1.3 SÍNTESIS DE LOS REQUERIMIENTOS PARA LA SIMULACIÓN EN MODELO FÍSICO DEL FENÓMENO DE FLUJO A TRAVÉS DE LAS OBRAS....	4

1.4 OBJETIVOS, ALCANCE Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.....	5
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
1.4.3 ALCANCE.....	6
1.4.4 JUSTIFICACIÓN.....	7
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>8</b>
<b>GENERALIDADES SOBRE LA MODELACIÓN FÍSICA.....</b>	<b>8</b>
2.1 INTRODUCCIÓN.....	8
2.2 OBJETIVOS DE LA MODELACIÓN FÍSICA.....	8
2.3 SEMEJANZA HIDRÁULICA.....	9
2.4 BASES Y RESTRICCIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO Y PRUEBAS CON UN MODELO DE FONDO FIJO, BAJO EL CRITERIO DE SIMILITUD DE FROUDE Y SEMEJANZA DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL MOVIMIENTO.....	10
2.4.1 SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA.....	10
2.4.1.1 Flujo en curva en el túnel.....	19
2.4.1.2 Fenómeno de cavitación.....	21
2.4.1.3 Aireación en el túnel.....	23
2.5 RELACIÓN DE ESCALAS ENTRE LAS MAGNITUDES HIDRODINÁMICAS DE UN MODELO CON SIMILITUD DE FROUDE Y SU PROTOTIPO.....	26
2.6 CONSIDERACIONES SOBRE LA TRANSPOSICIÓN DE LAS MAGNITUDES FÍSICAS OBTENIDAS EN MODELO.- NIVELES O PROFUNDIDADES DE AGUA, VELOCIDADES, PRESIONES Y PATRONES DE FLUJO.....	27
2.6.1 VELOCIDAD.....	27
2.6.2 VISCOSIDAD.....	27
2.6.3 TENSIÓN SUPERFICIAL.....	27
2.6.4 PRESIÓN.....	27
2.7 CONCLUSIONES.....	28
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>29</b>
<b>DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.....</b>	<b>29</b>

3.1 SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA ESCALA DE LONGITUDES. ESCALAS DERIVADAS .....	29
3.2 IMPLANTACIÓN DEL MODELO: ESTRUCTURAS PRINCIPALES Y COMPLEMENTARIAS .....	30
3.2.1 GENERALIDADES SOBRE LA INFRAESTRUCTURA .....	30
3.2.2 DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO.....	30
3.2.2.1 Tanques de Entrada .....	30
3.2.2.2 Tanques para representación del tramo del río Paute.....	33
3.2.2.3 Modelos del Túnel de Desvío y de la Descarga Intermedia.....	34
3.3 INSTRUMENTACIÓN BÁSICA Y EQUIPAMIENTO .....	39
3.3.1 ELEMENTOS PARA TOMA O DERIVACIÓN DEL AGUA DESDE EL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN .....	39
3.3.2 VERTEDEROS DE MEDIDA .....	40
3.3.3 LIMNÍMETROS.....	44
3.4 CURVAS DE DESCARGA PARA VERTEDEROS DE MEDIDA .....	46
3.4.1 VERTEDERO RECTANGULAR EN EL TANQUE DE ENTRADA AL MODELO GENERAL.....	46
3.4.2 VERTEDERO TRIANGULAR EN EL TANQUE ANTES DE LA DESCARGA INTERMEDIA.....	47
3.4.3 VERTEDERO TRIANGULAR EN EL TANQUE DE SALIDA DEL MODELO GENERAL.....	47
3.5 PLAN PRELIMINAR DE PRUEBAS Y DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN EN LAS DIFERENTES FASES DE OPERACIÓN DEL MODELO. ....	48
3.5.1 PLAN PRELIMINAR DE PRUEBAS.....	48
3.6 CONCLUSIONES.....	49
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>50</b>
<b>CALIBRACIÓN DEL MODELO. ....</b>	<b>50</b>
<b>BASES PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO. ....</b>	<b>50</b>
4.1 OBJETIVOS DE LA FASE DE CALIBRACIÓN .....	50
4.2 PLAN DE PRUEBAS DE CALIBRACIÓN .....	50

4.3 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES EN LAS PRUEBAS DE CALIBRACIÓN DEL MODELO FÍSICO POR COMPONENTES.....	51
4.3.1 CURVAS DE DESCARGA DEL VERTEDERO DE PERFIL CREAGER EN EL INGRESO A LA DESCARGA INTERMEDIA .....	58
4.3.2 CURVA DE DESCARGA EN LA BOCATOMA DE INGRESO AL TÚNEL DE DESVÍO .....	66
4.3.3 ANÁLISIS DEL FLUJO EN EL TÚNEL DE DESVÍO Y EN LA DESCARGA INTERMEDIA.....	68
4.4 CONCLUSIONES.....	79
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>81</b>
<b>ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL .....</b>	<b>81</b>
5.1 OBJETIVOS DE LAS PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL.....	81
5.2 PLAN DEFINITIVO DE PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL FASES 1 Y 2.....	81
5.3 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EN LAS PRUEBAS DEL MODELO FÍSICO.- FASE I Y II DE LA INVESTIGACIÓN.....	83
5.3.1 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EN LAS PRUEBAS DEL MODELO FÍSICO.- FASE I DE LA INVESTIGACIÓN.....	83
5.3.1.1 Curva de Descarga en la Bocatoma de ingreso al Túnel de Desvío. ....	83
5.3.1.2 Análisis del flujo en el Túnel de Desvío. Fase I .....	89
5.3.1.2.1 Profundidades a lo largo del Túnel de Desvío Fase I.....	89
5.3.1.2.2 Análisis de la Estabilidad del Flujo en el Túnel de Desvío Fase I .....	100
5.3.1.2.3 Análisis del Flujo en las curvaturas en planta dentro del trazado del Túnel de Desvío Fase I .....	102
5.3.1.2.4 Análisis del índice de cavitación Fase I.....	105
5.3.1.3 Análisis del flujo en el Túnel de la Descarga Intermedia Fase I ...	107
5.3.1.3.1 Profundidades a lo largo de la Descarga Intermedia Fase I..	107

5.3.1.3.2 <i>Análisis de la estabilidad del flujo en la Descarga Intermedia Fase I</i> .....	119
5.3.1.3.3 <i>Análisis del índice de cavitación Fase I</i> .....	120
5.3.1.4 <i>Análisis del flujo combinado en el Túnel de Desvío y Descarga Intermedia</i> .....	121
5.3.2 <i>DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES EN EL MODELO DEL TÚNEL DE DESVÍO EN LA FASE II</i> .....	127
5.3.2.1 <i>Modificaciones en la Estructura de Entrada</i> .....	127
5.3.2.2 <i>Modificaciones a lo largo del Túnel de Desvío</i> .....	133
5.3.3 <i>ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EN LAS PRUEBAS DEL MODELO FÍSICO.- FASE II DE LA INVESTIGACIÓN</i> .....	136
5.3.3.1 <i>Análisis de la operación de la estructura de entrada al Túnel de Desvío con las modificaciones geométricas ensayadas en la Fase II</i> .....	136
5.3.3.1.1 <i>Curva de Descarga en la Bocatoma de ingreso al Túnel de Desvío Fase II</i> .....	136
5.3.3.2 <i>Análisis del flujo a lo largo del Túnel de Desvío. Fase II</i> .....	145
5.4 <i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VARIANTES</i> .....	160
5.4.1 <i>CONCLUSIONES</i> .....	160
5.4.1.1 <i>Sobre la Fase I de la investigación</i> .....	160
5.4.1.2 <i>Sobre la Fase II de la investigación</i> .....	163
5.4.2 <i>RECOMENDACIONES</i> .....	164
5.4.2.1 <i>Sobre la Fase I de la investigación</i> .....	164
5.4.2.2 <i>Sobre la Fase II de la investigación</i> .....	166
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>167</b>
<b>ESTUDIO DE VARIANTES</b> .....	<b>167</b>
6.1 <i>DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES EN EL MODELO FÍSICO</i> ...	167
6.1.1 <i>DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES EN EL TÚNEL DE DESVÍO</i> .....	167
6.1.1.1 <i>Descripción de la geometría de la Estructura de Entrada al Túnel de Desvío planteada para la Fase III</i> .....	168



6.1.1.2	<i>Descripción de las modificaciones en el Túnel de Desvío definidas para la Fase III.</i>	170
6.1.2	<i>DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES DEL TÚNEL DE DESCARGA INTERMEDIA.</i>	176
6.1.2.1	Descripción de las modificaciones en la geometría del Vertedero tipo Creager definidas para la Fase III de la investigación.	177
6.1.2.2	Descripción de las modificaciones en el Túnel de Descarga Intermedia definidas para la Fase III de la investigación.	179
6.1.3	<i>ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA Y ENTREGA AL CAUCE DEL RIO PAUTE.</i>	183
6.2	PLAN DE PRUEBAS CON LAS VARIANTES SELECCIONADAS POR COMPONENTES.	184
6.3	ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACION DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL CON LAS VARIANTES EN EL MODELO.	185
6.3.1	<i>ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACION DE LOS RESULTADOS EN LA ESTRUCTURA DE ENTRADA AL TÚNEL DE DESVÍO.</i>	185
6.3.1.1	Curva de Descarga en la Bocatoma de ingreso al Túnel de Desvío con la geometría definida para la Fase III.	185
6.3.2	<i>ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACION DE LOS RESULTADOS EN EL TUNEL DE DESVIO.</i>	189
6.3.2.1	Análisis del flujo a lo largo del Túnel de Desvío con la geometría definida para la Fase III.	189
6.3.2.2	Análisis de la estabilidad del flujo en el Túnel de Desvío con la geometría definida para la Fase III.	201
6.3.2.3	Análisis del flujo en las curvaturas en planta dentro del trazado del Túnel de Desvío con la geometría definida para la Fase III.	204
6.3.2.4	Análisis del índice de cavitación en el Túnel de Desvío con la geometría definida para la Fase III.	206
6.3.3	<i>ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS EN EL VERTEDERO TIPO CREAGER EN LA ENTRADA AL TÚNEL DE DESCARGA INTERMEDIA.</i>	208

6.3.3.1 Curva de Descarga para el vertedero tipo Creager.....	208
6.3.4 <i>ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS EN EL TÚNEL DE DESCARGA INTERMEDIA.</i> .....	212
6.3.4.1 Análisis de las profundidades a lo largo del Túnel de Descarga Intermedia.....	212
6.3.4.2 Análisis de la estabilidad del flujo en el Túnel de Descarga Intermedia.....	223
6.3.4.3 Análisis del flujo en las curvaturas en planta dentro del trazado del Túnel de Descarga Intermedia. ....	225
6.3.4.4 Análisis del índice de cavitación en el Túnel de Descarga Intermedia.....	226
6.4 CONCLUSIONES.....	227
<b>CAPÍTULO 7 .....</b>	<b>229</b>
<b>SELECCIÓN Y ESTUDIO EXPERIMENTAL CON EL DISEÑO RECOMENDADO .....</b>	<b>229</b>
7.1 DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS MODIFICADAS PARA COMPROBACIÓN .....	229
7.1.1 <i>MODIFICACIONES GEOMÉTRICAS DEL ESTRIBO DERECHO.....</i>	229
7.1.1.1 Descripción de la geometría propuesta para la primera modificación del estribo derecho. ....	229
7.1.1.2 Análisis del funcionamiento de la Primera Modificación geométrica del estribo derecho .....	232
7.1.2 <i>DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA PROPUESTA PARA LA SEGUNDA MODIFICACIÓN DEL ESTRIBO DERECHO DE LA ESTRUCTURA DE ENTRADA.</i> .....	239
7.1.2.1 Análisis del funcionamiento de la segunda modificación geométrica del estribo derecho .....	241
7.2 DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA PROPUESTA .....	251
<b>CAPÍTULO 8 .....</b>	<b>253</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>253</b>

8.1 CONCLUSIONES SOBRE LA METODOLOGÍA DE LA MODELACIÓN FÍSICA.....	253
8.2 CONCLUSIONES SOBRE EL MODELO FÍSICO DEL TÚNEL DE DESVÍO Y DE LA DESCARGA INTERMEDIA.....	254
8.2.1 CONCLUSIONES SOBRE LA ESTRUCTURA DE ENTRADA.....	254
8.2.2 CONCLUSIONES SOBRE EL TÚNEL DE DESVÍO.....	255
8.2.3 CONCLUSIONES SOBRE EL VERTEDERO TIPO CREAGER.....	256
8.2.4 CONCLUSIONES SOBRE EL TÚNEL DE DESCARGA INTERMEDIA.....	256
8.3 CONCLUSIONES GENERALES DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.....	258
<b>REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>259</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>260</b>
<b>ANEXO 1.....</b>	<b>261</b>
<i>PLANOS</i> .....	261
MODELO Y PROTOTIPO.....	261
ANEXO 1A .....	262
<i>FASE I</i> .....	262
ANEXO 1B .....	273
<i>FASE II</i> .....	273
ANEXO 1C .....	277
<i>FASE III</i> .....	277
<b>ANEXO 2.....</b>	<b>285</b>
REGISTRO FOTOGRÁFICO .....	285
ANEXO 2A .....	286
<i>FASE I</i> .....	286
CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.....	287
FLUJO EN BOCATOMA.....	290
FLUJO A LO LARGO DEL TÚNEL DE DESVÍO.....	292
FLUJO EN DESCARGA INTERMEDIA .....	293
FLUJO COMBINADO: TÚNEL DE DESVÍO + DESCARGA INTERMEDIA .	295
ANEXO 2B .....	297

<i>FASE II</i> .....	297
<i>DISEÑO PROPUESTO EN EL INICIO DE FASE II</i> .....	298
<i>GEOMETRÍA MODIFICADA EN TÚNEL DE DESVÍO</i> .....	300
<i>GEOMETRÍA MODIFICADA PARA TRAMO INICIAL DEL TÚNEL DE DESVÍO</i> .....	301
<i>GEOMETRÍA MODIFICADA PARA LA ESTRUCTURA DE ENTRADA</i> .....	302
<i>INCLUSIÓN DE INGRESO DE AIRE AL TÚNEL DE DESVÍO</i> .....	303
<i>MODIFICACIÓN DEL ESTRIBO DERECHO EN ESTRUCTURA DE</i> <i>ENTRADA</i> .....	304
<i>FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE INGRESO CON LAS</i> <i>MODIFICACIONES EN EL DIAMETRO DE LA BOCA DE ENTRADA</i> .....	305
<i>FUNCIONAMIENTO DE ESTRUCTURA DE INGRESO CON LAS</i> <i>MODIFICACIONES EN EL ESTRIBO DERECHO</i> .....	306
<i>FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE ENTRADA CON</i> <i>DIFERENTES PROPUESTAS</i> .....	307
<i>FUNCIONAMIENTO DEL TRAMO INICIAL DEL TÚNEL SIN AIREACIÓN</i> .....	309
<b>ANEXO 2C</b> .....	313
<i>FASE III</i> .....	313
<i>RECONSTRUCCIÓN DEL MODELO CON MODIFICACIONES FASE III</i> ...	314
<i>FUNCIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS MODIFICADAS EN TÚNEL</i> <i>DE DESVÍO</i> .....	316
<i>FUNCIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS MODIFICADAS EN TÚNEL</i> <i>DESCARGA INTERMEDIA</i> .....	324
<i>FUNCIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS EN PRUEBAS</i> <i>DEMOSTRATIVAS</i> .....	330
<i>MODIFICACION DEL ESTRIBO DERECHO EN LA ESTRUCTURA DE</i> <i>ENTRADA</i> .....	333
<b>ANEXO 3</b> .....	<b>336</b>
REGISTRO DE DATOS TOMADOS.....	336
<b>ANEXO 3 A</b> .....	337
<i>FASE I</i> .....	337
<b>ANEXO 3 B</b> .....	357

<i>FASE II</i> .....	357
ANEXO 3 C .....	363
<i>FASE III</i> .....	363

## SIMBOLOGÍA

SIMBOLO	DESIGNACION	UNIDAD
B	Ancho del canal rectangular	[m]
b	Ancho de la superficie libre de agua en el túnel	[m]
$B_0$	Número de curva	[-]
C	Coefficiente de descarga	[-]
$C_m$	Concentración de aire	[-]
D	Diámetro	[m]
DI-1	Punto de medición en la Descarga Intermedia	[-]
Fr	Número de Froude	[-]
$Fr_c$	Número de Froude crítico	[-]
$Fr_m$	Número de Froude para Modelo	[-]
$Fr_p$	Número de Froude para Prototipo	[-]
g	Gravedad	[m/s <sup>2</sup> ]
H	Altura de agua	[m]
$h_0$	Carga sobre el vertedero tipo Creager	[m]
$h_{99}$	Altura con el 99% de aire	[m]
$h_p$	Altura de presión	[m]
$h_v/L$	Pendiente de la línea de energía	[-]
$h_w$	Altura de agua sin aire	[m]
$l_0$	Pendiente de fondo	[m/m]
L	Ancho de la cresta del vertedero tipo Creager	[m]
$L_m$	Longitud de Modelo	[m]
$L_p$	Longitud de Prototipo	[m]
$L_r$	Escala de longitudes	[-]
<b>n</b>	Coefficiente de rugosidad de Manning	[-]
$p_a/\gamma$	Altura de columna de agua correspondiente a la presión atmosférica	[m]
$p_v/\gamma$	Altura de columna de agua correspondiente a la presión de vapor	[m]
Q	Caudal	[m <sup>3</sup> /s]

$q$	Caudal unitario	$[(\text{m}^3/\text{s})/\text{m}]$
$Q_{DI}$	Caudal en Descarga Intermedia	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$Q_{TD}$	Caudal en Túnel de Desvío	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$Q_{TD} + Q_{DI}$	Caudal en Túnel de Desvío combinado con Caudal en Descarga Intermedia	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$R$	Radio hidráulico	$[\text{m}]$
$R_c$	Radio medio de curvatura	$[\text{m}]$
$Re_m$	Número de Reynolds para Modelo	$[-]$
$Re_p$	Número de Reynolds para Prototipo	$[-]$
$T$	Tolerancia	$[-]$
TD-1	Punto de medición en el Túnel de Desvío	$[-]$
$t_m$	Tiempo de Modelo	$[\text{s}]$
$t_p$	Tiempo de Prototipo	$[\text{s}]$
$t_R$	Escala de Tiempos	$[-]$
$V$	Velocidad	$[\text{m}/\text{s}]$
$Ve$	Número de Vedernikov	$[-]$
$V_m$	Velocidad de Modelo	$[\text{m}/\text{s}]$
$V_p$	Velocidad de Prototipo	$[\text{m}/\text{s}]$
$V_r$	Escala de velocidades	$[-]$
$y$	Profundidad de agua	$[\text{m}]$
$\lambda_m$	Factor de fricción en la relación de Darcy- Weisbach para Modelo	$[-]$
$\lambda_p$	Factor de fricción en la relación de Darcy- Weisbach para Prototipo	$[-]$
$\sigma$	Índice de cavitación	$[-]$
$\sigma_i$	Índice de cavitación crítico	$[-]$
$\Phi$	Angulo de la pendiente del fondo del canal	$[\text{rad}]$

## RESUMEN

El presente proyecto de titulación tiene por objetivo principal la evaluación del funcionamiento hidráulico de los Túneles de Desvío y de Descarga Intermedia de la Central Paute – Molino y la optimización de la geometría de las obras hidráulicas.

Para la investigación se construyó un modelo físico diseñado para reproducir los principales fenómenos hidráulicos, el caso de estudio trata el comportamiento de flujo supercrítico con altas velocidades y cambios de dirección asociado a la presencia de ondas

Entre los principales componentes de este modelo se incluye un Túnel de Desvío conformado por los siguientes elementos: estructura de entrada, conducción principal en túnel, estructura de unión y estructura de entrega. Además se tiene un Túnel de Descarga Intermedia constituido por un vertedero Creager y conducción en túnel.

El estudio experimental se desarrolló en tres fases: la Fase I dedicada a la investigación teórica del comportamiento de las obras hidráulicas, a la construcción del modelo, a la calibración y validación del mismo, al análisis del flujo en las obras con el diseño original. Para la Fase II se modificó la estructura de entrada y se eliminó la estructura de unión con el fin de evaluar el funcionamiento de hidráulico de esta nueva configuración. Finalmente, en la Fase III se reconstruyó el modelo cambiando completamente su geometría, tanto en planta como en perfil independizando los flujos de los túneles y a la vez se presentaron alternativas geométricas en la estructura de entrada.



## ABSTRACT

This proposed degree is primarily intended for hydraulic performance evaluation of the diversion tunnel and the Central Intermediate Download Paute - Molino and the optimization of the geometry of hydraulic works.

For research we built a physical model designed to reproduce the main hydraulic phenomena, the case study deals with the behavior of supercritical flow with high speed and direction changes associated with the presence of waves

The main components of this model include a Bypass Tunnel consists of the following elements: input structure, main pipe in tunnel junction structure and delivery structure. It also has an intermediate unloading tunnel consists of a Creager weir driving and tunnel.

The experimental study was conducted in three phases: Phase I dedicated to theoretical research on the behavior of hydraulic works, construction of the model, calibration and validation, the flow analysis in the works with the original design. For Phase II modified the structure of entry and removed the union structure in order to evaluate the hydraulic performance of this new configuration. Finally, in Phase III was rebuilt completely changing the model geometry, both in plan flows in more independent profile of the tunnels while geometric alternatives presented in the inlet structure.

## PRESENTACIÓN

La modelación física de obras a escala reducida, permite reproducir fenómenos que puedan presentarse en la naturaleza, con la finalidad de dar solución a problemas hidráulicos y optimizar las obras propuestas por el diseñador, para obtener como resultado un diseño definitivo.

El estudio en modelo físico analiza el funcionamiento de las obras de Desvío y de la Descarga Intermedia, permitiendo calificar el diseño original y demostrar la validez de la optimización durante el proceso de diseño definitivo y construcción del aprovechamiento hidroeléctrico Sopladora.

Se ha procurado escoger el modelo de mayor tamaño, seleccionando la escala de longitudes 1:50, tomando en cuenta las disponibilidades de espacio y de caudales. El modelo consiste en un Túnel de Desvío que inicia con una estructura de entrada, seguido de una conducción de sección circular, que por medio de una estructura tipo “Y” se une al túnel de Descarga Intermedia de sección rectangular, el mismo que inicia al pie de un vertedero tipo Creager, finalmente el flujo descarga al río Paute.

# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES

### 1.1 DESCRIPCIÓN DEL APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO SOPLADORA

El desarrollo del sistema hidroeléctrico Sopladora aprovechará un salto bruto de 385.52 m, en el río Paute, entre las elevaciones 1.314,07 y 928,55 msnm, aguas abajo de la central Molino. La futura central captará las aguas turbinadas que circulan por los túneles de descarga, antes de la restitución al río Paute. La central Molino tiene dos sistemas de conducción independientes (Fases AB y C), construidos entre 1975 y 1991, cada uno para un caudal de diseño de 100 m<sup>3</sup>/s. Según el diseño propuesto por el Consorcio Gerencia Mazar - CGM -, la captación para la central Sopladora se realizará mediante un sistema de túneles y una cámara de interconexión subterránea localizados en la margen izquierda del río Paute, según plano No 1-P, del anexo No. 1. La central subterránea de Sopladora sin embargo, se ubicará en la margen derecha del río Paute, entre las quebradas Sopladora y Palmira, previéndose cruzar el río Paute mediante un paso subfluvial. Los estudios de optimización de potencia de la central Sopladora definen la instalación de tres unidades generadoras tipo Francis, de 50 m<sup>3</sup>/s, cada una, para una altura neta de 362,56 m. La potencia instalada de la central será 487 MW y permitirá generar anualmente 2.745 GWh al Sistema Nacional Interconectado.

Las "Obras de Interconexión" conectan hidráulicamente las Centrales Hidroeléctricas Paute - Molino y Sopladora. Se considera que la conexión directa asegura que la calidad de las aguas se mantiene, evitando que los sedimentos procedentes tanto de la cuenca intermedia Amaluza - Guarumales como del dragado del embalse de Amaluza puedan llegar hasta la Central Sopladora. El objetivo principal de las obras de interconexión es obtener la conexión hidráulica apropiada entre los sistemas de las centrales Molino-Sopladora.

Entre los principales componentes de este sistema de obras se incluye un "Túnel de Descarga Intermedia", que entregará sus aguas al río Paute y que operando

conjuntamente con los vertederos de los túneles de descarga de la Central Molino permitirá que este aprovechamiento continúe funcionando normalmente, a pesar que la Central Sopladora haya dejado de operar.

Por otro lado, con el propósito de prevenir y evitar la potencial inundación de la Central Hidroeléctrica Paute ante un eventual fenómeno de deslizamiento de tierras, en el sector de la casa de máquinas de la central Molino, se prevé la construcción del “Túnel de Desvío” del río Paute.

El caudal de diseño utilizado para el dimensionamiento del túnel es de a 1.130 m<sup>3</sup>/s, correspondiente al caudal de crecida con un período de retorno de 10 años, afectado por el efecto de la laminación que sufriría en los embalses Mazar y Amaluza, más los caudales de crecida de la cuenca intermedia, con el mismo período de retorno, entre la presa Amaluza y el sitio de casa de máquinas de la Central Molino, según la información entregada por CGM. En el caso de presentarse un deslizamiento en el sector de Guarumales, se tendrá que trabajar inmediatamente para despejar el cauce del río; labores que podrán durar varias semanas, dependiendo del volumen deslizado. Durante estos eventos todo el caudal del río ingresaría al túnel y las centrales Molino y Sopladora podrían continuar operando normalmente.

## **1.2 DESCRIPCIÓN PARTICULAR DEL TÚNEL DE DESVÍO Y DEL TÚNEL DE DESCARGA INTERMEDIA CON SUS DIFERENTES COMPONENTES. OPERACIÓN EN PROTOTIPO.**

### **1.2.1 TÚNEL DE DESVÍO**

#### **1.2.1.1 Objetivos Técnicos del Túnel de Desvío**

Los objetivos técnicos principales del túnel de desvío son:

- (i) Evitar la potencial inundación de la Central Hidroeléctrica Paute - Molino, frente al eventual deslizamiento de tierras, que pudiera ocurrir en el sector de la casa de máquinas de la central Molino (Guarumales).
  
- (ii) Facilitar la construcción de las obras del paso subfluvial en el río Paute, conduciendo sus aguas fuera del cauce natural.

### **1.2.1.2 Elementos del Túnel de Desvío**

El “túnel de desvío” está conformado por los siguientes elementos:

- (a) Estructura de derivación o de entrada
- (b) Conducción principal en túnel
- (c) Estructura de unión
- (d) Disipador de energía y estructura de entrega

### **1.2.1.3 Estructura de derivación o de entrada**

El propósito de la estructura de entrada es obtener un patrón de flujo adecuado para que el agua ingrese y aumente paulatinamente su velocidad antes del portal del túnel, con el fin de evitar mayores excavaciones. Está conformada por una transición que sirve para empatar el tramo inicial de la estructura y la sección transversal del túnel circular, como se indica en el Plano No. 2-P del Anexo No.1.

La pendiente del fondo de la estructura de entrada es del 18%, desde la elevación 1.326,00 msnm, hasta alcanzar la entrada del túnel en la elevación 1.322,13 msnm. La longitud desde el inicio del dentellón hasta el portal de ingreso al túnel es igual a 24,10 m.

### **1.2.1.4 Conducción principal del Túnel de Desvío**

La conducción principal del Túnel de Desvío está conformada por:

- ❖ El primer tramo del Túnel de Desvío, de sección circular con un diámetro de 9,20 m, tiene una longitud de 49,21 m y una pendiente longitudinal del 18%.
- ❖ El segundo tramo del túnel tiene una longitud de 1.136,19 m, una pendiente longitudinal del 2% y un diámetro de 9,0 m.
- ❖ La estructura de descarga del Túnel de Desvío al río Paute, aguas abajo de la quebrada Marçayacu, se ubica entre las elevaciones 1.270,37 msnm y 1.269,80 msnm.

#### **1.2.1.5 Estructura de Unión**

Permite la confluencia del Túnel de Descarga Intermedia de sección transversal baúl con el Túnel de Desvío, de sección circular, como se indica en el Plano No. 3-P del Anexo No.1. La geometría de unión es compleja. Se presenta en el fondo un desnivel de altura constante e igual a 1m, para evitar la unión directa de las masas de agua que fluyen a velocidades altas. El ángulo de unión entre los dos ejes centrales de las conducciones es igual a  $10^\circ$ .

#### **1.2.1.6 Disipador de energía**

En la abscisa 1+200,00 se ha dispuesto la estructura de disipación de energía, previa a la entrega del caudal al cauce natural. Los objetivos de este elemento son:

- a) Controlar el efecto de la erosión o socavación en la zona de restitución del agua al cauce natural.
- b) Lograr un régimen de circulación del flujo hacia aguas abajo estable.

El disipador de energía es del tipo Kumin, el mismo que será ensayado en el modelo físico, presenta una configuración geométrica algo compleja y compacta, como se muestra en el Plano No.4-P del Anexo No.1.

### **1.3 SÍNTESIS DE LOS REQUERIMIENTOS PARA LA SIMULACIÓN EN MODELO FÍSICO DEL FENÓMENO DE FLUJO A TRAVÉS DE LAS OBRAS**

El estudio en modelo físico del flujo en el Túnel de Desvío y el Túnel de Descarga Intermedia, requiere del cumplimiento de las siguientes condiciones:

- (a) La semejanza entre las rugosidades de las secciones.

- (b) Una condición necesaria es la verificación de que el nivel de superficie libre calculado sea similar al valor real, pues se asumen en los cálculos hidráulicos hipótesis que simplifiquen y faciliten una solución matemática, por ejemplo despreciar el efecto de viscosidad y suponer flujo bidimensional.

Además se debe garantizar un nivel mínimo de funcionamiento tanto de las estructuras de entrada y salida, como a lo largo de los túneles. Para caudales mayores al caudal de diseño se requiere que las dimensiones de las obras sean lo suficientemente óptimas de tal forma que las estructuras trabajen de manera adecuada.

## **1.4 OBJETIVOS, ALCANCE Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE TITULACIÓN**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el funcionamiento hidráulico de los túneles de desvío y de descarga intermedia de la Central Paute – Molino y optimizar su geometría.

En el modelo físico se proyecta estudiar el funcionamiento hidráulico de los túneles en régimen supercrítico o rápido y realizar las modificaciones necesarias para alcanzar un buen funcionamiento de las estructuras.

En la presente investigación se realizará únicamente el análisis de flujo del Túnel de Desvío y del Túnel de Descarga Intermedia, con sus correspondientes estructuras de entrada y conducción principal. Las estructuras de entrega y de disipación de energía no son objeto de estudio para este proyecto de titulación.

### 1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Definir el tipo de modelo y la escala geométrica seleccionada para la investigación experimental.
- ii. Construir las obras de entrada, de conducción y de salida del caudal.
- iii. Definir un plan de pruebas que permita analizar la operación del túnel bajo la serie de caudales de ingreso. Determinar las profundidades de agua y velocidades de flujo.
- iv. Verificar la eficiencia hidráulica de las estructuras diseñadas, tales como: estructura de entrada, túnel de desvío, vertedero Creager, estructura de unión y túnel de descarga intermedia.
- v. Analizar la posible tendencia de fenómenos de cavitación en el flujo a lo largo del túnel de desvío.
- vi. Evaluar el funcionamiento hidráulico, con flujo a superficie libre y en régimen supercrítico, en todo el tramo del Túnel de Desvío y del Túnel de Descarga Intermedia.
- vii. Verificar el funcionamiento hidráulico de la conducción de la descarga intermedia y del vertedero Creager al inicio de la misma, y a la vez optimizar su configuración geométrica.

### 1.4.3 ALCANCE

El modelo físico reproducirá el patrón de flujo tanto en las obras de entrada a los túneles como a lo largo de los mismos, permitiendo verificar el dimensionamiento. En este proyecto de titulación se estudiará el comportamiento del flujo a lo largo del Túnel de Desvío, del Túnel de Descarga Intermedia y en las estructuras de entrada, no se considerará las estructuras de entrega y de disipación de energía.



#### **1.4.4 JUSTIFICACIÓN**

Muchos de los fenómenos que ocurren en la naturaleza y dentro del campo de la Hidráulica son tan complejos que no es fácil tratarlos únicamente con modelación matemática. Por lo que es conveniente recurrir al empleo de técnicas experimentales, como medidas adecuadas para la obtención de soluciones prácticas en problemas específicos.

La modelación matemática exige simplificaciones basadas en hipótesis que no siempre pueden ser cumplidas en el flujo real. En estos casos la modelación física permite la visualización y comprensión de fenómenos más complejos, permitiendo encontrar una solución adecuada.

El caso de estudio trata el comportamiento del flujo supercrítico con altas velocidades y cambios de dirección asociado a la presencia de ondas y el requerimiento de aireación en los túneles de desvío y descarga intermedia.

## **CAPÍTULO 2**

### **GENERALIDADES SOBRE LA MODELACIÓN FÍSICA**

#### **2.1 INTRODUCCIÓN**

Los métodos matemáticos plantean soluciones con modelos matemáticos casi siempre idealizados, lo que permite simplificaciones importantes, que a su vez causan efectos que deben ser valorados mediante ensayos experimentales, a través de modelos físicos a escala reducida.

En Hidráulica, el modelo simula un sistema real llamado prototipo, mediante el procesamiento de información se plantea un diseño final, para la construcción y operación de obras de Ingeniería Civil.

En la actualidad se dispone de técnicas avanzadas en la modelación física de fenómenos hidráulicos 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, seguridad y economía de las estructuras por construir.

#### **2.2 OBJETIVOS DE LA MODELACIÓN FÍSICA**

La modelación física tiene como fin reproducir a escala reducida fenómenos, estados o procesos relevantes del flujo del agua. Y además lograr que las magnitudes físicas o hidrodinámicas en el modelo hidráulico correspondan a las magnitudes en la naturaleza, bajo determinadas leyes.

La acertada selección de las magnitudes más relevantes en la representación del fenómeno hidráulico analizado, permitirá una aplicación inmediata de los resultados en la solución de los problemas.

## 2.3 SEMEJANZA HIDRÁULICA

Para la investigación experimental se trata de definir un modelo en el que las correspondientes magnitudes queden reproducidas a las escalas apropiadas. Desde un punto de vista hidráulico, es decir, fluido homogéneo en contorno fijo, las magnitudes son:

- ❖ Geométricas: Longitudes, áreas y volúmenes con sus formas.
- ❖ Cinemáticas: Tiempos, velocidades, aceleraciones, caudales.
- ❖ Dinámicas: Masas, fuerzas, presiones, pesos específicos, cantidades de movimiento, energías, tensiones superficiales, densidades, viscosidades.

El problema fundamental es el de cómo elaborar el modelo para que con las escalas apropiadas mantenga un comportamiento que reproduzca fielmente el del prototipo. Para poder construir el modelo, las consideraciones sobre su confiabilidad han de complementarse con otras que son características del correspondiente laboratorio: espacio disponible, capacidad de bombeo, equipos de medida, observación y control necesarios, personal especializado para construirlos y operarlos, etc.

El uso de modelos físicos hidráulicos implica que éstos deben ser semejantes al prototipo, para lo cual debe satisfacerse las leyes de similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica, que en conjunto relacionan las magnitudes físicas homólogas definidas en ambos sistemas, el prototipo  $A_p$  y el modelo  $A_m$ .

### ❖ *Similitud Geométrica*

En el flujo tanto en modelo como en prototipo se definen formas y dimensiones homólogas que constituyen la *similitud geométrica*, misma que implica una relación constante, es decir que, para cualquier longitud  $L$  resulta ser  $\frac{L_p}{L_m} = L_r$

llamada escala de longitudes.

#### ❖ *Similitud Cinemática*

Cuando la comparación de los sistemas  $A_p$  y  $A_m$  es con respecto a un movimiento, se establece entonces la *similitud cinemática*, y que se cumple cuando la forma de los patrones de flujo homólogos son iguales en cualquier tiempo, es decir hay similitud de movimientos en los dos sistemas; por lo que la relación de velocidades de puntos homólogos debe ser constante, es decir,  $\frac{V_p}{V_m} = V_r$  y generalizando,  $V_r = L_r t_r^{-1}$ , siendo  $V_r$  la escala de velocidades,  $L_r$  la escala de longitudes y  $t_r = \frac{T_p}{T_m}$  la escala de tiempos.

#### ❖ *Similitud Dinámica*

El movimiento del fluido en el modelo y en el prototipo, para que sea similar en forma completa, no es suficiente que cumpla con las similitudes geométrica y cinemática, también es necesario que se cumpla con la similitud que considera las condiciones dinámicas de flujo, es decir, las fuerzas que actúan sobre puntos homólogos deben ser similares, lo que a su vez manifiesta que la relación de homólogas sea un factor constante en todo sistema, es decir, existe *similitud dinámica*.

## **2.4 BASES Y RESTRICCIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO Y PRUEBAS CON UN MODELO DE FONDO FIJO, BAJO EL CRITERIO DE SIMILITUD DE FROUDE Y SEMEJANZA DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL MOVIMIENTO.**

### **2.4.1 SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA**

La simulación del flujo en un modelo físico a escala reducida exige que se cumplan las similitudes: geométrica, cinemática y dinámica. Sin embargo, en la mayoría de los casos, es común que, en un modelo reducido, no se pueda cumplir en forma simultánea con la similitud dinámica de todas las fuerzas que intervienen. Por lo tanto, la similitud en el modelo se restringe únicamente a las fuerzas dominantes.

La ausencia de similitud para las fuerzas de importancia secundaria produce los efectos de escala, que durante la investigación deben ser reducidos al mínimo y que deben ser evaluados durante el análisis y el procesamiento de la información. El presente estudio, en términos globales, se refiere al flujo a través de una estructura hidráulica con flujo a superficie libre. Se trata de un flujo rápido bajo el efecto de la gravedad, que simultáneamente produce disipación de energía, con alto porcentaje de introducción de aire y puede generar problemas de inestabilidad y de cavitación por las altas velocidades.

Considerando que la simulación del flujo en los túneles corresponde a un flujo con superficie libre, donde los cambios en las fuerzas de inercia se deben exclusivamente al efecto de la gravedad, el principal criterio de similitud a seleccionarse es el *criterio de Froude*. Esto significa que el número de Froude en el modelo, en lo posible, debe ser igual al del prototipo.

Adicionalmente, en este tipo de movimiento del agua, los cambios en la magnitud y en la dirección del vector velocidad están controlados y gobernados por la geometría del contorno. El modelo entonces debe ser *no distorsionado*: las características geométricas deben estar representadas a detalle y su influencia debe ser idéntica tanto en el modelo como en el prototipo, lo que permitirá transponer directamente los coeficientes adimensionales de descarga, medidos en el laboratorio, para su uso en el diseño a escala natural.

A lo largo de los túneles, el efecto de la fricción interna (viscosidad) sobre las características hidrodinámicas del movimiento del agua es relativamente apreciable, si se lo compara con la incidencia de la fuerza gravitacional. En consecuencia, para el presente caso el efecto de las fuerzas viscosas también debe ser incluido.

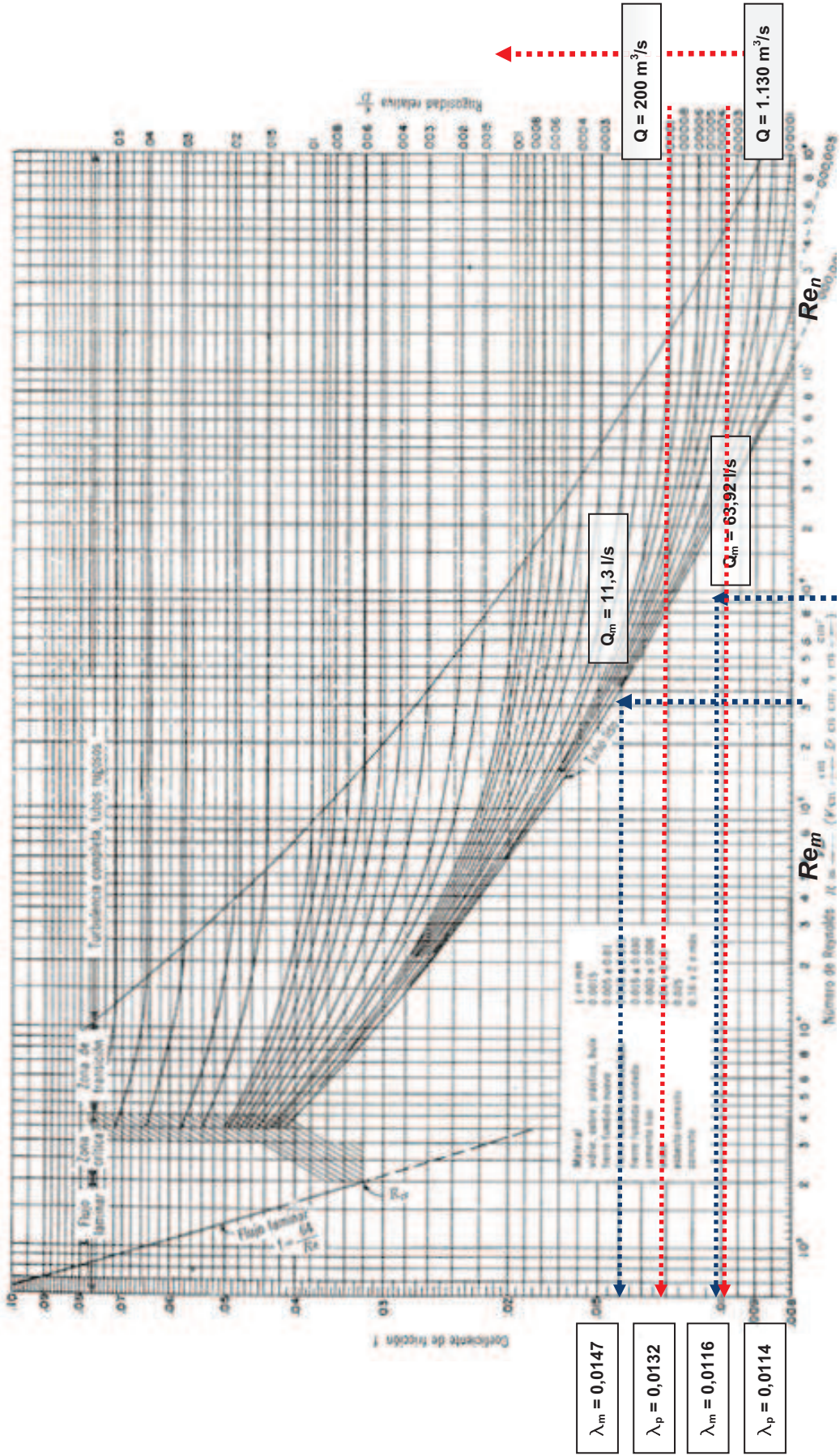
La simulación apropiada del efecto viscoso, que se atribuye a la fricción interna y al rozamiento con el contorno en el interior del conducto, en un modelo no distorsionado, operado de acuerdo con el criterio de similitud de Froude, exige que *el factor adimensional de fricción en la ecuación de Darcy-Weisbach sea igual en el modelo y en el prototipo*. Es decir:  $\lambda_m = \lambda_p$ , donde  $\lambda_m$  es el factor de fricción

en la relación de Darcy - Weisbach para el modelo y  $\lambda_p$  es el factor de fricción en la relación de Darcy - Weisbach para el prototipo.

Como se indica en la Figura No. 1 y con la ayuda del Diagrama de Moody, la igualdad entre los coeficientes  $\lambda_m = \lambda_p$  se puede conseguir en el modelo físico, con un cambio de material en las estructuras a escala. Se requiere entonces, que las estructuras en el laboratorio (modelo) sean de un material muy liso, como acrílico o plexiglas; de este modo, para un número de Reynolds mucho más pequeño se logra la igualdad en los valores de los coeficientes de fricción  $\lambda$ .



Figura No. 1: Factores de fricción para el flujo normal en prototipo y en modelo



Fuente: Informe de Fase I, Modelo Hidráulico del Túnel de Desvío de la Central Paute Molino.

Bajo la hipótesis de flujo normal permanente, en el caso del túnel de desvío, se evalúan los números de Reynolds  $Re = \frac{V \cdot 4R}{\nu}$  y el coeficiente de fricción  $\lambda$ , aplicando las relaciones de Colebrook – White, para contorno rugoso, en el prototipo y para contorno liso, en el modelo, en una gama seleccionada de caudales. Los valores calculados se muestran en el siguiente Cuadro No. 1.

**Cuadro No. 1:** Factores de fricción  $\lambda$  en la relación de Darcy – Weisbach para el prototipo y para el modelo

Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Diámetro (m)	n (Manning) (-)	Pendiente (%)	Rugosidad Absoluta (mm)	Rugosidad Relativa (-)	Velocidad (calculada) (m/s)	Reynolds (-) * 10 <sup>6</sup>	$\lambda$ rugoso (calculado) (-)
1.130	9,2	0,014	18	0,6	0,000078	47,1	364,2	0,0114
1.130	9	0,014	18	0,6	0,000077	47,1	365,1	0,0114
600	9	0,014	18	0,6	0,000101	39,5	235,3	0,012
200	9	0,014	18	0,6	0,000162	28,6	105,7	0,0132
100	9	0,014	18	0,6	0,000222	23,3	63	0,014
1.130	9	0,014	2	0,6	0,000055	19,8	215,9	0,0107
600	9	0,014	2	0,6	0,000065	17,7	164,4	0,011
200	9	0,014	2	0,6	0,000101	13,2	78,4	0,012
100	9	0,014	2	0,6	0,000136	10,8	47,5	0,0127

Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Diámetro (m)	Pendiente (%)	Rugosidad Absoluta (mm)	Rugosidad Relativa (-)	Velocidad (calculada) (m/s)	Reynolds (-) * 10 <sup>6</sup>	$\lambda$ liso (calculado) (-)	n calculado	
0,0639	0,184	18	0,0015	101,33	0,00001	6,7	1,0 E + 06	0,0116	0,007
0,0639	0,18	18	0,0015	100,27	0,00001	6,8	1,0 E + 06	0,0116	0,007
0,0339	0,18	18	0,0015	78,67	0,000013	5,8	6,8 E + 05	0,0125	0,007
0,0113	0,18	18	0,0015	48	0,000021	4,2	3,0 E + 05	0,0144	0,007
0,0057	0,18	18	0,0015	34,87	0,000029	3,3	1,7 E + 05	0,0161	0,007
0,0639	0,184	2	0,0015	148,15	0,000007	2,6	5,7 E + 05	0,0129	0,008
0,0339	0,18	2	0,0015	124,44	0,000008	2,4	4,5 E + 05	0,0134	0,008
0,0113	0,18	2	0,0015	81,27	0,000012	1,8	2,2 E + 05	0,0154	0,008
0,0057	0,18	2	0,0015	61,18	0,000016	1,5	1,3 E + 05	0,017	0,008

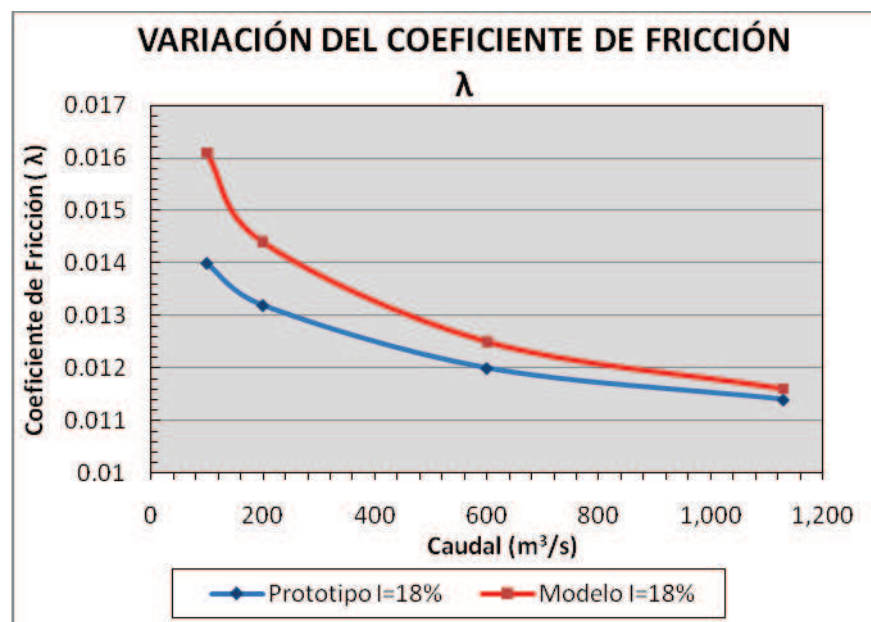
Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara



Se representa la variación del coeficiente  $\lambda$  en función del caudal y de la pendiente longitudinal, para prototipo y modelo, se representa en las siguientes Figuras Nos. 2 y 3. Se observa que, bajo la hipótesis de flujo normal, cuando el Túnel de Desvío tiene la pendiente  $I_0=18\%$ , el requerimiento de la igualdad de los valores para el modelo respecto de los del prototipo se satisface (la variación es menor al 12%, para el menor caudal evaluado); para el caso de la pendiente longitudinal  $I_0 = 2\%$ , las variaciones entre los valores  $\lambda$  en modelo y prototipo son mayores y llegan a ser del orden del 25%.

**Figura No. 2:** Factores de fricción para el flujo normal en prototipo y en modelo, en función de la pendiente longitudinal  $I_0=18\%$  y del caudal.

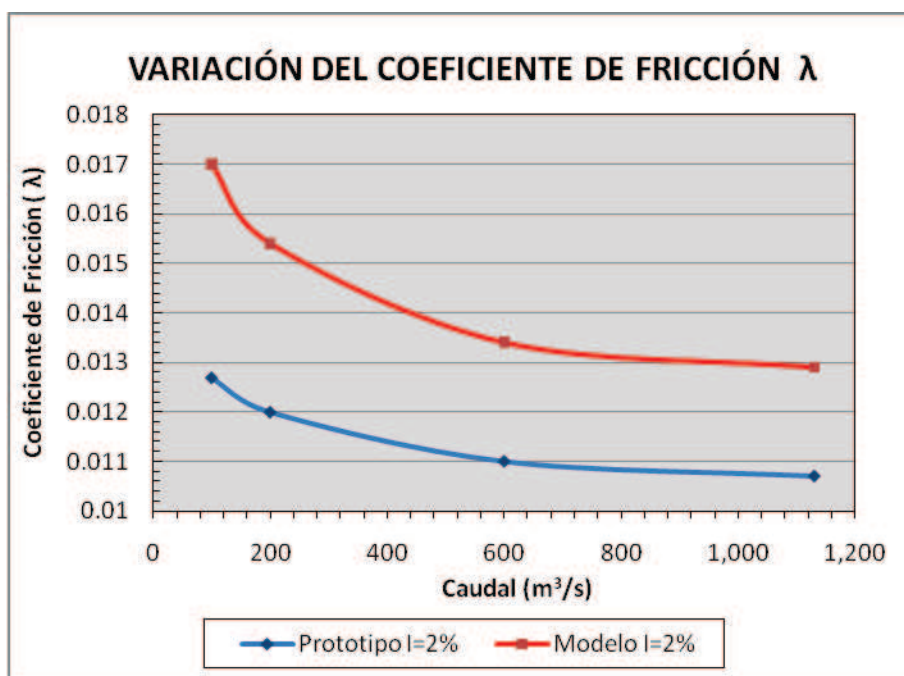
Caudal ( $m^3/s$ )	Prototipo	Modelo	Variación porcentual
1.130,00	0,0114	0,0116	2%
600,00	0,012	0,0125	4%
200,00	0,0132	0,0144	8%
100,00	0,014	0,0161	13%



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Figura No. 3:** Factores de fricción para el flujo normal en prototipo y en modelo, en función de la pendiente longitudinal  $I_0 = 2\%$  y del caudal.

Caudal ( $m^3/s$ )	Prototipo	Modelo	Variación porcentual
1.130,00	0,0107	0,0129	17%
600,00	0,011	0,0134	18%
200,00	0,012	0,0154	22%
100,00	0,0127	0,017	25%



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Considerando que el coeficiente calculado  $\lambda_m$  para  $I_0=2\%$  presenta un valor superior en un 25% respecto del valor calculado  $\lambda_p$  para  $I_0=2\%$ , se espera que la pérdida de energía en el modelo sea mayor que la pérdida correspondiente en el prototipo.

La presencia de flujo inestable en el prototipo puede ser analizada con la ayuda del modelo físico, si es que el número de Vedernikov ( $Ve$ ) es igual en el prototipo y en el modelo. El número de Vedernikov ( $Ve$ ) representa las condiciones críticas bajo las cuales las fuerzas de inercia dan lugar a las ondas superficiales

transversales y longitudinales, y su valor depende de la forma del canal, rugosidad del contorno, alineación en planta y pendiente longitudinal.

Si el número de Vedernikov se iguala a la unidad, por su significado y por su expresión cuantitativa, puede ser transformado en un número de Froude, que según la literatura técnica se lo conoce como *Froude crítico*,  $Fr_c$ . Este valor define las condiciones bajo las cuales un flujo llega a ser inestable.

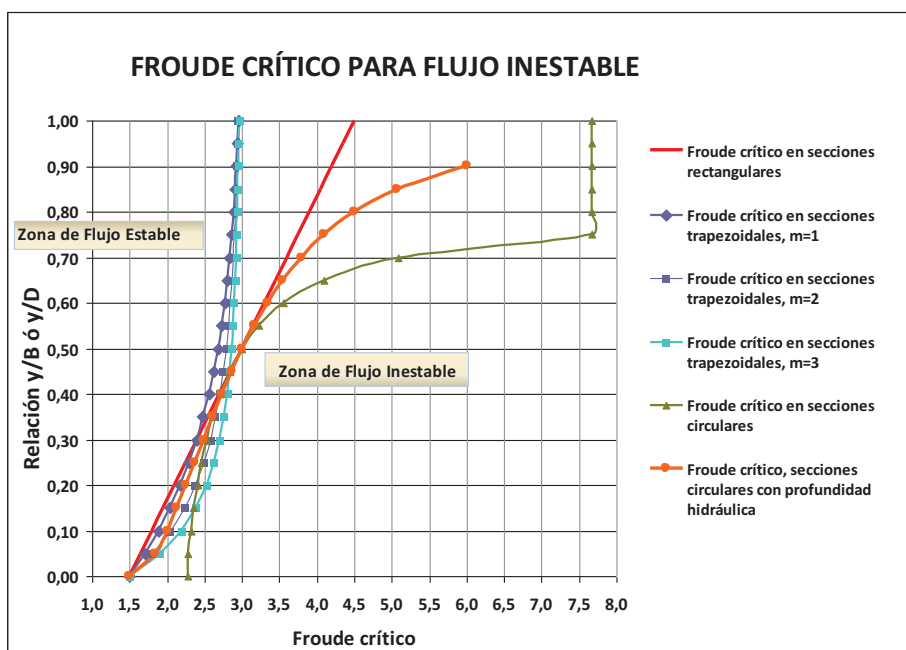
Considerando lo antes señalado, y para el análisis de los casos presentes de conducciones de sección transversal circular y baúl, es suficiente la similitud bajo el criterio de Froude para lograr la semejanza del flujo potencialmente inestable.

Si los valores del Froude calculados en el modelo, y que son idénticos a los del prototipo, llegan a ser iguales a los  $Fr_c$ , entonces el flujo es inestable tanto en modelo como en prototipo.

La variación del número  $Fr_c$  en función de las relaciones  $y/B$  o  $y/D$  (profundidad de agua / ancho del canal rectangular o profundidad de agua / diámetro), se presenta en la siguiente Figura No. 4.

Como resultado de la simulación del flujo gradualmente variado a lo largo del Túnel de Desvío, se presenta en el Cuadro No. 2 algunos valores del número de Froude.

**Figura No. 4:** Números de Froude crítico al interior de conducciones de secciones transversales rectangular, trapezoidal y circular.



Fuente: Informe de Fase I, Modelo Hidráulico del Túnel de Desvío de la Central Paute Molino.

**Cuadro No. 2:** Números de Froude al interior (a) del Túnel de Desvío y (b) de la Descarga Intermedia, calculados bajo la hipótesis de flujo gradualmente variado

Tramo	Díámetro interior (m)	Pendiente (%)	Máximo valor de velocidad media (m/s)	Calado (m)	$y/D$ (%)	$Fr$ (-)	$Fr_c$
1	9,00	18,00	28,06	5,39	59,89	4,23	3,60
2	9,00	2,00	21,06	6,94	77,11	2,75	7,70

(a)

Tramo	Sección tipo baúl (m x m)	Pendiente (%)	Máximo valor de velocidad media (m/s)	Calado (m)	$y/b$ (%)	$Fr$ (-)	$Fr_c$
1	6 x 7	18,00	19,42	2,63	43,83	3,82	2,85
2	6 x 7	2,00	18,92	2,68	44,67	3,69	2,85

(b)

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

En base a los valores de la relación de llenado y de Froude crítico se puede determinar si el flujo se encuentra en la zona de flujo estable o inestable. Para los casos del Túnel de Desvío y de la Descarga Intermedia el flujo cae en la zona de flujo inestable.

#### 2.4.1.1 Flujo en curva en el túnel

Un factor importante en el Túnel de Desvío del río Paute es su curvatura en planta. El Túnel de Desvío tiene dos curvas de radio 300 m y 400 m. El flujo rápido en curvas genera ondas cruzadas, que pueden llegar a presentar magnitudes importantes.

Este fenómeno se analizará utilizando las relaciones teóricas, si la curva presentara problemas importantes, tales como las denominadas ondas cruzadas. El número de curva se define como  $B_0 = Fr * (b/R_c)^{1/2}$ , donde b es el ancho de canal o el ancho de la superficie libre del agua en el túnel circular, Fr es el número de Froude y  $R_c$  el radio medio de curvatura.

Este parámetro  $B_0$  permite determinar las sobre-elevaciones máximas y mínimas de las ondas cruzadas. Sin embargo, interesa determinar si la curva es fuerte o débil, mediante el parámetro que es función del número de curva  $B_0$  y que sirve para el diseño de las conducciones de este tipo. Si  $B_0 \leq 1,5$ , la curva es débil; si  $B_0 > 1,5$ , la curva es fuerte y se deben esperar graves perturbaciones por ondas cruzadas.

En el caso del Túnel de Desvío, para las dos curvas presentes en el trazado, los valores de  $B_0$  son: Curva No. 1,  $B_0 = 0.85$ ; Curva No. 2,  $B_0 = 0.73$ .

Para el análisis del fenómeno de *introducción de aire en la masa de agua* debe considerarse que las fuerzas predominantes son las de tensión superficial. La correcta simulación de este fenómeno requiere que se cumpla el criterio de similitud de Weber. De acuerdo a estos dos criterios y considerando que tanto en el prototipo como en el modelo se trabaja con agua de tensión superficial constante, las escalas de las principales magnitudes se presentan en el siguiente Cuadro No. 3, en donde:  $L_r$  es la escala de longitudes o la relación entre

longitudes similares del prototipo respecto de la del modelo;  $g_r = 1$ , representa que la gravedad es idéntica en modelo y en prototipo;  $\sigma_r = 1$ , que el valor de la tensión superficial es idéntica en modelo y en prototipo;  $\gamma_r = 1$ , que el peso específico es igual en modelo y en prototipo porque se utiliza el mismo líquido (agua) en los ensayos en el laboratorio.

**Cuadro No. 3:** Valores de las relaciones o escalas para las principales magnitudes con los criterios de similitud de Froude y de Weber

<b>Magnitudes principales</b>	<b>Similitud de Froude</b>	<b>Similitud de Weber</b>
<b>Longitudes:</b>	$L_r = L_r/L_m$	$L_r = L_r/L_m$
<b>Superficies:</b>	$A_r = L_r^2$	$A_r = L_r^2$
<b>Velocidades:</b>	$V_r = L_r^{1/2}$ con $g_r=1$	$V_r = L_r^{-1/2}$ con $s_r = g_r = 1$
<b>Tiempos:</b>	$t_r = L_r/V_r = L_r^{1/2}$	$t_r = L_r/V_r = L_r^{3/2}$
<b>Caudales:</b>	$Q_r = V_r \cdot A_r = L_r^{5/2}$	$Q_r = V_r \cdot A_r = L_r^{3/2}$
<b>Aceleración:</b>	$a_r = V_r/t_r = 1$	$a_r = V_r/t_r = L_r^{-2}$
<b>Presión:</b>	$(p/\gamma)_r = L_r$	$(p/\gamma)_r = L_r$

Fuente: Introducción a la Teoría de Modelos Hidráulicos y Aplicaciones Básicas.  
Hidalgo M. EPN

Según los resultados de investigaciones en modelos con diferentes escalas de longitud, se recomienda que, para una adecuada simulación del problema de ingreso de aire, deben utilizarse escalas de longitudes iguales o inferiores a 20 ( $L_r = 20$ ) y el criterio de similitud de Froude para las magnitudes derivadas. El

número de Reynolds debe garantizar en cualquier caso el flujo turbulento totalmente desarrollado.

El efecto de la tensión superficial en el movimiento del agua en el prototipo, respecto de la curvatura inducida en la superficie libre, es irrelevante. De este modo, en el modelo, la escala de longitudes a ser seleccionada debe ser suficientemente pequeña como para garantizar que las profundidades de agua sean mayores a los 3 cm y por lo tanto, el efecto de la tensión superficial sobre la curvatura de la superficie libre sea irrelevante también en el modelo.

#### 2.4.1.2 Fenómeno de cavitación

En flujos de alta velocidad es posible que se presenten problemas de cavitación. La cavitación se establece por las bajas presiones locales cercanas a la presión de vapor a la temperatura del medio, se considera que la presión atmosférica de Quito es igual a 7,63 m de agua y la presión de vapor a 20°C, es igual 0,239 m de agua y que son creadas en la capa límite debido a la relación entre la presión local y la energía de velocidad del flujo.

Un flujo puede presentar problemas de cavitación para altas velocidades y bajos niveles de presión de agua, y anularse este fenómeno, aumentando el nivel de la presión de agua o bien disminuyendo su velocidad.

Se recomienda airear el flujo para aumentar la presión local cuando ninguno de estos dos últimos casos pueden ser desarrollados en el diseño y se sigue presentando la amenaza de cavitación.

El *índice de cavitación*  $\sigma$  es representativo del estado del flujo, este número se expresa como la relación entre la presión absoluta local respecto de la presión de vapor y la energía de velocidad del flujo. El índice de cavitación  $\sigma$  entonces se escribe como:

$$\sigma = \frac{\left( \frac{P_a}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} + h_p \right)}{\frac{V^2}{2g}} > \sigma_i$$

Donde:

$\sigma$	=	Índice de cavitación del flujo.
$\sigma_i$	=	Índice de cavitación crítico o Índice límite según la geometría.
$p_a/\gamma$	=	Altura de columna de agua correspondiente a la presión atmosférica.
$p_v/\gamma$	=	Altura de columna de agua correspondiente a la presión de vapor.
$h_p$	=	Altura de presión o profundidad del agua, m.
$V$	=	Velocidad media, m/s.
$g$	=	Aceleración de la gravedad

El resultado de aplicar la anterior ecuación a los resultados del modelo será comparado con los índices límites que establecen las condiciones mínimas requeridas para dar lugar al fenómeno de cavitación.

El U.S. Bureau of Reclamation define distintos valores de rugosidad y pendientes localizadas admisibles, agrupándolas en tres diferentes tipos de tolerancias:

**Cuadro No. 4:** Definición de la tolerancia de las irregularidades

<b><i>Tolerancia</i></b>	<b><i>Irregularidad abrupta (mm)</i></b>	<b><i>Irregularidad gradual (-)</i></b>
<b><i>T1</i></b>	25	1:4
<b><i>T2</i></b>	12	1:8
<b><i>T3</i></b>	6	1:16

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

El índice de cavitación crítico  $\sigma_i$  del flujo en función de la tolerancia presente, se define en el cuadro siguiente:



**Cuadro No. 5:** Índices críticos de cavitación  $\sigma_i$  según el grado de tolerancia

$\sigma_i$	<i>Tolerancia sin aireación</i>	<i>Tolerancia con aireación</i>
> 0,60	T1	T1
0,40 a 0,60	T2	T1
0,20 a 0,40	T3	T1
0,10 a 0,20	Revisión del diseño	T2
< 0,10	Revisión del diseño	Revisión del diseño

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

En el caso del Túnel de Desvío y descarga intermedia, se adopta que el grado de tolerancia admisible es la T3, para la cual el índice de cavitación  $\sigma_i$  debe ser superior a 0,40.

Las observaciones en el modelo físico a escala reducida no permiten advertir por sí solas la amenaza de cavitación, el estudio de la cavitación se efectuará a partir de los resultados obtenidos en modelo a escala, mediante la transformación de las magnitudes a valores del prototipo utilizando la escala de Froude. Con estos valores se pueden evaluar los parámetros que permitan identificar la amenaza de cavitación.

#### 2.4.1.3 Aireación en el túnel

Con la ayuda del modelo físico, otro aspecto importante a ser examinado es la capacidad del túnel de desvío para introducir y mantener el flujo necesario de aire en su interior, durante el tránsito de los caudales ordinarios y extraordinarios.

En este caso es difícil e incierto determinar con toda certeza lo que sucederá en el prototipo, mediante las observaciones y mediciones en el modelo a escala.

La velocidad de agua en el túnel es capaz de arrastrar por simple fricción aire a lo largo del conducto. Además, la energía turbulenta que se disipa en la superficie de la lámina de agua es capaz de romper la energía que por tensión superficial impide la mezcla de aire y agua. Cuando esto sucede el flujo de agua comienza a

introducir poco a poco aire en la masa líquida, hasta obtener una mezcla con concentraciones de aire que varían desde un máximo en la superficie hasta un mínimo en el fondo.

La concentración media integrada en la vertical viene dada por una ecuación que se expresa como:  $C_m = 0.75 * (\sin \Phi)^{0.75}$ ; donde  $C_m$  es la concentración de aire y  $\Phi$  es el ángulo en radianes de la pendiente del fondo del canal.

El incremento de nivel de agua debido a la entrada de aire en el seno líquido se puede estimar con la relación:

$$Y = h_{99}/h_w = 1 + (1,35*\eta)/(1+2*h_w/b) \quad \text{y} \quad \eta = [h_w * \sin^3 \Phi / (n^2 * g^3)]^{1/4}.$$

En donde:

- $h_{99}$  = Altura con el 99% de aire
- $h_w$  = Altura de agua sin aire
- $n$  = Coeficiente de Manning
- $g$  = Aceleración de la gravedad
- $b$  = Ancho del canal o del espejo de aguas.

Otro problema que amerita análisis es la falta de capacidad del conducto para captar el aire del exterior e introducirlo al interior. Este es arrastrado al interior del túnel por la fricción existente entre el agua y el aire.

Se realiza la hipótesis de que las velocidades medias del aire en el prototipo están a escala de Froude respecto de aquellas del modelo, debido a que no es posible realizar un estudio a escala del flujo de aire en el conducto. Una base para sostener esta hipótesis es el reconocimiento de que el aire en contacto con el agua tendrá la misma velocidad del agua, por efecto pared.

Una aproximación para estimar el caudal de aire requerido para el flujo en el túnel de desvío se obtiene realizando la evaluación de la velocidad del conducto y escalar esta velocidad con el criterio de Froude. El caudal de aire se calcula

realizando la estimación del caudal de aire en diferentes secciones del túnel y luego evaluando un promedio matemático de todas las secciones.

Este procedimiento dará lugar a un caudal de aire que debe ser incrementado con el caudal requerido para dar lugar a la introducción natural del aire en la masa de agua. Dado que se conoce el área de flujo para el aire, se puede estimar su velocidad media.

Finalmente, habrá que suponer el flujo en el modelo como flujo permanente, donde el efecto de las ondulaciones de la superficie libre del agua sobre la distribución de velocidades y de presiones sea relativamente pequeño. Se considerará entonces que, justificadamente y por instantes, el flujo sea semejante a un escurrimiento permanente, con líneas de corriente libres de fuerte curvatura y que por lo tanto, la distribución de presiones a lo largo de la vertical es lineal, semejante a la distribución hidrostática.

El *efecto combinado* de los fenómenos asociados a magnitudes físicas como la tensión superficial, la compresibilidad del agua y la presión de vapor es muy pequeño en las condiciones del prototipo. En cambio, a causa del tamaño del modelo, puede existir incidencia de estas fuerzas o magnitudes en el escurrimiento del agua. Por tal razón, es práctica común que el modelo no tenga una escala de longitudes muy grande, que las profundidades de agua sean siempre mayores a los 3 cm, que no se admita la auto-aireación por velocidades altas y que el contorno de las estructuras en el modelo sea *hidráulicamente liso*<sup>1</sup>.

Si lo señalado en el contenido anterior se cumple, el flujo del agua en el modelo tiende a un comportamiento de fluido ideal, en el cual la inercia, el perfil de flujo y las variaciones de nivel de la superficie libre o de la presión en la masa de agua responden exclusivamente a cambios de la geometría del contorno.

---

<sup>1</sup> Informe Fase I, Modelo Hidráulico del Túnel de Desvío de la Central Paute Molino.

## 2.5 RELACIÓN DE ESCALAS ENTRE LAS MAGNITUDES HIDRODINÁMICAS DE UN MODELO CON SIMILITUD DE FROUDE Y SU PROTOTIPO.

En los flujos sujetos al efecto de la gravedad (por ejemplo corrientes con superficie libre) debe asegurarse que junto a la semejanza geométrica también el número de Froude sea igual en el modelo y en el prototipo.

$$Fr_r = \frac{V_r}{\sqrt{g_r L_r}} = 1$$

De esto se obtiene la escala para la velocidad con  $g_r = 1$ .

$$V_r = (g_r L_r)^{1/2} \rightarrow L_r^{1/2}$$

Con esta relación resultan las siguientes leyes de transposición de magnitudes o escala de magnitudes, según el criterio de Similitud de Froude como se presenta en el siguiente Cuadro.

**Cuadro No. 6** Transposición de magnitudes de acuerdo a la Similitud de Froude

<b>Magnitud</b>	<b>Similitud de Froude</b>
Longitud	$\lambda_L$
Tiempo	$\lambda_L^{1/2}$
Aceleración	1
Velocidad	$\lambda_L^{1/2}$
Caudal	$\lambda_L^{5/2}$
Presión	$\lambda_L$
Energía	$\lambda_L^4$
Fuerza	$\lambda_L^3$

Fuente: Introducción a la Teoría de Modelos Hidráulicos y Aplicaciones Básicas.

Hidalgo M. EPN

## **2.6 CONSIDERACIONES SOBRE LA TRANSPOSICIÓN DE LAS MAGNITUDES FÍSICAS OBTENIDAS EN MODELO.- NIVELES O PROFUNDIDADES DE AGUA, VELOCIDADES, PRESIONES Y PATRONES DE FLUJO.**

### **2.6.1 VELOCIDAD**

En el movimiento de masas de agua los cambios en la magnitud y en la dirección del vector velocidad están controlados y gobernados por la geometría de contorno. Por lo tanto las características geométricas de puntos homólogos en modelo y en prototipo deben ser semejantes.

### **2.6.2 VISCOSIDAD**

El efecto de la fricción interna o viscosidad sobre las características hidrodinámicas del movimiento del agua es pequeño en comparación con la incidencia de la fuerza gravitacional.

### **2.6.3 TENSIÓN SUPERFICIAL**

La consecuencia de la tensión superficial en el movimiento del agua en el prototipo es prácticamente irrelevante. La literatura técnica brinda muchas recomendaciones que limitan o eliminan su efecto, de este modo, en el modelo, la escala de longitudes a ser seleccionada debe ser tal que garantice que las profundidades de agua sean mayores a 3 cm y por lo tanto, también en el modelo, el efecto de la tensión superficial es despreciable.

### **2.6.4 PRESIÓN**

Se asume que el flujo es permanente y la distribución de presiones a lo largo de la vertical es de tipo lineal, semejante a la distribución hidrostática.

Finalmente, el efecto combinado de los fenómenos asociados a magnitudes físicas como la tensión superficial, la compresibilidad del agua y la presión de vapor se considera muy pequeño en condiciones de prototipo. Sin embargo, es necesario comprobar no solo la incidencia de la fuerza predominante, sino la de las demás que se las desprecia al adoptar una similitud, pues estas pueden conducir a desviaciones que pueden limitar el alcance de la investigación, sus resultados y la calidad de la modelación.

## 2.7 CONCLUSIONES

- ❖ La modelación física de las estructuras de entrada y salida y de los túneles de desvío y descarga intermedia permite visualizar el comportamiento hidráulico de las obras antes mencionadas, procurando que su funcionamiento sea lo más cercano al prototipo.
- ❖ Estudiando las fuerzas que intervienen en el modelo físico se concluye que la gravedad y la rugosidad del contorno son factores importantes para este caso de flujo a superficie libre.
- ❖ Al tratarse de un sistema de flujo a superficie libre, se adopta el criterio de Similitud de Froude, para lograr la semejanza del flujo potencialmente inestable. Los valores de Froude calculados en el modelo son idénticos a los del prototipo, por lo que el flujo es inestable tanto en modelo como en prototipo.
- ❖ En el caso de este modelo a escala, no se puede cumplir en forma simultánea con la similitud dinámica de todas las fuerzas que intervienen, por lo que la similitud se restringe únicamente a las fuerzas dominantes.

## CAPÍTULO 3

### DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

#### 3.1 SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA ESCALA DE LONGITUDES. ESCALAS DERIVADAS

Según la información técnica proporcionada por el CGM se conoce que el caudal de diseño en el túnel de desvío es igual a  $1.130 \text{ m}^3/\text{s}$  y en la descarga intermedia, este valor llega a ser igual a  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Para estos valores se estiman las magnitudes hidrodinámicas del modelo.

**Cuadro No. 7:** Magnitudes características en los modelos físicos a escala 1:50 y 1:40

<i>Magnitudes físicas</i>	<i>Dimensiones en el prototipo</i>	<i>Dimensiones en el modelo escala 1:50</i>	<i>Dimensiones en el modelo escala 1:40</i>
Longitud del túnel	1.280,0 m	25,6 m	32,0 m
Sección túnel Circular	9,0 m	18,0 cm	22,5 cm
Sección túnel Tipo baúl	$6 \times 7 \text{ m}^2$	$12 \times 14 \text{ cm}^2$	$15 \times 17,5 \text{ cm}^2$
Caudales de operación Túnel de desvío	$50 - 1.130 \text{ m}^3/\text{s}$	2,8 – 63,9 l/s	4,9 – 111,7 l/s
Caudales de operación Descarga Intermedia	$15 - 200 \text{ m}^3/\text{s}$	0,8 – 11,3 l/s	1,5 -19,8 l/s
Desnivel entre secciones extremas	38,0 m	0,76 m	0,95 m

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Se ha propuesto escoger el modelo de mayor tamaño, que pueda ser construido en el nuevo laboratorio del CIERHI - EPN, considerando las disponibilidades físicas de espacio, de caudales y de la carga hidráulica desde el inicio del modelo.

El laboratorio del CIERHI, tiene un área cubierta requerida para este estudio experimental, dentro de este espacio se incluye además dos estructuras de alimentación a los túneles, el área de simulación de las obras de conexión entre las centrales y las estructuras de restitución de caudales.

## **3.2 IMPLANTACIÓN DEL MODELO: ESTRUCTURAS PRINCIPALES Y COMPLEMENTARIAS**

### **3.2.1 GENERALIDADES SOBRE LA INFRAESTRUCTURA**

El modelo se sitúa en el Laboratorio del CIERHI de la Escuela Politécnica Nacional como se indica en el Plano No. 1-M, del Anexo No. 1. El Laboratorio posee un sistema de bombeo de capacidad 800 l/s, un canal de recirculación de flujo y cuenta con varias tomas de agua a lo largo del perímetro de la planta del laboratorio. En el modelo bajo análisis se usan dos tomas de agua:

- (i) Para el tanque de entrada al Túnel de Desvío.
- (ii) Para el tanque de entrada a la Descarga Intermedia.

### **3.2.2 DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO**

#### **3.2.2.1 Tanques de Entrada**

Existen dos tanques de alimentación de agua a los túneles, con las siguientes características:

##### **a) Tanque de entrada al Túnel de Desvío:**

Se conforma de dos estanques desfasados, separados por una pared de 30 cm de ancho, como se indica en el Plano No. 1-M, del Anexo No. 1. Tienen las siguientes dimensiones:

Tanque 1: 1,15 x 2,00 x 3,00 m<sup>3</sup>.

Tanque 2: 1,20 x 2,00 x 2,50 m<sup>3</sup>.



Las características de estos tanques son: contruidos de hormigón armado, reforzados externamente con perfiles de acero e impermeabilizados en su interior, con láminas de material Chova. Los detalles geométricos de los tanques se muestran en el Plano No. 6-M, del Anexo No. 1. En las siguientes Fotografías Nos. 1 - 2 y en las fotografías del Anexo No. 2A se muestran los detalles de los mismos.

**Fotografía No.1:** Vista lateral de los tanques de entrada al Túnel de Desvío



**Fotografía No. 2:** Vista superior de los tanques de entrada al Túnel de Desvío.



b) Tanque de entrada a la Descarga Intermedia:

Se compone por dos tanques desfasados, separados por una pared de 30 cm de ancho, como se indica en el Plano No. 1-M, del Anexo No. 1. Las estructuras tienen las siguientes dimensiones:

Tanque 1: 2,10 x 1,00 x 2,50 m<sup>3</sup>.

Tanque 2: 1,20 x 1,00 x 2,50 m<sup>3</sup>.

Se caracterizan por ser contruidos de hormigón armado, reforzados externamente con perfiles de acero e impermeabilizados en su interior por medio de láminas de material Chova. Las dimensiones geométricas se encuentran detalladas en el Plano No. 6-M, del Anexo No. 1. La fotografía No. 3 indica ciertos detalles del tanque y en el Anexo No. 2A se presentan fotografías adicionales.

**Fotografía No. 3:** Vista lateral del Tanque de Entrada a la Descarga Intermedia



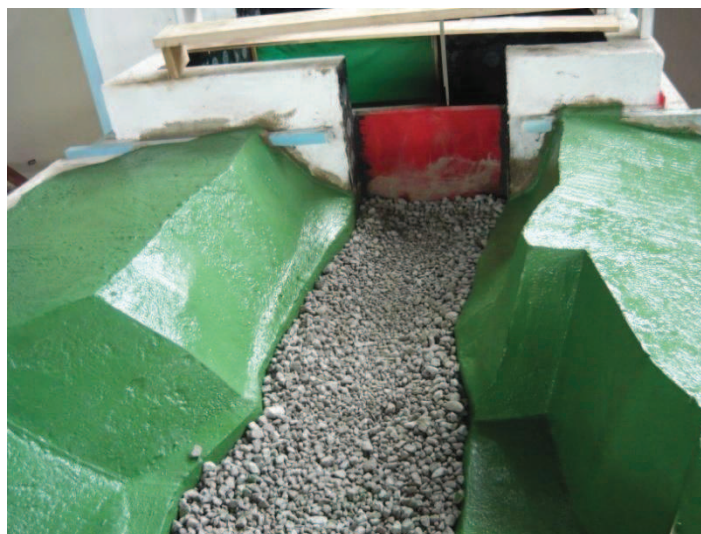
### 3.2.2.2 Tanques para representación del tramo del río Paute

#### a) Tanque No. 1: Para simulación de la topografía del tramo superior

Se encuentra a continuación del tanque de almacenamiento a la entrada al Túnel de Desvío. Está construido de hormigón armado, con dimensiones interiores de  $2,60 \times 3,70 \times 0,60 \text{ m}^3$ .

La configuración topográfica se construye con terrocemento sobre un relleno de bloques, según datos de diez perfiles transversales levantados en el campo, como se muestra en la Fotografía No. 4. Además el tanque cuenta con una clapeta de regulación de caudales, la misma que controla el nivel de la superficie libre del agua.

**Fotografía No. 4:** Representación de la topografía del tramo del río Paute, hacia aguas arriba de la estructura del Túnel de Desvío



#### b) Tanque No. 2: Para simulación de la topografía del tramo inferior

Este tanque se encuentra ubicado aguas abajo de la descarga desde el Túnel de Desvío. Está construido de hormigón armado, con las siguientes dimensiones interiores:  $2,70 \times 3,70 \times 0,60 \text{ m}^3$ . Los detalles de este tanque se indican también en la Fotografía No. 3, del Anexo No. 2A.

La configuración topográfica se construye con terrocemento sobre un relleno de bloques, según datos de quince perfiles transversales levantados en el campo. Además el tanque cuenta con una clapeta de regulación de caudales, la misma que controla el nivel de la superficie libre del agua.

### 3.2.2.3 Modelos del Túnel de Desvío y de la Descarga Intermedia

#### a) Estructura de Entrada, Túnel de Desvío, Estructura de Salida

- Estructura de Entrada

Construida de madera, con finos acabados, y revestida con pintura tipo esmalte. La Fotografía No. 6 del Anexo 2A presenta los detalles de la estructura, implantada al interior del tanque con la representación topográfica del cauce del río Paute.

- Túnel de Desvío

Se inicia con un tubo moldeado en acrílico e instalado aguas abajo de la estructura de entrada, de diámetro 18,4 cm, pendiente del 18% y una longitud de 1,014 m., a continuación se tiene una transición excéntrica desde el diámetro 18,4 cm a 18,0 cm, con pendiente de 18% y una longitud de 19,2 cm; a partir de esta sección, el diámetro permanece constante y es igual a 18 cm, el tramo de la tubería es recto con pendiente de 18% y una longitud de 1,895 m. Continúa con un tramo de curva vertical, con una longitud igual a 0,84 m; posteriormente se dispone de un tramo recto de 5,64 m, con pendiente del 2%, que se mantiene constante. Posteriormente aparece un tramo de curva horizontal, cuya longitud es igual a 4,24 m; después se tiene un tramo recto de 4,85 m, seguido de un tramo de curva horizontal de longitud igual a 3,84 m. El Túnel de Desvío termina con un tramo recto de 1,41 m.

La tubería en acrílico se instala sobre soportes metálicos, la pendiente de los tableros puede ser regulada mediante pernos de ajuste ubicados en los apoyos, como se muestra a continuación y en la Fotografía No. 4 del Anexo No. 2A.

**Fotografía No.5:** Vista superior de la tubería en acrílico para representar el Túnel de Desvío



**Fotografía No. 6:** Tramo de la tubería en acrílico a la salida del Túnel de Desvío



- Estructura de Salida

Se conforma de un canal de madera, impermeabilizado con pintura tipo esmalte, sobre el cual se ubica el dissipador tipo Kumin. Este dissipador está construido en acrílico, y se implanta a la salida del Túnel de Desvío como se muestra en la Fotografía No.7 a continuación.



**Fotografía No. 7:** Modelo del dissipador Tipo Kumin ubicado al extremo del Túnel de Desvío



b) Descarga Intermedia

- Tramo Final de la Cámara de Interconexión

Tanque de paredes de acrílico, ubicado aguas arriba del vertedero de cimacio tipo Creager, con dimensiones  $0,28 \times 0,60 \times 0,90 \text{ m}^3$ . La Fotografía No. 8 muestra los detalles de este tanque aguas arriba del vertedero:

**Fotografía No. 8:** Modelo del tramo final de la Cámara de Interconexión.



- Vertedero de Perfil tipo Creager

Es un vertedero de cimacio, moldeado en acrílico, con paredes de igual material y de ancho variable. La variación del ancho corresponde a dos curvas en planta. Se ubica aguas abajo de la cámara de interconexión y está colocado sobre un soporte metálico. Las Fotografías Nos. 9 y 10 muestran la implantación, así como lo indica la Fotografía No. 5 en el Anexo 2A.

**Fotografía No. 9:** Vista lateral del modelo del vertedero con perfil tipo Creager



**Fotografía No. 10:** Vista superior del modelo del vertedero con las paredes de doble curvatura



- Estructura de Unión de las dos conducciones

La unión es de tipo “Y”; conformada por un canal de sección rectangular de 12 x 12 cm<sup>2</sup> de la Descarga Intermedia y la sección circular de diámetro 18 cm, que corresponde al Túnel de Desvío. Los detalles de la unión se indican tanto en las Fotografías Nos. 11 y 12 como en las Fotografías Nos. 17 a 20 del Anexo 2A y en el Plano No. 7-M del Anexo No. 1.

**Fotografía No. 11:** Modelo de la estructura de unión (antes de su montaje)



**Fotografía No. 12:** Estructura de unión de la Descarga Intermedia y Túnel de Desvío





### 3.3 INSTRUMENTACIÓN BÁSICA Y EQUIPAMIENTO

#### 3.3.1 ELEMENTOS PARA TOMA O DERIVACIÓN DEL AGUA DESDE EL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN

El abastecimiento de agua a los tanques de almacenamiento se realiza por medio de dos tomas. Cada toma se desarrolla con un codo de 90°, seguido de una válvula de compuerta conectada a la tubería de admisión, de diámetro 200 mm.

La longitud de la tubería es de 9,27 m para el Tanque de Carga 1 y de 21,21m para el Tanque de Carga 2. La tubería se sujeta mediante abrazaderas y pernos sobre los apoyos de hormigón. Adicionalmente, se tienen 4 codos de 90° para cada tanque; en la parte superior de la tubería se instala una válvula de aire que permite mejorar la calidad del flujo en las tuberías.

Las válvulas de compuerta sirven para la regulación del caudal de ingreso, las mismas que al girar permiten que el caudal aumente poco a poco y simultáneamente se controla el nivel de agua en los tanques mediante la lectura en limnímetros y a su vez se conoce el caudal.

En la descarga de la tubería al interior de los tanques se tienen perforaciones para disipar la energía residual en el ingreso del flujo. Estas características son comunes tanto para el Tanque de Carga del Túnel de Desvío como para el Tanque de Carga a la Descarga Intermedia, como se muestra en el Plano No. 4-M del Anexo No. 1, y en las siguientes Fotografías Nos. 13 a 15.

**Fotografía No. 13:** Vista de la toma (derivación) de agua, válvula de compuerta y tubería hacia el modelo de la Descarga Intermedia



**Fotografía No. 14:** Vista de la toma (derivación) de agua, válvula de compuerta y accesorios en la tubería hacia el Túnel de Desvío



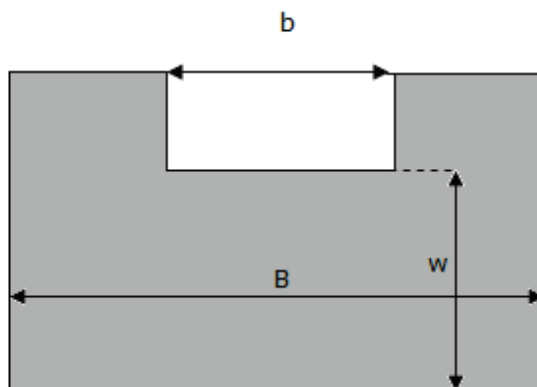
**Fotografía No. 15:** Instalación de la válvula de aire en la tubería



### 3.3.2 VERTEDEROS DE MEDIDA

a) En el tanque de entrada

Se ubica un vertedero rectangular de medida en el primer tanque de almacenamiento. Está construido en madera, sujeto con pernos a las paredes y pintado con esmalte. Las dimensiones del vertedero rectangular son:  $w = 1,80$  m,  $b = 0,67$  m,  $B = 1,08$  m



El coeficiente de descarga  $m$  se calcula mediante la fórmula propuesta por Rehbock<sup>2</sup> para vertederos rectangulares con contracciones laterales:

$$u = \left[ 0,6035 + 0,0813 \left( \frac{h + 0,0011}{w} \right) \right] \left[ 1 + \frac{0,0011}{h} \right]^{3/2}$$

Rangos de validez de la ecuación:

$$0,01 \text{ m} \leq h \leq 0,80 \text{ m}; b \geq 0,30 \text{ m}; w \geq 0,06 \text{ m}; h/w \leq 1,00$$

Estas condiciones se cumplen satisfactoriamente para el vertedero rectangular de medida en el tanque de entrada al Túnel de Desvío.

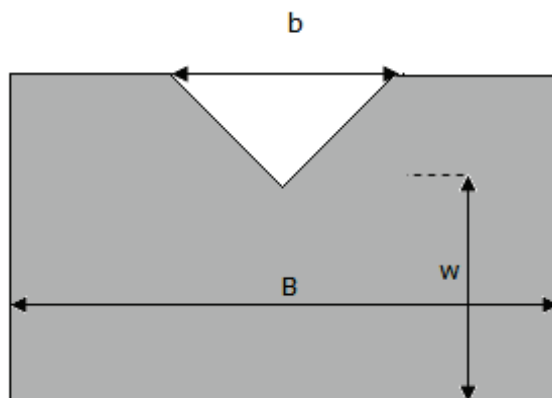
**Fotografía No. 16:** Vertedero rectangular en operación



<sup>2</sup> "Hidráulica General", Vol I, Sotelo, G.

b) En el tanque de entrada hacia la Descarga Intermedia

Se tiene un vertedero triangular de medida en el tanque de almacenamiento, sujetos a las paredes con pernos, pintado con esmalte y con las siguientes dimensiones:  $w = 1,81$  m,  $b = 0,40$  m,  $B = 0,77$  m



El coeficiente de descarga  $m$  se calcula mediante la fórmula propuesta por Hégly<sup>3</sup> para vertederos triangulares.

$$u = \left[ 0,5812 + \frac{0,00375}{h} \right] \left\{ 1 + \left[ \frac{h^2}{B \cdot w} \right] \right\}$$

Rangos de validez de la ecuación para los vertederos triangulares:

$$0,05 \text{ m} \leq h \leq 0,25 \text{ m}, \quad b \geq 8h, \quad w \geq 3h, \quad Q=90^\circ$$

Estas condiciones se cumplen para el vertedero triangular de medida en el tanque de entrada hacia la Descarga Intermedia.

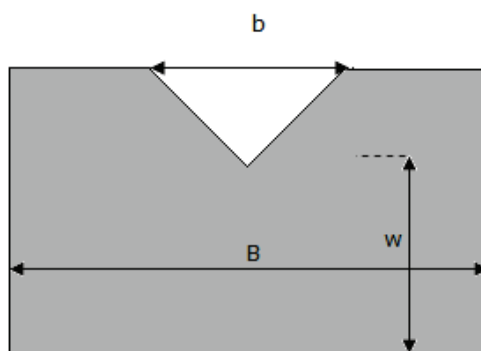
<sup>3</sup> "Hidráulica General", Vol I, Sotelo, G.

**Fotografía No. 17:** Vista frontal del vertedero triangular de medida



c) En el tanque de salida del modelo general

Vertedero triangular de medida, instalado aguas abajo del tanque que simula el tramo inferior del río Paute. Está construido de madera, pintada con esmalte y sujetado mediante pernos. Con las siguientes dimensiones:  $w = 0,10$  m,  $b = 0,70$  m y  $B = 1,00$  m.



El coeficiente de descarga  $m$  se calcula mediante la fórmula propuesta por Hégly<sup>4</sup> para vertederos triangulares:

$$u = \left[ 0,5812 + \frac{0,00375}{h} \right] \left\{ 1 + \left[ \frac{h^2}{B + w} \right] \right\}$$

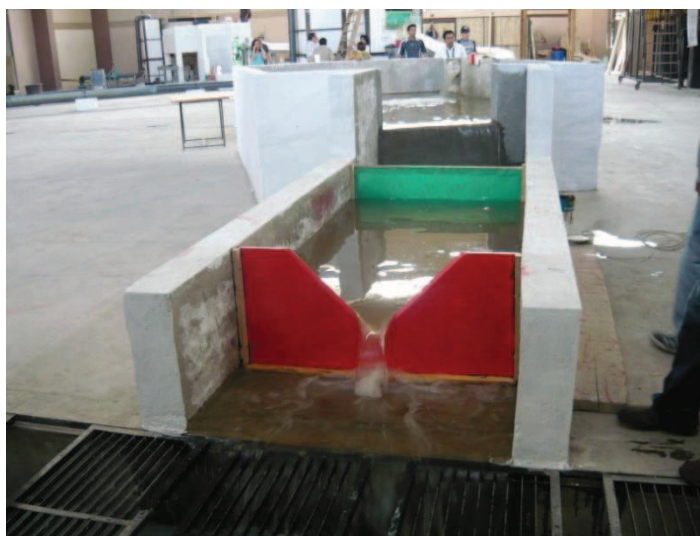
<sup>4</sup> "Hidráulica General", Vol I, Sotelo, G.

Rangos de validez de la ecuación para los vertederos triangulares:

$$0,05 \text{ m} \leq h \leq 0,25 \text{ m}, b \geq 8h, w \geq 3h, Q = 90^\circ$$

Estas condiciones satisfacen el caso del vertedero triangular de medida a la salida del modelo general.

**Fotografía No. 18:** Vertedero triangular de medida a la salida del modelo general



### 3.3.3 LIMNÍMETROS

Instrumentos utilizados para medir la carga en el tramo de aproximación a cada uno de los vertederos de medida en cada tanque. La lectura del valor de la carga permite calcular el caudal de circulación en cada ramo del modelo y a la vez ajustar los caudales de operación en el modelo según se requiera. Los limnímetros están ubicados aguas arriba de cada vertedero e instalados sobre soportes de madera.

Se utiliza un limnómetro para medir el calado o profundidad de agua en la sección circular del Túnel de Desvío y otro limnómetro para medir el calado en la base de sección rectangular base en la Descarga Intermedia. Cada uno de estos limnímetros está sujeto a un soporte de madera móvil, permitiendo su desplazamiento a las diferentes secciones determinadas para cada medición.



Adicionalmente se cuenta con limnímetros colocados en zonas aguas arriba y sobre la cresta de la estructura de entrada.

Cada limnómetro debe estar nivelado y perpendicular a la base de la sección, las medidas son tomadas con una aproximación de décima de milímetro. Se usan limnímetros de 40 cm y 60 cm, en función del rango requerido para la correcta medición de la profundidad de agua. Los detalles se muestran en las Fotografías Nos. 19 a 21.

**Fotografía No. 19:** Limnómetro para medición de la carga sobre el vertedero triangular



**Fotografía No. 20:** Limnómetro colocado aguas arriba de la estructura de entrada al Túnel de Desvío



**Fotografía No. 21:** Limnómetro instalado sobre a la estructura de entrada

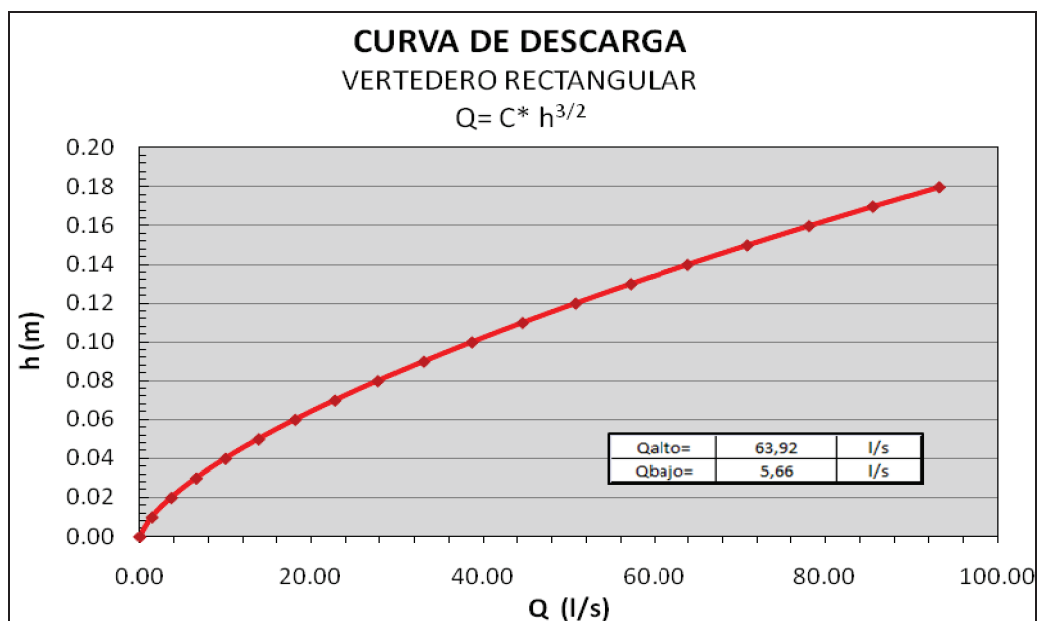


### 3.4 CURVAS DE DESCARGA PARA VERTEDEROS DE MEDIDA

En las siguientes figuras se presentan las Curvas de Descarga: Caudal vs. Carga sobre los vertederos utilizados para la medición del caudal que transita a lo largo del modelo.

#### 3.4.1 VERTEDERO RECTANGULAR EN EL TANQUE DE ENTRADA AL MODELO GENERAL

**Figura No. 5:** Curva de descarga del vertedero rectangular

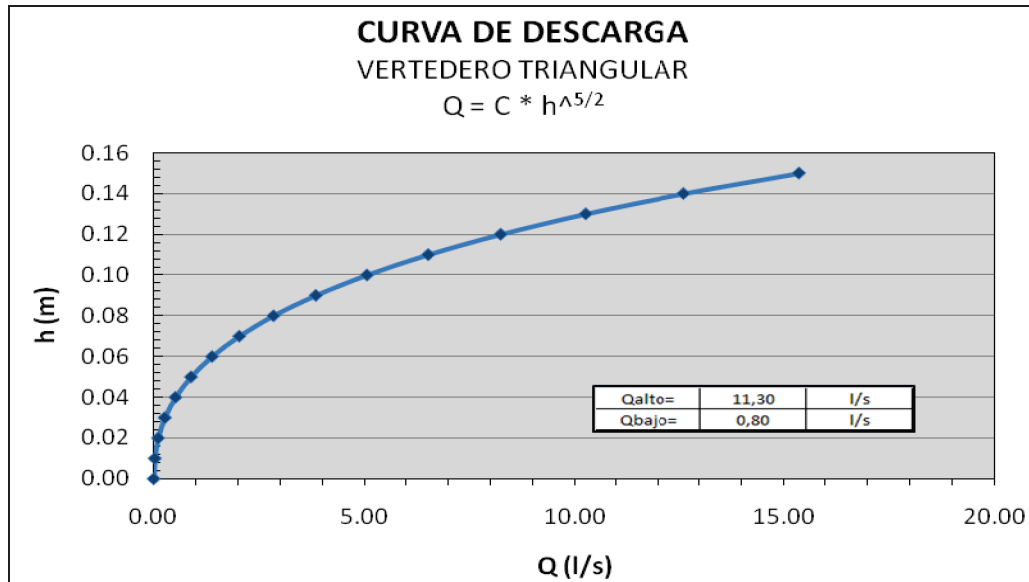


Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara



### 3.4.2 VERTEDERO TRIANGULAR EN EL TANQUE ANTES DE LA DESCARGA INTERMEDIA

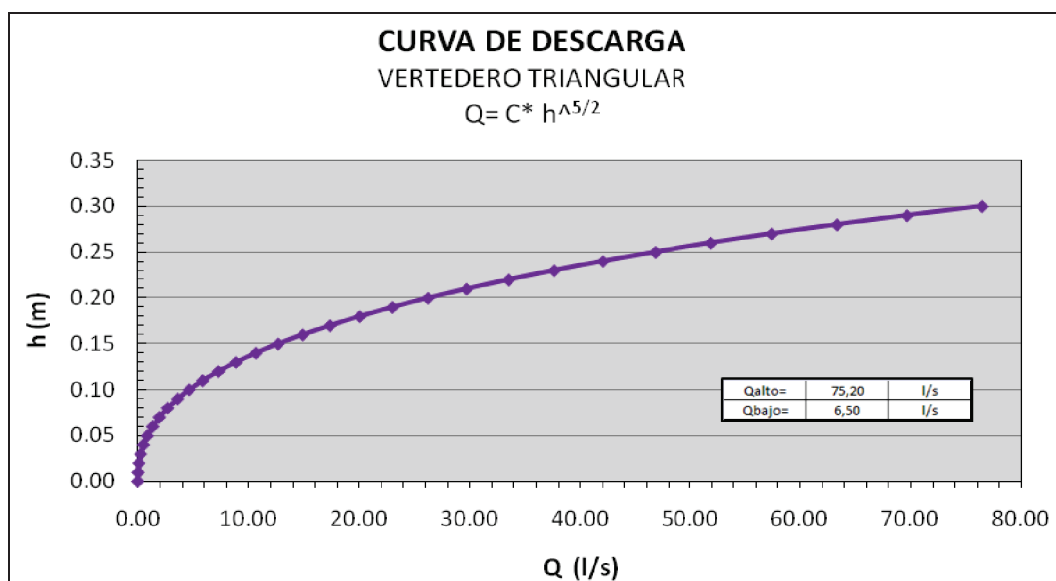
**Figura No. 6:** Curva de descarga del vertedero triangular de entrada a la Descarga Intermedia



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

### 3.4.3 VERTEDERO TRIANGULAR EN EL TANQUE DE SALIDA DEL MODELO GENERAL

**Figura No. 7:** Curva de descarga del vertedero triangular a la salida del modelo



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

### 3.5 PLAN PRELIMINAR DE PRUEBAS Y DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN EN LAS DIFERENTES FASES DE OPERACIÓN DEL MODELO.

#### 3.5.1 PLAN PRELIMINAR DE PRUEBAS

Para la primera etapa de esta investigación se propuso el siguiente Plan de pruebas con el objeto de conseguir los objetivos técnicos señalados para la fase de validación y calibración del modelo:

**Cuadro No. 8:** Plan Preliminar de Pruebas propuesto para la fase de validación y calibración

**Proyecto:** MODELO HIDRÁULICO SOPLADORA II (Túnel de Desvío)

#### PRUEBAS PARA LA FASE DE VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO

PRUEBA No.	TÚNEL DE DESVÍO		DESCARGA INTERMEDIA		CAUDAL TOTAL	
	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal modelo (l/s)	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal modelo (l/s)	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal modelo (l/s)
1	500	28,3			500	28,3
2	1.130	63,9			1.130	63,9
3			200	11,3	200	11,3

Fuente: Informe de Fase I, Modelo Hidráulico del Túnel de Desvío de la Central Paute Molino.

Las mediciones de caudal se realizan en el modelo por medio de la lectura de la carga sobre los vertederos triangulares ( $\Theta = 90^\circ$ ,  $\Theta$  es el ángulo central de la escotadura) y sobre un vertedero rectangular de cresta delgada. Estos vertederos de medición fueron construidos según la norma técnica respectiva<sup>5</sup>. La ubicación de

<sup>5</sup> "Discharge Measurement Structures", Pub. Nr. 20, International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, Wageningen- Delft Hydraulics Laboratory, Delft, Holanda, 1992. "Sobre el uso de las Diferentes Fórmulas para Coeficientes de Descarga de vertederos de medida", Castro, M., Revista Politécnica, Vol. VI, No. 3, 1983. "Beitrag zur Verwendung von Durchflußgleichungen bei Dreieck Überfällen", Jurisch, R., BAW Karlsruhe, 1980.

los vertederos se detalla a continuación y se muestra en el Plano No. 3-M del Anexo No. 1.

- (i) Se dispone de un vertedero rectangular en la sección inicial del modelo que ingresa a la representación del tramo del río Paute.
- (ii) El primer vertedero triangular se ubica antes del ingreso del flujo de aproximación hacia el vertedero de cimacio de la Descarga Intermedia.
- (iii) El segundo vertedero triangular se ubica a la salida general del modelo, aguas abajo de la representación del tramo inferior del río Paute.

### **3.6 CONCLUSIONES**

- ❖ La implantación del modelo ha sido correctamente situada, cumpliendo con los requerimientos de escala que fueron verificados con el replanteo de puntos ubicados en el espacio físico del Laboratorio CIERHI.
- ❖ La construcción del modelo a escala seleccionada 1:50 fue realizada con precisión, evitando errores de funcionamiento de las estructuras reducidas y del comportamiento hidráulico.
- ❖ Los datos obtenidos en el modelo dependen de la precisión en la lectura de los valores así como también de la correcta instalación del equipo necesario.

## **CAPÍTULO 4**

### **CALIBRACIÓN DEL MODELO.**

#### **Bases para la calibración del modelo.**

#### **4.1 OBJETIVOS DE LA FASE DE CALIBRACIÓN**

La etapa de calibración y el desarrollo del estudio experimental en el modelo tomarán en consideración los siguientes objetivos a ser alcanzados:

- a. Representar de forma apropiada el patrón de flujo; tanto de las líneas de corriente como también de los niveles de la superficie libre para los caudales determinados.
- b. Registrar el comportamiento hidráulico en el modelo, en base a lecturas limnimétricas, la ayuda de trazadores, fotografías digitales y filmaciones.
- c. Procesar los datos obtenidos en las mediciones y presentarlos en forma de figuras y cuadros de parámetros adimensionales.

#### **4.2 PLAN DE PRUEBAS DE CALIBRACIÓN**

En la primera etapa de la investigación se propuso el siguiente Plan de pruebas con la finalidad de conseguir los objetivos técnicos señalados para la fase de calibración del modelo.

**Cuadro No. 9:** Plan de pruebas de validación y calibración

**Proyecto:** MODELO HIDRÁULICO SOPLADORA II (Túnel de Desvío)

**PRUEBAS PARA LA FASE DE VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO**

<b>PRUEBA No.</b>	<b>TÚNEL DE DESVÍO</b>		<b>DESCARGA INTERMEDIA</b>		<b>CAUDAL TOTAL</b>	
	<b>Caudal Prototipo (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Caudal modelo (l/s)</b>	<b>Caudal Prototipo (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Caudal modelo (l/s)</b>	<b>Caudal Prototipo (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Caudal modelo (l/s)</b>
1	500	28,3			500	28,3
2	1.130	63,9			1.130	63,9
3			200	11,3	200	11,3

Fuente: Informe de Fase I, Modelo Hidráulico del Túnel de Desvío de la Central Paute Molino.

Se realizan además calibraciones volumétricas de los caudales de operación del modelo y de los vertederos de medida, utilizando un recipiente de plástico con volumen conocido y un cronómetro. La instalación se ubica en el interior del tanque rectangular a la salida del modelo. En el Cuadro No.10 se detallan los resultados de las calibraciones volumétricas, para los diferentes caudales ensayados en la fase previa a la validación y calibración del modelo.

#### **4.3 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES EN LAS PRUEBAS DE CALIBRACIÓN DEL MODELO FÍSICO POR COMPONENTES.**

La diferencia entre los valores de los caudales es menor al 6,4%, como se indica en el Cuadro No. 10. Adicionalmente, sobre la base de las mediciones simultáneas de la carga sobre los vertederos se pudo comparar los valores calculados de los caudales, lo que permite un chequeo adicional de los valores del caudal utilizados en el procesamiento de los datos obtenidos en el modelo.

**Cuadro No. 10:** Valores del caudal medidos volumétricamente y valores calculados del caudal en los vertederos de medida.

<b>Prueba No.</b>	<b>Medición Volumétrica</b>			<b>Vertedero de medida</b>		<b>Diferencia de caudal (%)</b>
	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Volumen (l)</b>	<b>Caudal (l/s)</b>	<b>Carga (cm)</b>	<b>Caudal (l/s)</b>	
1	78,25	75,54	0,96	5,07	0,90	6,31
	78,66					
	78,05					
	78,51					
	79,71					
Promedio =	78,636					
2	15,00	75,54	5,32	10,21	5,10	4,21
	13,94					
	14,15					
	13,66					
	14,19					
Promedio =	14,888					
3	6,61	75,54	11,70	13,52	11,50	1,68
	6,80					
	6,14					
	6,60					
	6,14					
Promedio =	6,458					
4	19,72	75,54	3,77	1,94	3,70	1,78
	19,26					
	20,32					
	20,37					
	20,59					
Promedio =	20,052					

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Esta comparación entre vertederos de medida se hace para tres casos:

- a) Entre el vertedero rectangular al inicio y el vertedero triangular a la salida del modelo.
- b) Entre el vertedero triangular a la entrada de la Descarga Intermedia y el vertedero triangular a la salida del modelo.
- c) Entre la suma de los caudales del vertedero rectangular al inicio más el del vertedero a la entrada de la Descarga Intermedia comparado con el caudal del vertedero triangular a la salida del modelo.

Los resultados de la primera comparación se muestran en el Cuadro No.11 y en la Figura No. 8, mientras que los resultados de la segunda comparación se muestran en el Cuadro No. 12 y en la Figura No. 9; y, finalmente, los resultados de la tercera comparación se muestran en el Cuadro No. 13 y en la Figura No. 10.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye que:

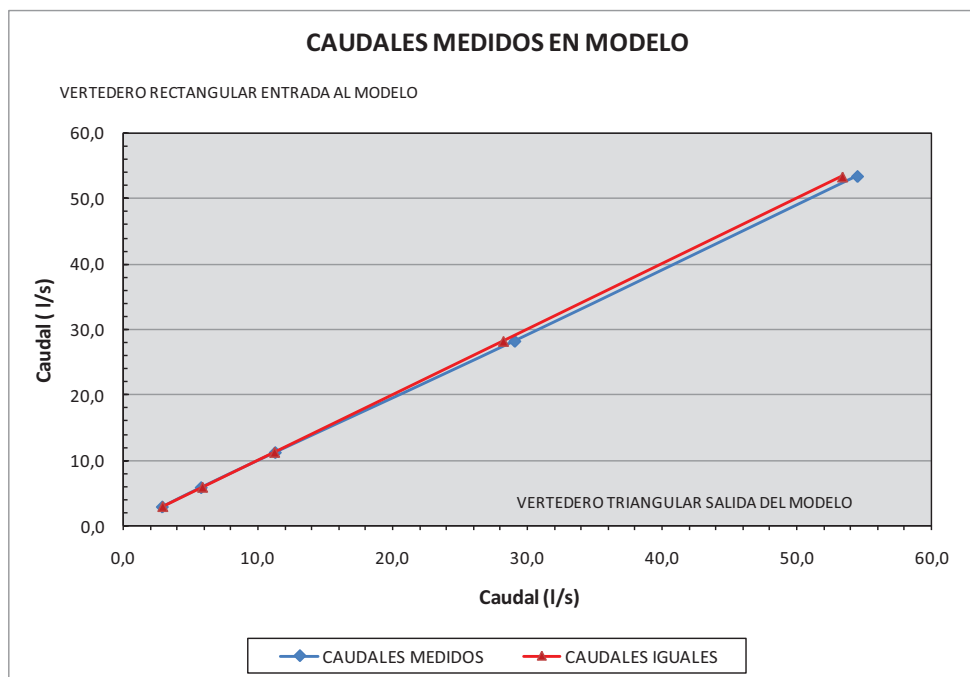
- (i) En todos los casos la diferencia entre los valores calculados del caudal en el modelo (l/s) es inferior al 5% y en su mayoría, es del orden del 1%.
- (ii) Para el caso de las cargas más pequeñas medidas (1,6 cm), la máxima diferencia entre los valores calculados de los coeficientes de caudal es igual a 5,6%.
- (iii) Estos resultados son aceptables en todos los casos, para los análisis posteriores de variación de la profundidad de flujo, de la velocidad o del número de Froude a lo largo de las conducciones.

**Cuadro No. 11:** Comparación de los valores del caudal (l/s) medidos en el vertedero rectangular a la entrada del modelo y el vertedero triangular a la salida.

Prueba No.	VERTEDERO RECTANGULAR ENTRADA AL MODELO				VERTEDERO TRIANGULAR SALIDA DEL MODELO		
	Carga (m)	Caudal (l/s)	Cd	h/w	Carga (m)	Caudal (l/s)	C
1 TD	0,016	2,9	2,08	0,01	0,083	2,9	1,50
2 TD	0,028	5,9	1,92	0,02	0,109	5,8	1,47
3 TD	0,044	11,2	1,85	0,02	0,143	11,3	1,46
4 TD	0,081	28,2	1,83	0,05	0,208	29,1	1,47
5 TD	0,124	53,4	1,82	0,07	0,265	54,5	1,51

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Figura No. 8:** Valores del caudal (l/s) medidos en el vertedero rectangular a la entrada del modelo y valores medidos en el vertedero triangular a la salida.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

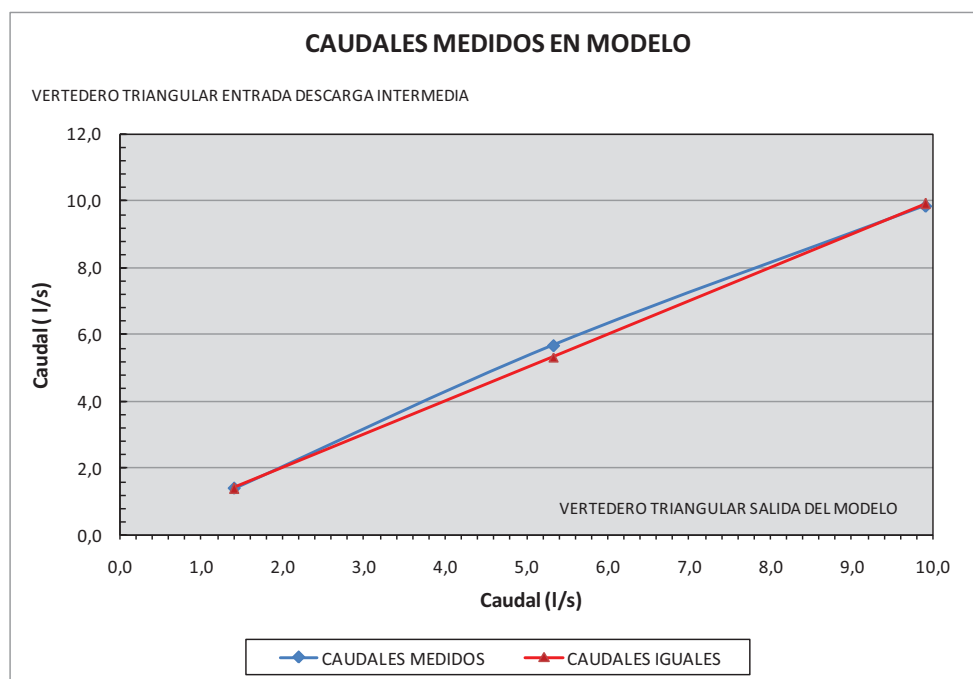


**Cuadro No. 12:** Comparación del caudal (l/s) medido en el vertedero triangular a la entrada de la Descarga Intermedia y el vertedero triangular a la salida.

Prueba No.	VERTEDERO TRIANGULAR ENTRADA A DESCARGA INTERMEDIA			VERTEDERO TRIANGULAR SALIDA DEL MODELO		
	Carga (m)	Caudal (l/s)	C	Carga (m)	Caudal (l/s)	C
1 DI	0,060	1,4	1,58	0,061	1,4	1,52
2 DI	0,104	5,7	1,61	0,105	5,3	1,48
3 DI	0,128	9,9	1,68	0,136	9,9	1,46

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Figura No. 9:** Caudal (l/s) medido en el vertedero triangular a la entrada de la Descarga Intermedia y valor medido en el vertedero triangular a la salida.



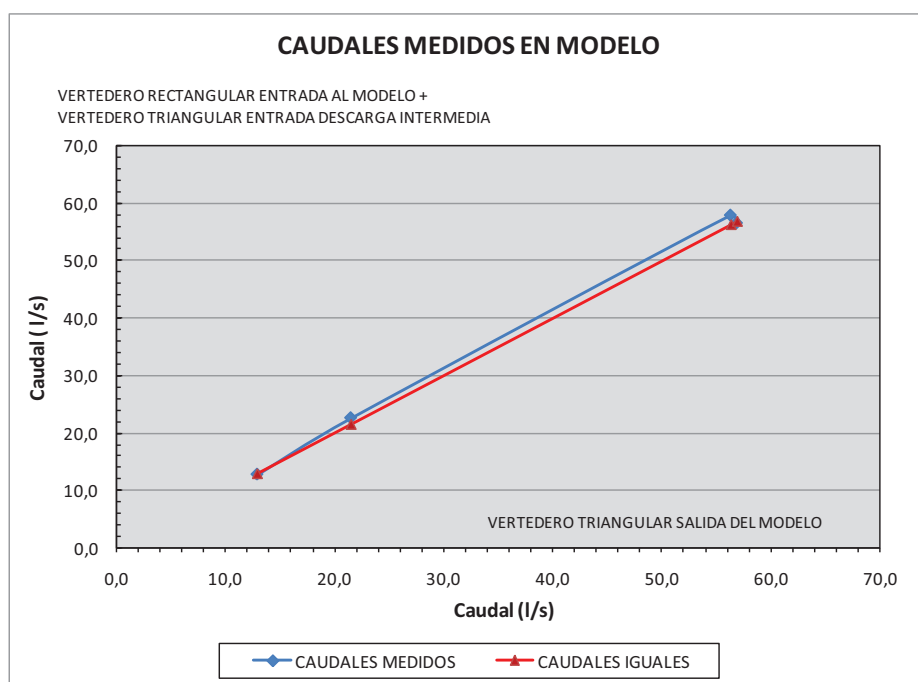
Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Cuadro No. 13:** Valores del caudal (l/s) medidos en el vertedero rectangular a la entrada del modelo y en el vertedero triangular antes de la Descarga Intermedia comparado con el caudal del vertedero triangular a la salida.

Prueba No.	VERTEDERO RECTANGULAR ENTRADA AL MODELO				VERTEDERO TRIANGULAR ENTRADA A DESCARGA INTERMEDIA			VERTEDERO TRIANGULAR SALIDA DEL MODELO		
	Carga (m)	Caudal (l/s)	Cd	h/w	Carga (m)	Caudal (l/s)	C	Carga (m)	Caudal (l/s)	C
1 (TD + DI)	0,044	11,3	1,85	0,02	0,060	1,4	1,58	0,1511	12,9	1,45
2 (TD + DI)	0,044	11,2	1,85	0,02	0,135	11,3	1,70	0,185	21,5	1,46
3 (TD + DI)	0,129	56,4	1,82	0,07	0,062	1,5	1,58	0,268	56,3	1,52
4 (TD + DI)	0,120	50,8	1,82	0,07	0,105	5,7	1,61	0,269	56,9	1,52

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Figura No. 10:** Suma de los valores del caudal (l/s) medidos en el vertedero rectangular a la entrada del modelo y en el vertedero triangular antes de la Descarga Intermedia comparado con el caudal del vertedero triangular a la salida.

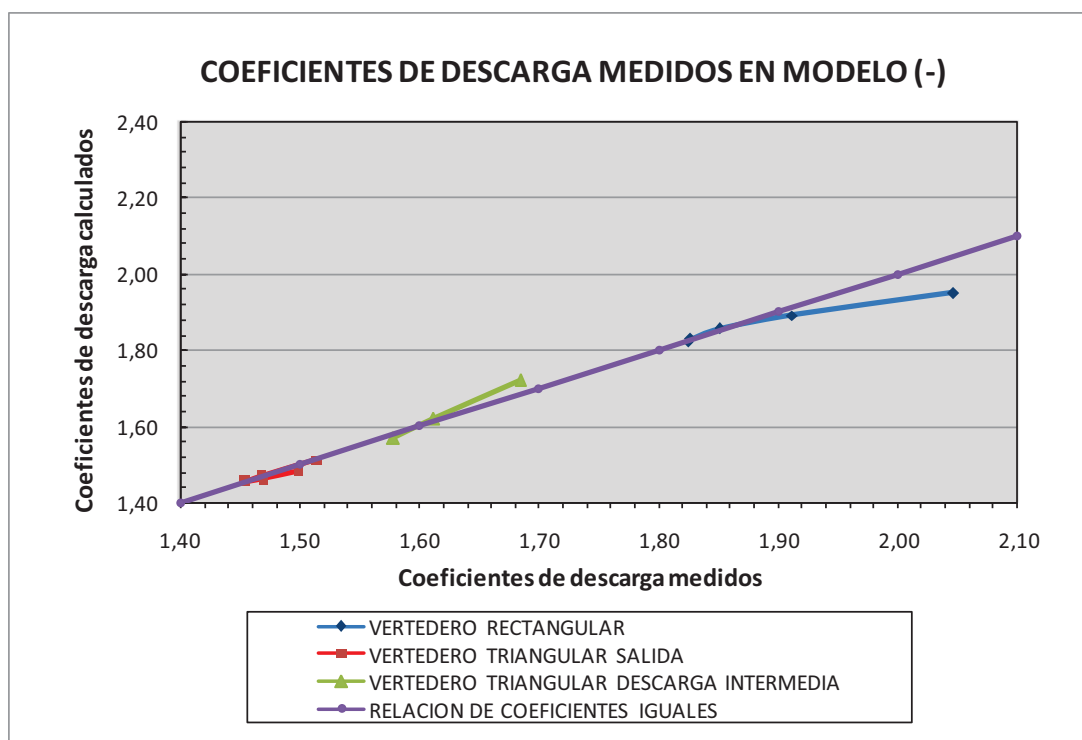


Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Si se compara los valores calculados de los coeficientes de descarga  $C$ , sobre la base de la recomendación en la literatura técnica, con los coeficientes  $C$  evaluados utilizando las mediciones de la carga y del caudal, respectivamente, se obtiene la siguiente Figura No. 11.

La diferencia que aparece para los valores  $C$  del vertedero rectangular corresponde al valor más pequeño de la carga y al valor más pequeño del caudal.

**Figura No. 11:** Comparación entre los coeficientes  $C$  de descarga medidos y calculados con los valores experimentales.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

#### **4.3.1 CURVAS DE DESCARGA DEL VERTEDERO DE PERFIL CREAGER EN EL INGRESO A LA DESCARGA INTERMEDIA**

##### *Base para el dimensionamiento del perfil Creager en el cimacio<sup>6</sup>*

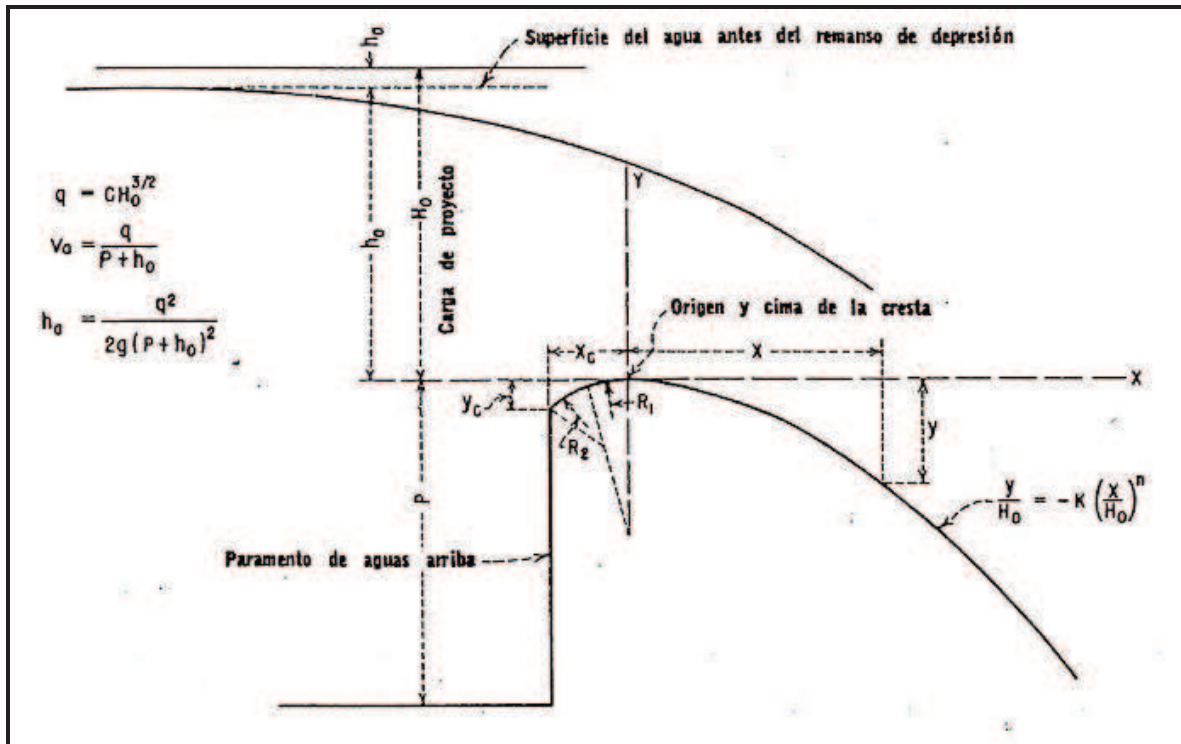
Los vertedores de cimacio tienen como configuración fundamental el perfil de la superficie inferior de una lámina de agua con ventilación, cayendo desde un vertedero de cresta delgada. El movimiento se considera plano, es decir el patrón de flujo permanece igual en todos los planos paralelos al eje central. Hacia aguas arriba se encuentra siempre flujo subcrítico gradualmente variado. Hacia aguas abajo se considera normalmente que el cimacio continúa con un ancho igual al de la cresta, sin la sección variable, de paredes convergentes, como es el dimensionamiento del cimacio del vertedero bajo estudio. La presencia de esta transición en la descarga del vertedero de cimacio y su incidencia en la estabilidad del flujo de salida es motivo de la investigación en el modelo.

La configuración del cimacio del vertedero similar a aquella de la lámina inferior de un flujo con descarga libre desde un vertedero de pared delgada, constituye una forma ideal para obtener la descarga óptima dada la carga o altura de agua sobre la cresta del vertedero. En el caso ideal, se desarrollaría sobre el contorno sólido una presión muy cercana a la atmosférica; con lo que se garantizaría el patrón de flujo óptimo. La forma de la superficie del cimacio en el vertedero depende de la carga (del caudal) de diseño, de la inclinación del paramento de aguas arriba del cuerpo principal del vertedor y de la altura desde el piso del canal de llegada, que influye en la velocidad de aproximación hacia la cresta.

---

<sup>6</sup>Diseño de Presas Pequeñas” U.S.B.R., US Bureau of Reclamation, Department of the Interior, Traducción Cia. Editorial Continental, S.A., Mexico, 1982. “Hidráulica de los canales abiertos”, Ven Te Chow, McGraw-Hill, 1982, México. “Hidráulica General”, Gilberto Sotelo, Ed. Limusa, 1999. México.

**Figura No. 12:** Definición de la geometría del cimacio en vertederos con la forma de la lámina vertical.



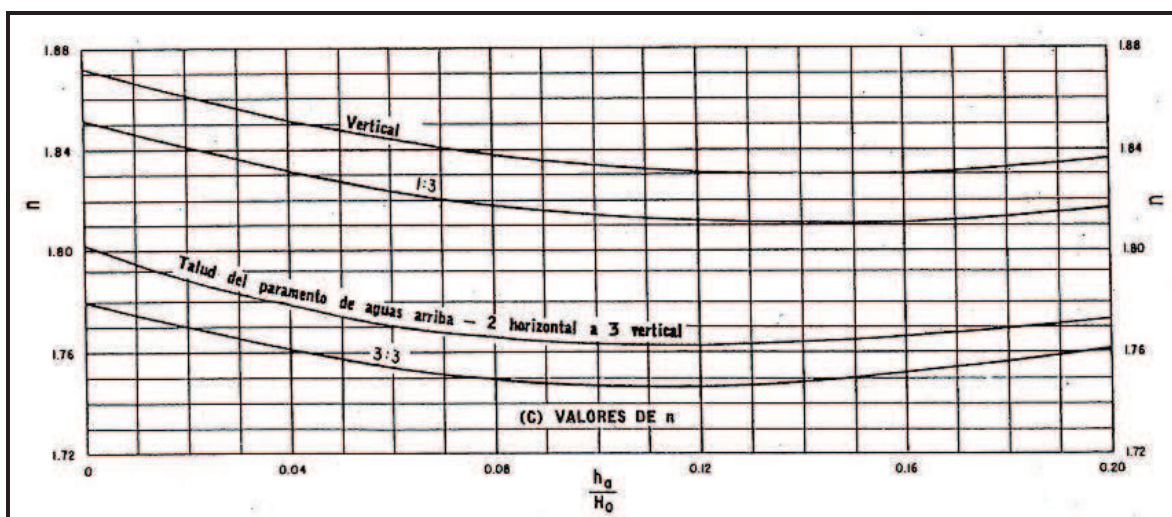
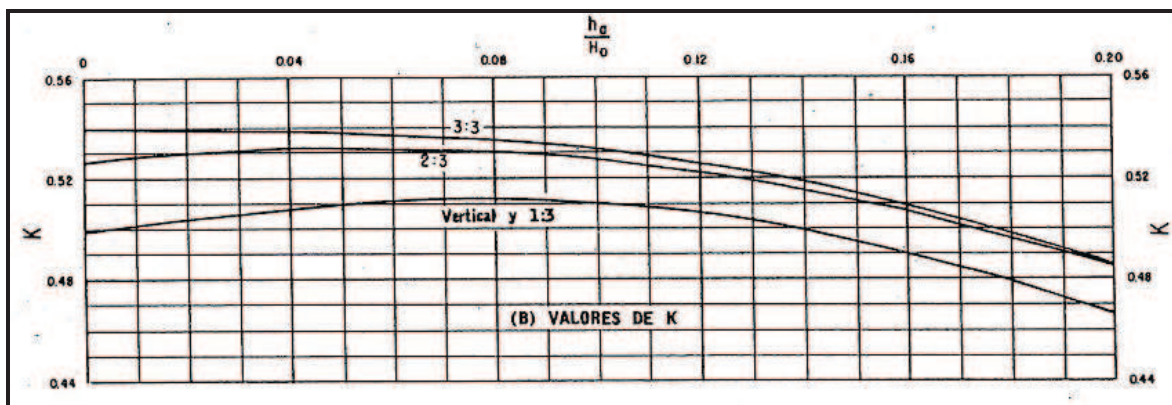
Fuente: Diseño de Presas Pequeñas. USBR. Bureau Of Reclamation.

La geometría del tramo de aguas abajo desde la cresta se define por la ecuación:

$$\frac{y}{H_0} = -K \left( \frac{x}{H_0} \right)^n$$

en la que  $K$  y  $n$  son constantes, cuyos valores dependen de la inclinación del paramento de aguas arriba y de la velocidad de llegada. La siguiente Figura No. 13 muestra los valores de estas constantes para diferentes condiciones de la relación  $h_a/H_0$

Figura No. 13: Factores para la determinación de la forma del cimacio



Fuente: Diseño de Presas Pequeñas. USBR. Bureau Of Reclamation.

El valor del caudal sobre una cresta de cimacio se obtiene por medio de la siguiente fórmula:

$$Q = C L H e^{3/2}$$

En la que:  $Q$  = Caudal o Descarga ( $m^3/s$ )

$C$  = Coeficiente de caudal, función de las relaciones  $P/H_0$  y  $h_a/H_0$  para la carga de diseño  $He$

$L$  = Longitud o ancho de la cresta

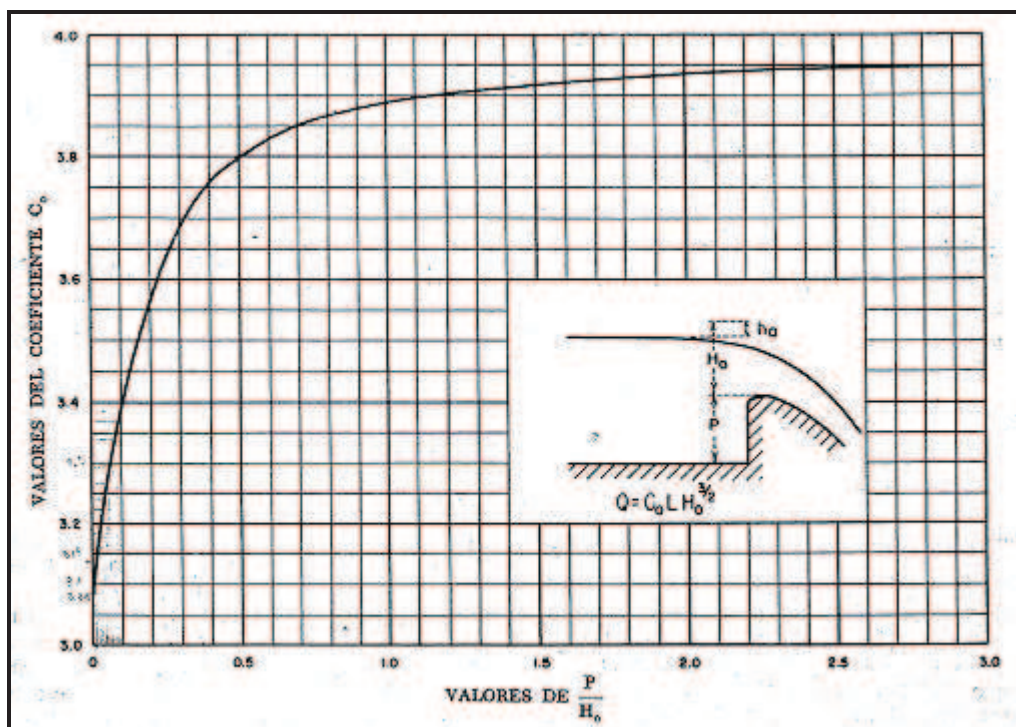


$H_e$  = Carga de energía total sobre la cresta, incluye la carga de velocidad,  $H_e = H_0 + h_a$ .

Para la definición del coeficiente C de caudal o de descarga, se toman en consideración algunos factores tales como:

- i. *Efecto de la profundidad de llegada*, varía con la relación  $P/H_0$
- ii. *Efecto de las cargas diferentes a la del proyecto*. El valor de C varía con la relación  $H_e/H_0$ ; si  $H_0$  es la carga de diseño con su correspondiente coeficiente de descarga igual a  $C_0$ . La relación  $C/C_0$  es igual a la unidad para el valor de  $H_e = H_0$  (es decir,  $P/H_0 > 3$ ;  $h_a/H_0 \approx 0$ ).
- iii. *Efecto del talud del paramento de aguas arriba*
- iv. *Efecto de la interferencia del flujo desde aguas abajo o del grado de sumergencia de la lámina vertiente*

**Figura No. 14:** Coeficiente  $C_0$  de descarga para el cimacio de pared vertical.



Fuente: Diseño de Presas Pequeñas. USBR. Bureau Of Reclamation.

En los planos entregados por el CGM para el diseño del modelo, se tiene que la geometría del cimacio del perfil a la entrada de la Descarga Intermedia tiene una geometría según la ecuación:

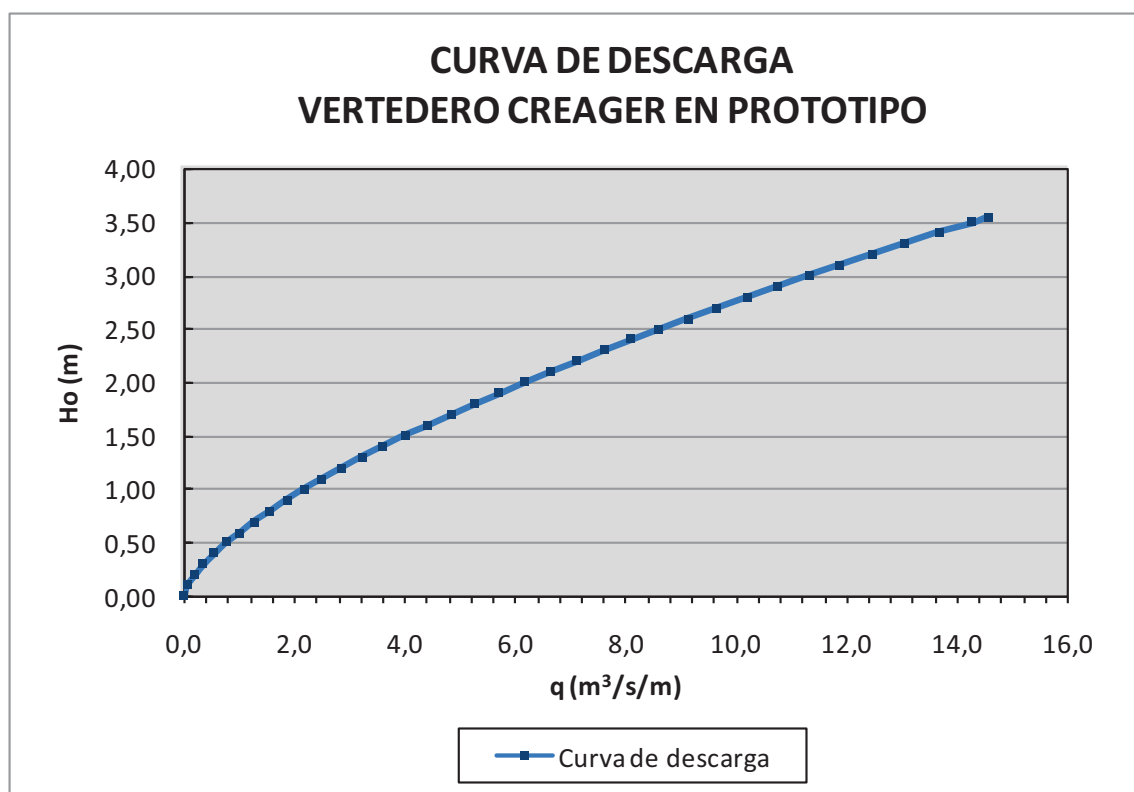
$$\frac{x}{3,55} = -0,55 \left( \frac{x}{3,55} \right)^{1,85}$$

Con los valores  $H_0 = 3,55$  m;  $K = 0,50$  y  $n = 1,85$ .

Si se asume que la carga de velocidad es despreciable en el flujo de aproximación al vertedero de la Descarga Intermedia,  $h_a \approx 0$ , los valores de  $K$  y  $n$  serían:  $K = 0,5$  y  $n = 1,872$ .

El coeficiente  $C_0$  de descarga, para un valor  $P/H_0 > 3$ , es igual a 3,95, en unidades inglesas. Este valor máximo del coeficiente  $C_0$ , en unidades del sistema internacional, es igual a 2,18. Para el valor de la altura del cimacio del vertedero igual a  $P = 18$  m se obtiene la siguiente curva de descarga, manteniendo el valor de  $C = 2,18$  constante y asumiendo que  $P/H_0 > 3$  y que  $h_a/H_0 \approx 0$ .

**Figura No. 15:** Curva de descarga con el caudal por unidad de ancho para el cimacio de pared vertical al inicio de la Descarga Intermedia



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara



**Cuadro No. 14:** Valores de la Curva de Descarga calculada para el vertedero de la sección al inicio de la Descarga Intermedia.

$H_0$ (m)	$P/H_0$	C	$q$ ( $m^3/s$ )	$Q$ ( $m^3/s$ )
0,1	180,00	2,18	0,069	0,965
0,2	90,00	2,18	0,195	2,730
0,3	60,00	2,18	0,358	5,015
0,4	45,00	2,18	0,552	7,721
0,5	36,00	2,18	0,771	10,790
0,6	30,00	2,18	1,013	14,841
1,0	18,00	2,18	2,180	30,520
1,5	12,00	2,18	4,005	56,069
2,0	9,00	2,18	6,166	86,324
2,5	7,20	2,18	8,617	120,641
3,0	6,00	2,18	11,328	158,587
3,4	5,29	2,18	13,667	191,339
3,5	5,14	2,18	14,274	199,842
3,55	5,07	2,18	14,581	204,140

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

En la Fase de Validación y Calibración del Modelo se realizaron seis mediciones de la carga sobre el vertedero Creager antes de la Descarga Intermedia y del caudal, respectivamente.

En el Cuadro No.15 se muestran los valores registrados de la carga sobre el vertedero (H) y del caudal (Q), junto con los valores calculados de los coeficientes C de descarga y las relaciones  $P/H_0$  y  $ha/H_0$ . Adicionalmente, se presenta en el Cuadro No.16 los valores del caudal y de la carga correspondiente, calculados para un valor C constante e igual a 2,18.

Tomando en consideración que se cumple  $P/H_0 > 5$  y  $ha/H_0 \approx 0$  en todos los casos, se presentan las Figuras No. 16 y No. 17 para representar las variaciones medidas del caudal en función de la carga sobre el vertedero y de los coeficientes de descarga C; comparando con los valores de la curva de descarga teórica, bajo la hipótesis de que C permanece constante y es igual a 2,18.

**Cuadro No. 15:** Valores de la Curva de Descarga, del coeficiente C de descarga y de las relaciones  $P/H_0$  y  $ha/H_0$  medidos en el modelo.

**DESCARGA INTERMEDIA: Curva de descarga medida en el laboratorio**

VALORES

MEDIDOS

P = 18 m

Q (m <sup>3</sup> /s)	H <sub>0</sub> (m)	C (-)	P/H <sub>0</sub>	Velocidad		Relación ha/H <sub>0</sub>
				(m/s)	(m)	
15,910	0,70	1,9	25,7	0,06	0,00	0,00
29,999	1,12	1,8	16,1	0,12	0,00	0,00
102,530	2,17	2,3	8,3	0,41	0,01	0,00
126,130	2,60	2,2	6,9	0,50	0,01	0,00
196,417	3,37	2,3	5,3	0,78	0,03	0,01
201,530	3,38	2,3	5,3	0,80	0,03	0,01

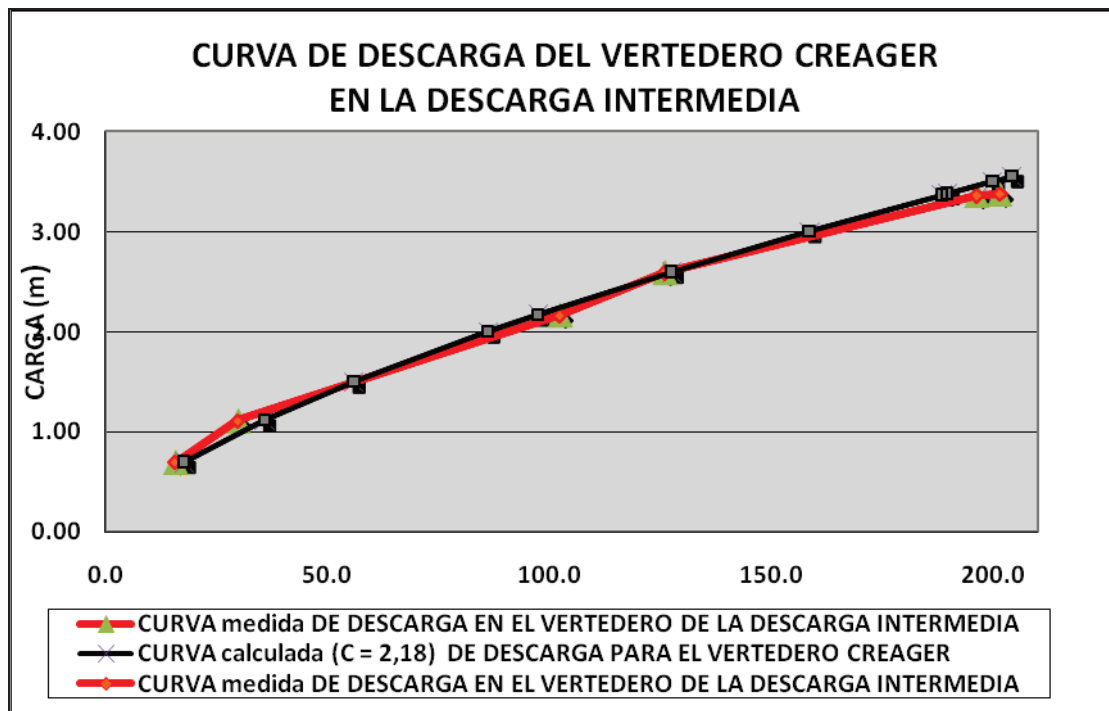
Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Cuadro No. 16:** Valores de la Curva de Descarga, calculada con el coeficiente C = 2,18 constante, para toda la gama de valores  $P/H_0 > 5$  y  $ha/H_0 \approx 0$ .

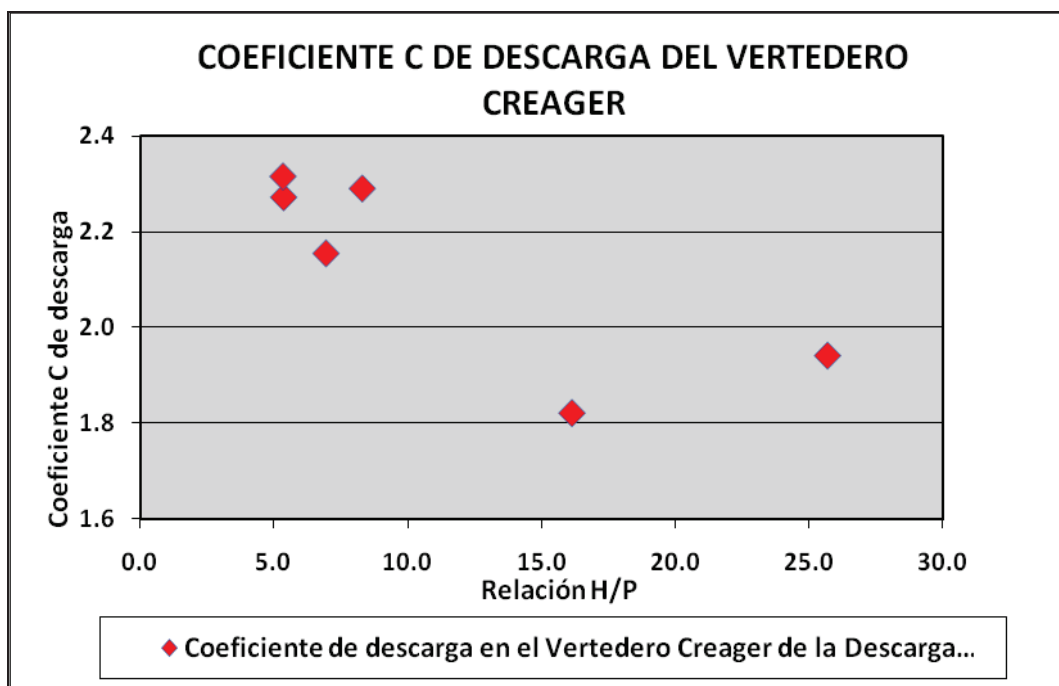
Q (m <sup>3</sup> /s)	H <sub>0</sub> (m)
17,87	0,70
35,93	1,12
56,07	1,50
86,32	2,00
97,56	2,17
127,58	2,60
158,59	3,00
189,65	3,38
188,39	3,37
199,84	3,50
204,14	3,55

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Figura No. 16:** Curva de descarga para el cimacio de pared vertical al inicio de la Descarga Intermedia (valores medidos y calculados con  $C = 2,18$ ).



**Figura No. 17:** Variación del coeficiente C de descarga con la relación  $P/H_0$  para el cimacio de pared vertical al inicio de la Descarga Intermedia.



Se toma en cuenta que el caudal de diseño del perfil es del orden de los 204,14 m<sup>3</sup>/s, para un valor de  $H_0 = 3,55$  m. Las mediciones en el modelo conducen, en cambio, a que la carga medida  $H_0 = 3,42$  m produciría igual valor del caudal  $Q = 204,14$  m<sup>3</sup>/s. La función correspondiente es igual a:  $H = 0,1332 * Q^{0,6104}$ . La diferencia entre el valor esperado y el calculado en la carga sobre el vertedero Creager, a la entrada de la Descarga Intermedia, es del orden del 3,7%.

#### 4.3.2 CURVA DE DESCARGA EN LA BOCATOMA DE INGRESO AL TÚNEL DE DESVÍO

En la Fase de Validación y Calibración del Modelo se realizaron seis mediciones de la carga sobre el umbral o azud en la zona de ingreso al Túnel de Desvío y del caudal, respectivamente. Se tiene como referencia la cota 1.326,00 msnm del punto más alto del umbral. En el Cuadro No. 17 se muestran los valores registrados de la carga sobre el umbral y del caudal, junto con los valores calculados de la cota de la superficie libre del agua en la zona inmediatamente antes de la entrada al Túnel de Desvío. Esta carga es medida sobre el cimacio del umbral. Adicionalmente, se presentan en el Cuadro No. 18 los valores del caudal y de la cota correspondiente, calculados con la ecuación polinómica de ajuste óptimo. De este modo, y por medio de esta relación, se puede extrapolar justificadamente la relación medida, y evaluar la cota requerida para que se evacúe el caudal máximo de 1.130 m<sup>3</sup>/s a lo largo del Túnel de Desvío.

**Cuadro No. 17:** Valores medidos del caudal y de la carga sobre el umbral de fondo y de la cota de la superficie libre del agua en la aproximación al túnel.

	<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>y (m)</b>	<b>COTA (msnm)</b>	
<i>Valores calibrados volumétricamente</i>	821,30	13,93	1.339,93	<i>Cota de Ref.: 1.326,00 msnm</i>
	810,50	13,76	1.339,76	
	786,70	13,75	1.339,75	
	498,50	7,60	1.333,60	
	244,00	3,48	1.329,48	
	65,40	1,25	1.327,25	

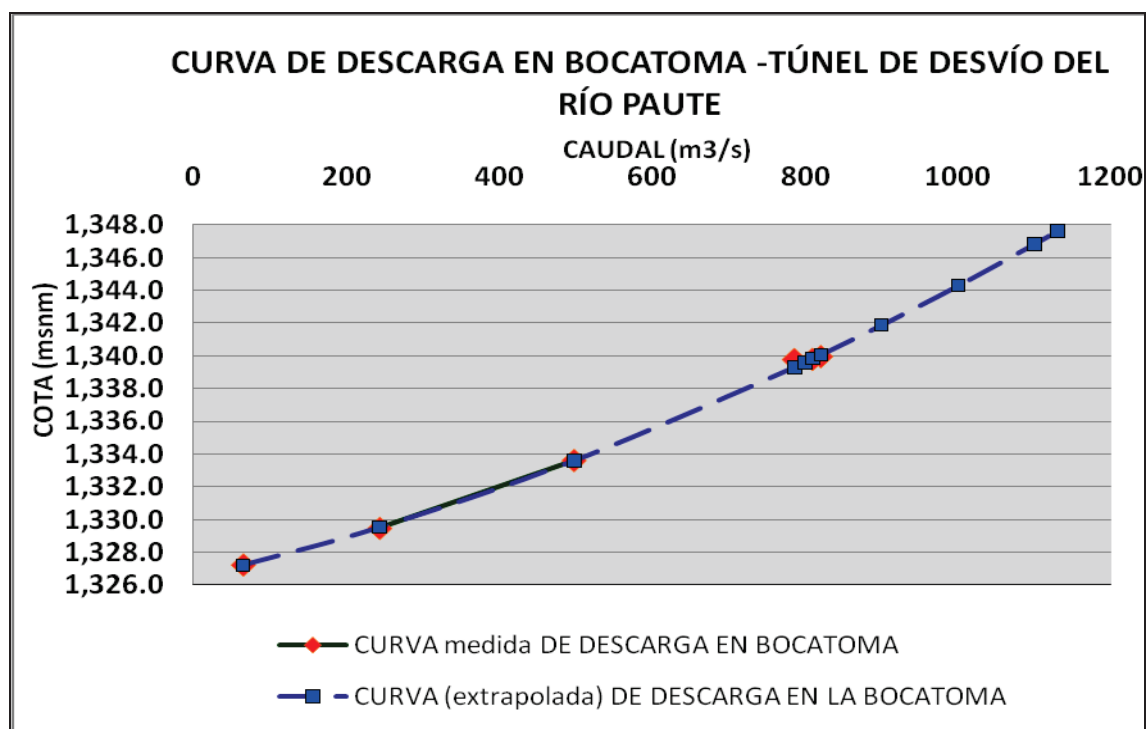
Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Cuadro No. 18:** Valores del Caudal y valores calculados de la carga sobre el umbral de fondo y de la cota de la superficie libre del agua en la aproximación al Túnel de Desvío.

$Q$ ( $m^3/s$ )	$y$ (m)	COTA (msnm)
65,40	1,22	1.327,22
244,00	3,53	1.329,53
498,50	7,60	1.333,60
786,70	13,31	1.339,31
800,00	13,60	1.339,60
810,50	13,83	1.339,83
821,30	14,07	1.340,07
900,00	15,87	1.341,87
1000,00	18,28	1.344,28
1100,00	20,83	1.346,83
1130,00	21,62	1.347,62

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Figura No. 18:** Curva de Descarga: Caudal ( $m^3/s$ ) vs. Cota a la Entrada del Túnel de Desvío (msnm) (valores medidos y calculados con ajuste polinómico).



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

El resultado más importante de esta serie de pruebas en el modelo físico es el hecho de que para el tránsito del caudal  $Q = 1.130 \text{ m}^3/\text{s}$  se requiere que la cota de la superficie libre, en la zona de aproximación hacia la bocatoma del Túnel de Desvío, se ubique en la cota 1.347,62 msnm; es decir, alrededor de 8 m por arriba del valor estimado en la fase del dimensionamiento hidráulico de las estructuras. Este valor es inaceptable por cuanto se requiere que el nivel máximo del agua no supere la elevación 1.342,00 msnm, para que se cumplan los postulados de funcionamiento de las obras de desvío.

#### **4.3.3 ANÁLISIS DEL FLUJO EN EL TÚNEL DE DESVÍO Y EN LA DESCARGA INTERMEDIA.**

El flujo a lo largo del Túnel de Desvío de la central hidroeléctrica Paute-Molino corresponde a un escurrimiento con superficie libre, en el que justificadamente se considera que las fuerzas de gravedad son dominantes. El modelo hidráulico que logra representar adecuadamente el perfil o desarrollo de la superficie libre, es aquel que opera bajo el criterio de similitud de Froude. El mantener este criterio vigente significa sin embargo que, en este tipo de modelos físicos, el número de Reynolds en modelo  $Re_m$  es siempre menor que aquél del prototipo,  $Re_p$ . Considerando la escala de longitudes adoptada para el modelo hidráulico del túnel de desvío de la Central Paute Molino, se tiene que, de acuerdo al criterio de la similitud de Froude, la escala de velocidades corresponde a la expresión:

$$V_r = (L_r)^{1/2} = 50^{1/2}$$

Donde:

$V_r$  = Escala de velocidades = Velocidad en prototipo/velocidad en modelo.

$L_r$  = Escala de longitudes = Longitud en prototipo/longitud en modelo.

La escala para los números de Reynolds en prototipo y modelo será:

$$Re_r = (L_r)^{3/2} = 50^{3/2}$$

Por lo tanto, en el modelo físico con escala de longitud reducida 1:50, se espera que el efecto relativo de las fuerzas viscosas sea relativamente mayor que el correspondiente efecto en el prototipo. Sin embargo, esto no tendrá una influencia importante dentro del análisis experimental, siempre que se garantice que, en el modelo, al igual que en el prototipo, el flujo se desarrolle dentro de la zona de flujo turbulento, en donde los efectos viscosos se minimizan, de tal manera que un cambio en el número de Reynolds no implica un cambio apreciable en el comportamiento hidráulico del flujo; de manera particular, en lo que se refiere a las pérdidas que están reflejadas en la pendiente de la línea de energía.<sup>7</sup>

Los valores del número de Reynolds esperados en el prototipo y obtenidos en el modelo, para el rango de caudales de operación, tanto en el Túnel de Desvío como en la Descarga Intermedia se resumen en los siguientes cuadros.

(a) Túnel de Desvío:

**Cuadro No. 19:** Valores del  $Re_m$  y  $Re_p$  para diferentes relaciones de llenado.

$Q$ ( $m^3/s$ )	$y/D$	$Re_m$	$Re_p$
65,41	0,13	8,30E+07	2,96E+10
65,41	0,17	4,13E+07	1,46E+10
243,95	0,27	1,30E+07	4,60E+09
243,95	0,32	7,99E+07	2,83E+09
498,51	0,41	4,28E+06	1,51E+09
498,51	0,52	2,28E+06	8,07E+08
786,66	0,53	2,19E+06	7,74E+08
786,66	0,72	9,60E+05	3,39E+08

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

<sup>7</sup> Informe Fase 1, Modelo Hidráulico de Túnel de Desvío de la Central Paute Molino

(b) Descarga Intermedia:

**Cuadro No. 20:** Valores del  $Re_m$  y  $Re_p$  para diferentes relaciones de llenado.

$Q$ ( $m^3/s$ )	$y/H$	$Re_m$	$Re_p$
15,91	0,04	2,79E+04	9,87E+06
15,91	0,06	2,70E+04	9,54E+06
102,53	0,13	1,53E+05	5,41E+07
102,53	0,15	1,49E+05	5,27E+07
201,53	0,25	2,55E+05	9,01E+07
201,53	0,29	2,40E+05	8,49E+07

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Se observa que el flujo en el prototipo alcanza valores del Número de Reynolds  $Re_p$  mayores a  $10^7$ , garantizando así que se desarrolla dentro del régimen turbulento; lo que además es una condición para la aplicación de la ecuación de Manning.

En el modelo, los valores alcanzados del parámetro adimensional  $Re$  son mayores a  $10^4$ , en la Descarga Intermedia y mayores a  $10^6$ , en el Túnel de Desvío.

En el modelo a escala reducida por lo tanto no es posible alcanzar el desarrollo del flujo con agua en la zona hidráulicamente rugosa. El efecto de las fuerzas viscosas, que no pueden ser representadas a escala, puede llegar a ser simulado entonces, mediante la selección de una adecuada rugosidad del modelo, de tal manera que aún para los menores valores del número de Reynolds en modelo, se alcance el mismo valor del coeficiente de fricción  $\lambda$  que en el prototipo. Considerando la relación:

$$\lambda = \frac{h_v}{L} \frac{8gr_{hy}}{V^2} = \left(\frac{h_v}{L}\right) \frac{8}{Fr^2}$$



Se tiene que, en el modelo con similitud de Froude ( $Fr_m = Fr_p$ ), la pendiente de la línea de energía ( $h_v/L$ ) en modelo y en prototipo serán iguales cuando el coeficiente de fricción  $\lambda$  sea el mismo en modelo y en prototipo.

El diseño hidráulico realizado para el Túnel de Desvío y la Descarga Intermedia adopta como rugosidad absoluta del hormigón el valor de 0,6 mm. Para lograr la compensación de los efectos combinados de la viscosidad y de la rugosidad en el modelo físico, se adopta el material más liso disponible, que corresponde al acrílico, cuya rugosidad absoluta es igual a 0,0015 mm.

En los siguientes cuadros se presentan la variación de los valores obtenidos para el coeficiente de fricción  $\lambda$  en modelo y su comparación con los respectivos valores de prototipo, para diferentes relaciones de llenado, los mismos que se observan también en las Figuras Nos. 19 y 20.

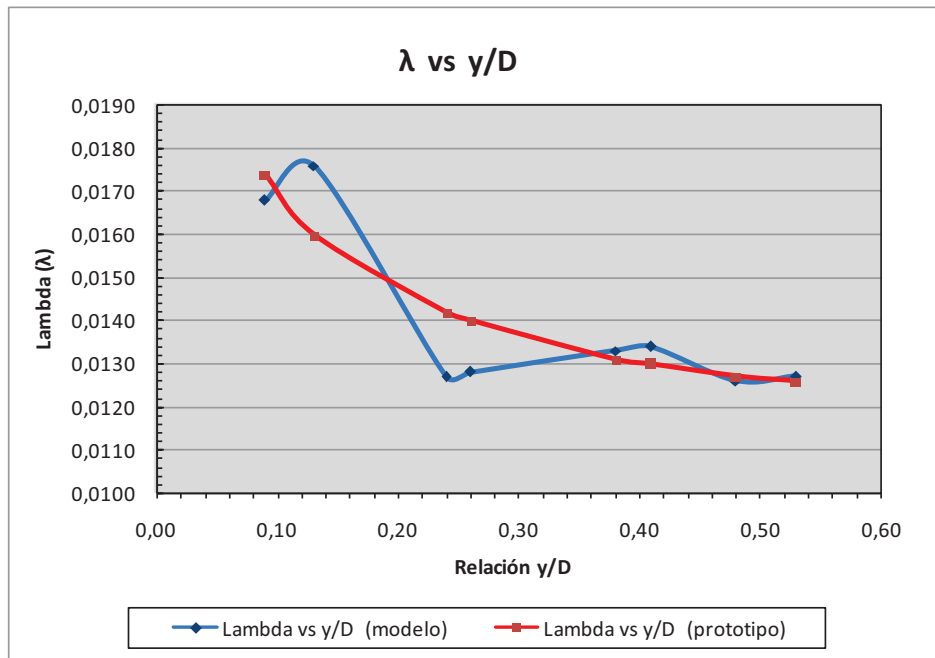
a) Túnel de Desvío:

**Cuadro No. 21:** Valores del coeficiente de fricción  $\lambda$  en modelo y prototipo

<b>CAUDAL</b> <b>(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>y/D</b>	<b><math>\lambda_{\text{modelo}}</math></b>	<b><math>\lambda_{\text{prototipo}}</math></b>	<b>Porcentaje</b> <b>de</b> <b>variación</b> <b>de <math>\lambda</math></b>
65,41	0,09	0,0168	0,0174	-3,57%
65,41	0,13	0,0176	0,0160	9,09%
243,95	0,24	0,0127	0,0142	-11,81%
243,95	0,26	0,0128	0,0140	-9,38%
498,51	0,38	0,0133	0,0131	1,50%
498,51	0,41	0,0134	0,0130	2,99%
786,66	0,48	0,0126	0,0127	-0,79%
786,66	0,53	0,0127	0,0126	0,79%

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Figura No. 19:** Variación del coeficiente de fricción  $\lambda$  con la relación de llenado en modelo y prototipo.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

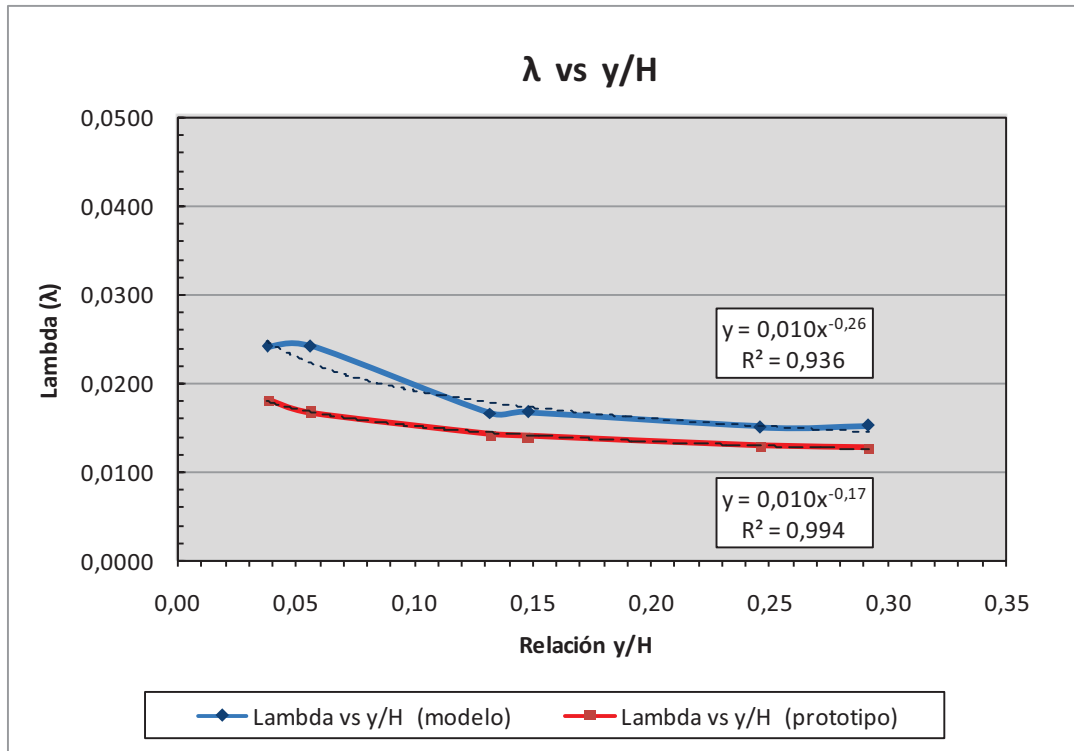
b) Descarga Intermedia:

**Cuadro No. 22:** Valores del coeficiente de fricción  $\lambda$  en modelo y prototipo

$Q$ ( $m^3/s$ )	$y/H$	$\lambda_{modelo}$	$\lambda_{prototipo}$	Porcentaje de variación de $\lambda$
15,91	0,04	0,0241	0,0182	24,7
15,91	0,06	0,0242	0,0167	31,0
102,53	0,13	0,0167	0,0143	14,6
102,53	0,15	0,0168	0,0140	16,5
201,53	0,25	0,0151	0,0130	13,9
201,53	0,29	0,0152	0,0127	16,6

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Figura No. 20:** Variación del coeficiente de fricción  $\lambda$  con la relación de llenado en modelo y prototipo.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Para los valores de llenado menores a 0,30 en el Túnel de Desvío, el coeficiente de fricción  $\lambda$  en el modelo difiere hasta en un 12% respecto del calculado para el prototipo, bajo las condiciones adoptadas de diseño. Dado que las diferencias porcentuales son positivas y negativas, se puede deducir que:

- (i) La diferencia se origina en la aproximación alcanzada en la medición de los valores de la profundidad de agua en el modelo, cuya incidencia es mayor mientras menor sea la profundidad de agua.
- (ii) El modelo presentará de todos modos un comportamiento más rugoso que el prototipo, dados los valores elevados del Reynolds en el prototipo. En consecuencia, la pendiente de la línea de energía en el modelo es mayor para los valores pequeños de la relación de llenado  $y/D$ .

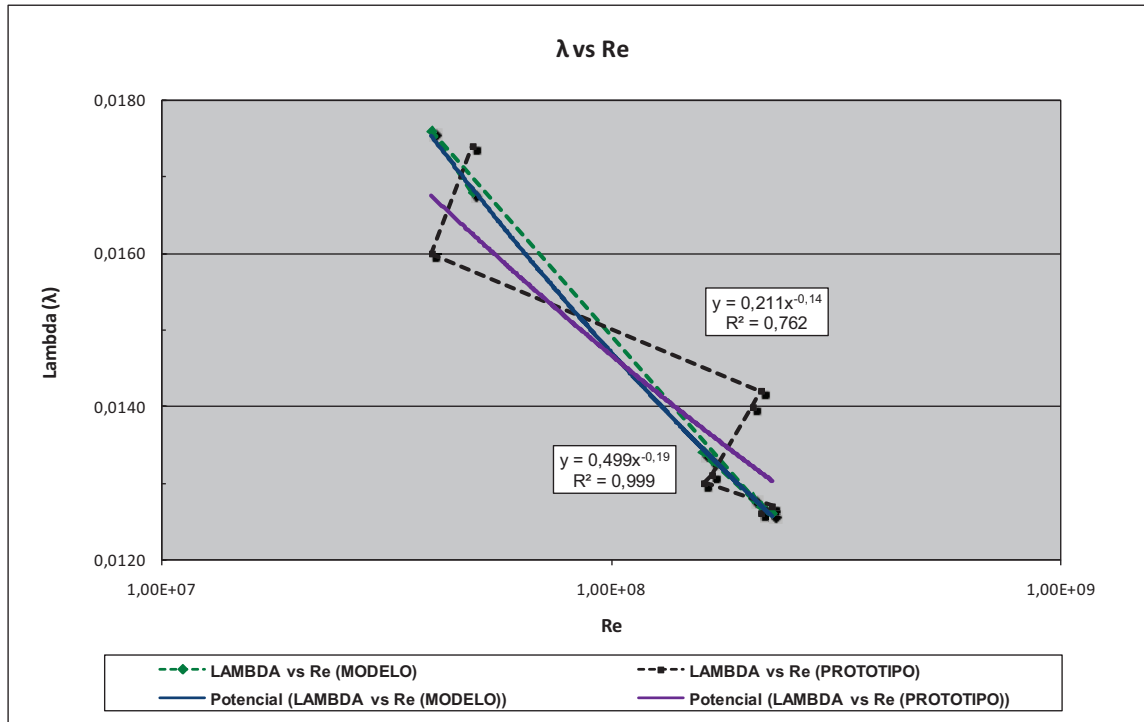
Para las relaciones de llenado mayores a 0,30, el valor del coeficiente  $\lambda$  del modelo es prácticamente igual a aquél calculado en el prototipo para el valor de rugosidad absoluta adoptada en el diseño original. En consecuencia, la representación de la pendiente de la línea de energía en el modelo físico, con la ayuda del modelo construido con un material liso como lo es el acrílico, es apropiada para su transposición a valores del prototipo.

En el caso del flujo en la Descarga Intermedia se observa que, para toda la gama de caudales de operación, el modelo presentará un comportamiento más rugoso que el esperado en el prototipo, siempre que se admita como válido el valor de la rugosidad absoluta adoptada para el hormigón en el diseño original. Los porcentajes de incremento en la pendiente de la línea de energía para la Descarga Intermedia son mayores que los observados en el túnel de desvío.

A continuación se presenta la variación de estos coeficientes de fricción  $\lambda$  en modelo y en prototipo con respecto a los valores del parámetro adimensional Reynolds en modelo, tanto para el Túnel de Desvío como para la Descarga Intermedia.

a) Túnel de Desvío:

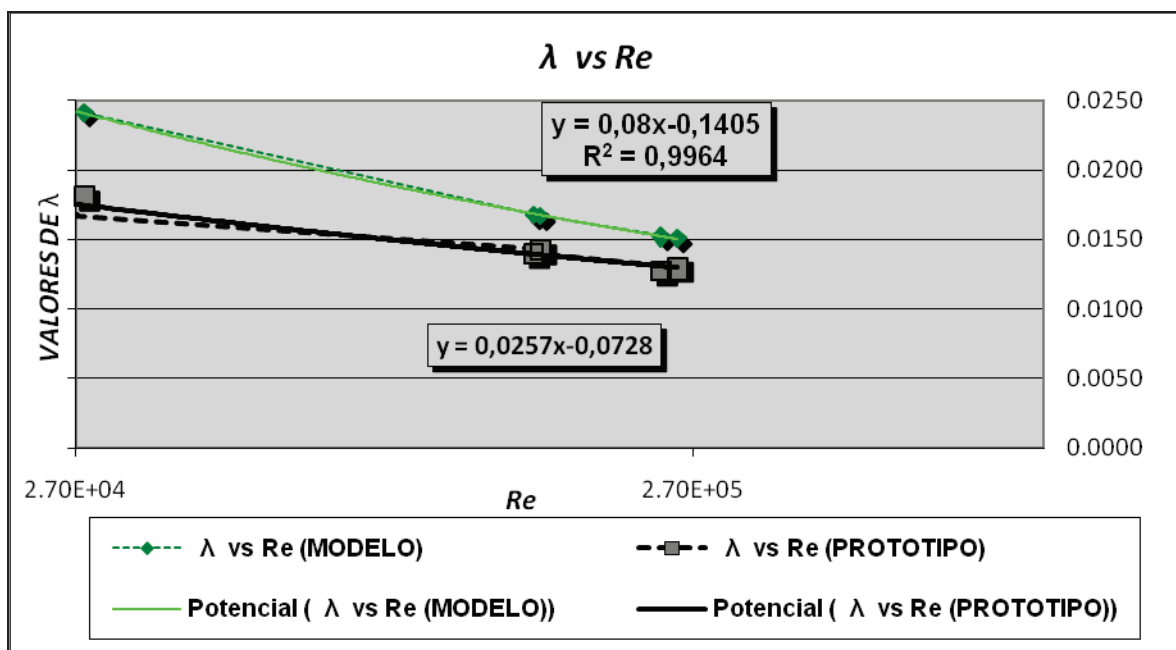
**Figura No. 21:** Variación del coeficiente de fricción  $\lambda$  con el número Reynolds en modelo y en prototipo.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

b) Descarga Intermedia:

**Figura No. 22:** Variación del coeficiente de fricción  $\lambda$  con el número Reynolds en modelo y en prototipo.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Las tendencias observadas en las figuras anteriores ratifican las observaciones anotadas con respecto al comportamiento más rugoso del modelo y al esperado en el prototipo, siempre que sea válido el valor de rugosidad absoluta adoptada en el diseño original.

Se concluye que los valores del coeficiente de fricción tanto en modelo,  $\lambda_m$ , como en prototipo,  $\lambda_p$ , no son constantes para toda la gama de caudales de operación. En el caso del Túnel de Desvío, con una geometría circular en la sección transversal, se observa que el valor de  $\lambda$  se incrementa con la disminución de la relación de llenado; en tanto que para la geometría tipo baúl del túnel de la Descarga Intermedia el valor de  $\lambda$  se reduce con el incremento de caudal.

Considerando el valor de rugosidad absoluta adoptada en el diseño original para el hormigón, tanto en el Túnel de Desvío como en la Descarga Intermedia, se

presenta a continuación los valores obtenidos para los coeficientes de rugosidad en la ecuación de Manning, aplicando la siguiente ecuación:

$$n = \frac{Rh^{1/3} \lambda}{\sqrt{8g}}$$

Donde:

$n$  = coeficiente de rugosidad en la ecuación de Manning

$Rh$  = radio hidráulico

$\lambda$  = coeficiente de fricción

$g$  = aceleración de la gravedad

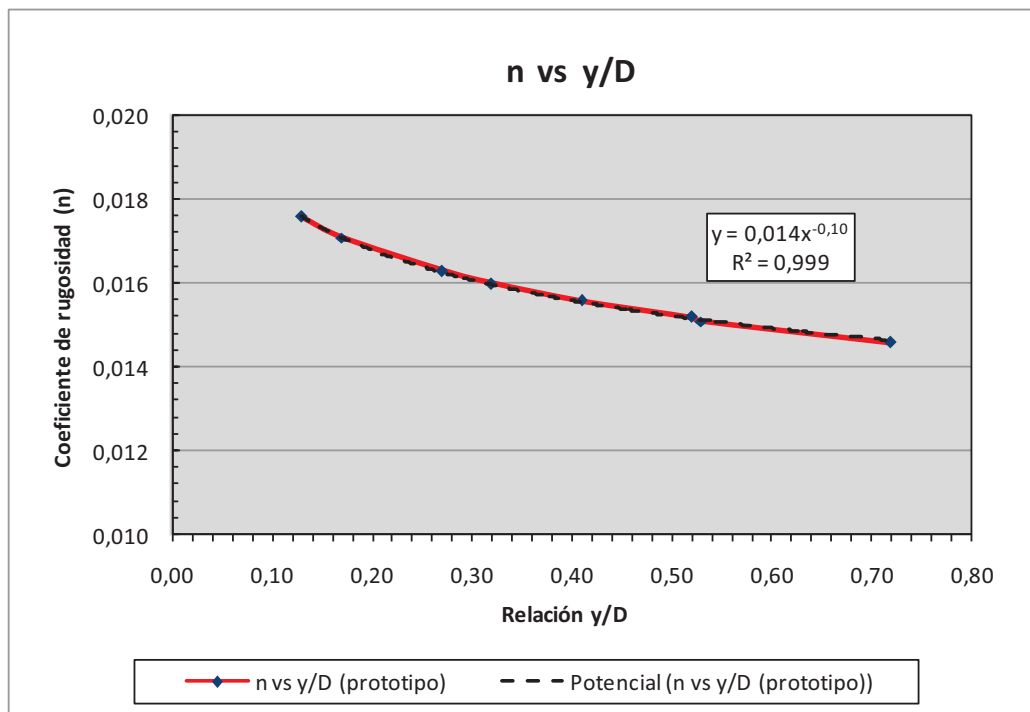
a) Túnel de Desvío:

**Cuadro No. 23:** Valores del coeficiente de rugosidad  $n$  en prototipo

CAUDAL ( $m^3/s$ )	$y/D$	$Re_p$	$n_p$
65,41	0,13	2,96E+10	0,0176
65,41	0,17	1,46E+10	0,0171
243,95	0,27	4,60E+09	0,0163
243,95	0,32	2,83E+09	0,0160
498,51	0,41	1,51E+09	0,0156
498,51	0,52	8,07E+08	0,0152
786,66	0,53	7,74E+08	0,0151
786,66	0,72	3,39E+08	0,0146

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Figura No. 23:** Variación del coeficiente de rugosidad  $n$  con la relación de llenado en prototipo.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Los resultados obtenidos muestran que el valor del coeficiente de rugosidad  $n$  de la ecuación de Manning no es un valor constante para la gama de caudales de operación. En el Túnel de Desvío, cuya sección transversal es circular y opera parcialmente llena, se observa que el valor del coeficiente de rugosidad  $n$  crece con el incremento del caudal o de la relación de llenado. Los valores obtenidos son, en todos los casos, muy cercanos al valor constante 0,014 adoptado en el diseño original. Para los caudales altos, mayores a  $700 \text{ m}^3/\text{s}$ , se tiene un valor igual a 0,0145, que corresponde a un incremento aproximado del 5% con respecto al valor adoptado en el diseño. En cambio para los caudales bajos, menores a  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , el valor de  $n$  obtenido es igual a 0,0135, es decir un 5% menor que el valor constante de  $n$  adoptado en el diseño.



#### 4.4 CONCLUSIONES

- ❖ Para esta investigación, los coeficientes de fricción  $\lambda$  son similares tanto en modelo y en prototipo, garantizando la condición principal para la calibración del modelo, en el caso del Túnel de Desvío la variación es de hasta un 12% respecto del calculado para el prototipo.
- ❖ Comparando el valor esperado y el calculado de la carga sobre el vertedero Creager a la entrada de la Descarga Intermedia la diferencia es de aproximadamente 3,7 %.
- ❖ Para el tránsito del caudal  $Q = 1.130 \text{ m}^3/\text{s}$  la cota de la superficie libre, en la zona de aproximación hacia la bocatoma del Túnel de Desvío, debe ubicarse en la cota 1.347,62 msnm; es decir, aproximadamente de 8 m por arriba del valor estimado en la fase del dimensionamiento hidráulico de las estructuras. Este valor es inaceptable por cuanto se requiere que el nivel máximo del agua no supere la elevación 1.342,00 msnm.
- ❖ Se observa que el flujo en el prototipo alcanza valores del Número de Reynolds  $Re_p$  mayores a  $10^7$ , garantizando así que se desarrolla dentro del régimen turbulento. En el modelo los valores del parámetro adimensional Reynolds son mayores a  $10^4$  en la Descarga Intermedia y mayores a  $10^6$  en el Túnel de Desvío.
- ❖ Los valores del coeficiente de fricción tanto en modelo,  $\lambda_m$ , como en prototipo,  $\lambda_p$ , no son constantes para toda la gama de caudales de operación. En el caso del Túnel de Desvío, con una geometría circular de la sección transversal, se observa que el valor de  $\lambda$  se incrementa con la disminución de la relación de llenado; en tanto que para la geometría tipo baúl del túnel de la descarga intermedia el valor de  $\lambda$  se reduce con el incremento de caudal.

- ❖ El rango de variación de los valores del coeficiente de fricción  $\lambda$  entre modelo y prototipo, es de -3,60 a 9,10% para un caudal de aproximadamente  $70 \text{ m}^3/\text{s}$ . Mientras que el rango de variación de  $\lambda$  entre modelo y prototipo es de -0,80 a 0,80% para un caudal de aproximadamente  $800 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## **CAPÍTULO 5**

### **ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL**

#### **5.1 OBJETIVOS DE LAS PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL**

Se realizaron pruebas con la geometría de las estructuras para una serie de cinco caudales previamente definida. Esta serie incluye por lo menos la combinación del caudal que transitará por el Túnel de Desvío más el caudal máximo con el que trabajará la Descarga Intermedia. Para esta variante, denominada "diseño original" el programa mínimo tentativo de pruebas debe analizar el funcionamiento de las obras.

Mediante esta serie de pruebas o ensayos en el modelo se podrá definir el funcionamiento y eficiencia del diseño geométrico propuesto, en relación con los patrones de flujo en la zona de acercamiento a la derivación y a lo largo de las obras, investigando los problemas de funcionamiento que podrían presentarse en la estructura de entrada, el empate con la Descarga Intermedia, en los cambios de dirección de los túneles. Estas pruebas permitirán medir calados o profundidades de agua, obtener valores de las velocidades medias, aguas arriba y aguas abajo de diferentes secciones, para control sobre la garantía de la similitud del modelo, registro fotográfico del patrón de flujo, determinación del índice de cavitación del flujo y de la necesidad de aireación en el modelo.

#### **5.2 PLAN DEFINITIVO DE PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL FASES 1 Y 2.**

En la investigación se propuso el siguiente Plan de Pruebas con el objeto de conseguir los objetivos técnicos señalados para la Fase de Ensayos con el Diseño Original:

**Cuadro No. 24:** Plan de Pruebas propuesto para la Fase de ensayos con el Diseño Original

Proyecto: MODELO HIDRÁULICO SOPLADORA II (Túnel de Desvío)

**PRUEBAS PARA LA FASE DE ANÁLISIS DEL DISEÑO ORIGINAL**

PRUEBA No.	TÚNEL DE DESVÍO		DESCARGA INTERMEDIA		CAUDAL TOTAL		OBSERVACIONES
	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal modelo (l/s)	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal modelo (l/s)	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal modelo (l/s)	
1	100	5,7			100	5,7	Se obtienen los perfiles de flujo en el modelo físico.
2	200	11,3			200	11,3	
3	500	28,3			500	28,3	
4	1.130	63,9			1.130	63,9	
5			25	1,4	25	1,4	Se obtienen los perfiles de flujo en el modelo físico.
6			100	5,7	100	5,7	
7			200	11,3	200	11,3	
8	50 - 1.130	2,8 - 63,9			50 - 1.130	2,8 - 63,9	Se obtienen cinco puntos para la curva de descarga en la sección de entrada al Túnel de Desvío.
9			25 - 200	1,4 - 11,3	25 - 200	1,4 - 11,3	Se obtienen cinco puntos para la curva de descarga del vertedero de ingreso a la Descarga Intermedia.
10	200	11,3	25	1,4	225	12,7	Se obtiene el registro fotográfico del perfil de flujo en la zona de confluencia del Túnel de Desvío y Descarga Intermedia.
11	200	11,3	200	11,3	400	22,6	
12	1.130	63,9	200	11,3	1.330	75,2	

Fuente: Informe de Fase I, Modelo Hidráulico del Túnel de Desvío de la Central Paute Molino.

### **5.3 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EN LAS PRUEBAS DEL MODELO FÍSICO.- FASE I Y II DE LA INVESTIGACIÓN.**

#### **5.3.1 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EN LAS PRUEBAS DEL MODELO FÍSICO.- FASE I DE LA INVESTIGACIÓN.**

##### **5.3.1.1 Curva de Descarga en la Bocatoma de ingreso al Túnel de Desvío.**

En la Fase de Ensayo con el Diseño Original del Modelo se realizaron varias mediciones adicionales de la carga sobre el umbral o azud en la zona de ingreso al Túnel de Desvío y del caudal, respectivamente. Se tiene como referencia la cota del punto más alto del umbral igual a la cota 1.326,00 msnm. En el Cuadro No. 25 se presentan los valores registrados de la carga sobre el umbral y del caudal, junto con los valores calculados de la cota de la superficie libre del agua en la zona inmediatamente antes de la entrada al Túnel de Desvío. Esta cota es medida sobre el cimacio del umbral. Adicionalmente, se presentan en el Cuadro No. 26 los valores del caudal y de la cota correspondiente, calculados con la ecuación potencial de ajuste óptimo. De este modo, y por medio de esta relación, se puede extrapolar justificadamente la relación medida, y evaluar la cota requerida para que se evacúe el caudal máximo a lo largo del Túnel de Desvío, igual a  $1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Cuadro No. 25:** Valores medidos del caudal, de la carga sobre el umbral de fondo y de la cota de la superficie libre del agua en la aproximación al túnel.

<b>Q</b> <b>(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>y</b> <b>(m)</b>	<b>COTA</b> <b>(calculada)</b> <b>(msnm)</b>
1.130,00	18,66	1.344,66
1.000,00	16,24	1.342,24
997,02	16,19	1.342,19
943,99	15,22	1.341,22
898,03	14,38	1.340,38
821,30	13,00	1.339,00
810,50	12,80	1.338,80
786,70	12,38	1.338,38
498,51	7,38	1.333,38
498,50	7,38	1.333,38
243,95	3,29	1.329,29
199,76	2,62	1.328,62
197,99	2,59	1.328,59
104,30	1,26	1.327,26
65,40	0,74	1.326,74
51,27	0,56	1.326,56
0,00	0,00	1.326,00

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

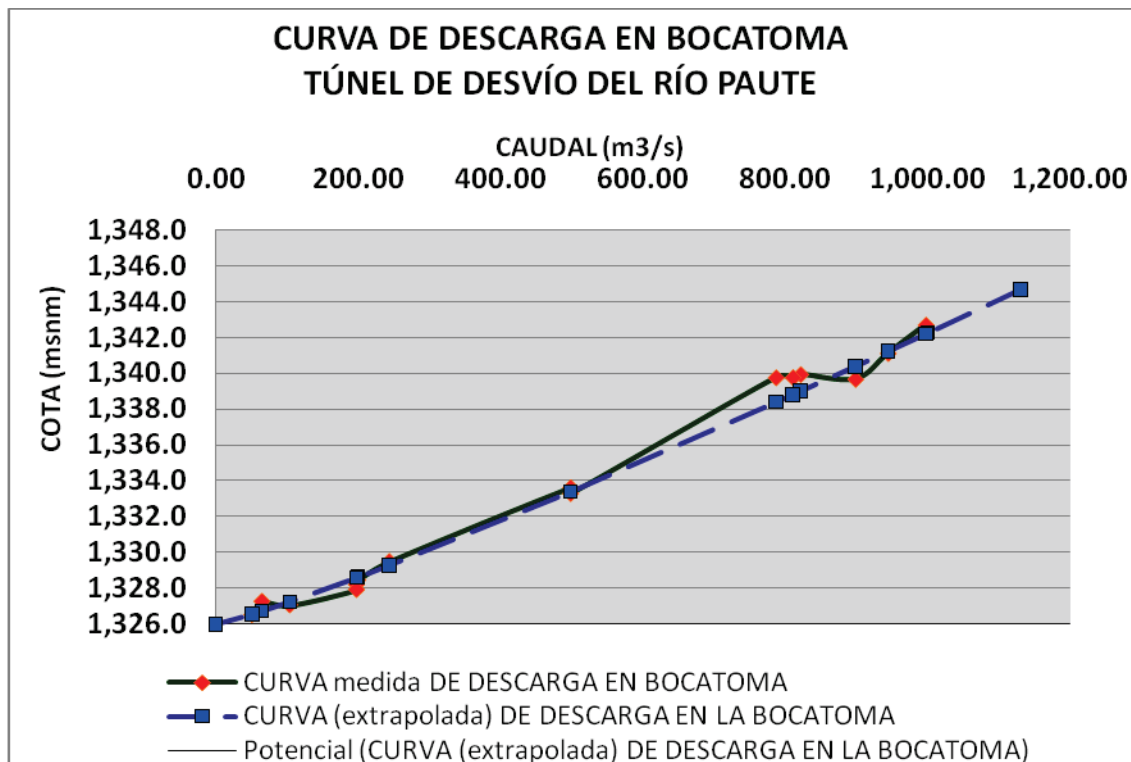
**Cuadro No. 26:** Valores del caudal y valores calculados de la carga Y sobre el umbral de fondo y de la cota de la superficie libre del agua en la aproximación al Túnel de Desvío.

**CURVA DE DESCARGA BOCATOMA DEL  
TÚNEL DE DESVÍO**

<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>y (m)</b>	<b>COTA (msnm)</b>
<i>Valores calibrados volumétricamente</i>		<i>Ref.: 1.326,00 msnm</i>
997,02	16,69	1.342,69
943,99	15,11	1.341,11
898,03	13,66	1.339,66
821,30	13,93	1.339,93
810,50	13,76	1.339,76
786,70	13,75	1.339,75
498,51	7,28	1.333,28
498,50	7,60	1.333,60
243,95	3,48	1.329,48
199,76	2,44	1.328,44
197,99	2,19	1.328,19
197,99	1,91	1.327,91
104,30	1,05	1.327,05
65,40	1,25	1.327,25
51,27	0,51	1.326,51

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

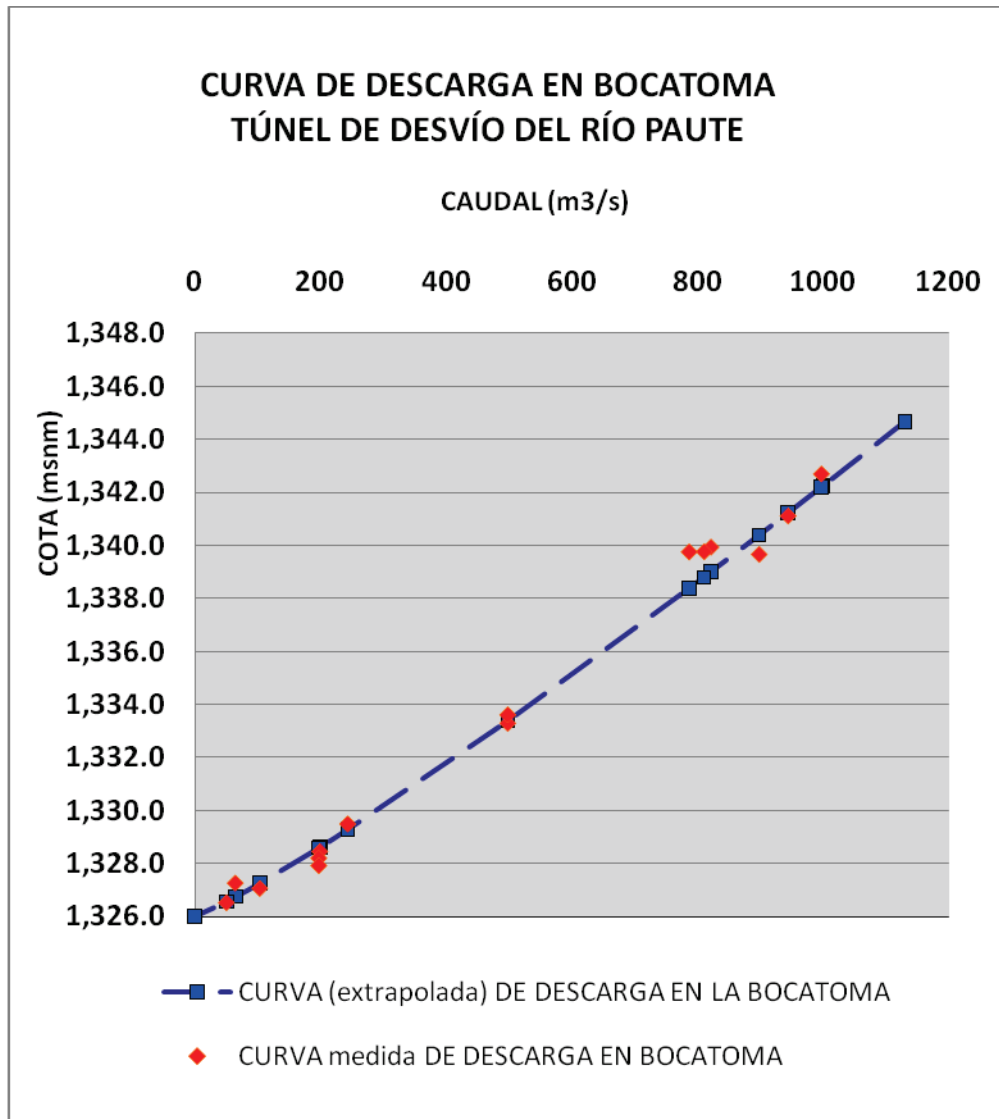
**Figura No. 24:** Curva de Descarga: Caudal vs. Altura de agua sobre el cimacio del umbral de fondo a la entrada del Túnel de Desvío (valores medidos y calculados con ajuste de curva potencial).



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara



**Figura No. 25:** Curva de Descarga: Caudal vs. Cota de la superficie libre del agua sobre el umbral de fondo a la entrada del Túnel de Desvío (valores medidos y calculados con ajuste de curva potencial).



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

El funcionamiento de la estructura de entrada para el rango de caudales se observa en el Anexo No. 2A y en las siguientes fotografías.

**Fotografía No. 22:** Flujo en la estructura de entrada. Se observa el efecto del estribo derecho, que genera un flujo asimétrico. El flujo inicia sumergencia de la boca de entrada del túnel con un  $Q_{TD} = 498,51 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Fotografía No. 23:** Flujo en la estructura de entrada. Se observa el nivel del flujo de aproximación para  $Q_{TD} = 940,50 \text{ m}^3/\text{s}$



Uno de los resultados más importante de esta serie de pruebas en el modelo físico es el hecho de que, para el tránsito del caudal  $Q = 1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ , la cota en la zona de aproximación a la bocatoma del Túnel de Desvío está ubicada en 1.344,66 msnm; es decir, alrededor de 5 m por arriba del valor estimado en la fase del dimensionamiento hidráulico de las estructuras. Este valor difiere en 3 m de aquél obtenido en la fase de validación del modelo, dado que el ajuste por medio de una curva polinómica es mejor para los valores más altos de caudal y que se pudieron registrar en esta fase.

### **5.3.1.2 Análisis del flujo en el Túnel de Desvío. Fase I**

#### *5.3.1.2.1 Profundidades a lo largo del Túnel de Desvío Fase I*

Según al Plan de Pruebas planteado para el análisis del flujo con el diseño original se realizaron las mediciones de los perfiles a lo largo del Túnel de Desvío para una gama de caudales de operación considerada como representativa de la operación prevista en el diseño.

El caudal que ingresa al Túnel de Desvío, considerando la cota máxima admisible prevista en el diseño original para el flujo de aproximación hacia la estructura de entrada alcanza un valor de  $940,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Este valor corresponde aproximadamente al 83% del caudal de diseño definido igual a los  $1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La gama de caudales de operación representativos en el Túnel de Desvío, adoptada en la modelación física para el análisis del comportamiento hidráulico con el diseño original es la siguiente:

- Caudal bajo:  $104,30 \text{ m}^3/\text{s}$
- Caudal medio:  $498,51 \text{ m}^3/\text{s}$
- Caudal alto:  $940,50 \text{ m}^3/\text{s}$

Considerando que la sección transversal de inicio del Túnel de Desvío con diámetro de 9,20 m corresponde a la abscisa 0+00, se han definido nueve secciones de medición, que se ubican en el Plano No. 3-M del Anexo No. 1 y corresponden a las siguientes abscisas:

**Cuadro No. 27:** Ubicación de las secciones transversales de medida en el Túnel de Desvío

<b>Sección transversal de medición</b>	<b>Abscisa medida (m)</b>	<b>Observaciones</b>
TD - 1	172,35	En la curva vertical, al final del tramo con pendiente longitudinal $I_0 = 18 \%$
TD - 2	324,85	Tramo recto de aproximación hacia la primera curvatura en planta $I_0 = 2 \%$
TD - 3	462,35	Tramo recto de aproximación hacia la primera curvatura en planta $I_0 = 2 \%$
TD - 4	609,55	En la primera curvatura en planta $I_0 = 2 \%$
TD - 5	678,05	En la primera curvatura en planta $I_0 = 2 \%$
TD - 6	830,60	Tramo recto de aproximación hacia la estructura de unión con la descarga intermedia $I_0 = 2 \%$
TD - 7	919,50	Tramo recto inmediatamente aguas abajo la estructura de unión con la descarga intermedia $I_0 = 2 \%$
TD - 8	1044,95	En la segunda curvatura en planta $I_0 = 2 \%$
TD - 9	1112,40	Tramo recto de aproximación hacia la estructura de disipación de energía. $I_0 = 2 \%$

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Las secciones de medición se ubican dentro del desarrollo del tramo con 2% de pendiente, por ser en este tramo en el que se esperan las mayores profundidades de flujo.

El flujo en el tramo inmediato, aguas abajo de la estructura de entrada, se desarrolla libre con la pendiente del 18%. La superficie del agua aparece estable y las ondas o perturbaciones que se generan por la geometría de la estructura de

entrada rápidamente desaparecen, de tal manera que luego de la transición se observa un flujo rápido, uniformemente distribuido que llega a la primera curva vertical con un calado contraído, menor que la profundidad normal calculada para la pendiente del 2%. Los valores de los calados medidos en la curva vertical se presentan en el siguiente Cuadro No. 28.

**Cuadro No. 28:** Valores de los calados o profundidades de agua

<i>Caudal medido (m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>Profundidad medida en la curva vertical (m)</i>	<i>Profundidad normal calculada para I<sub>0</sub> = 2% (m)</i>
940,50	4,8	6,64
498,51	3,2	4,50
104,30	1,1	2,06

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

A lo largo del Túnel de Desvío se espera el desarrollo de un perfil creciente que tiende a llegar al valor de la profundidad normal.

Para evaluar los coeficientes de fricción  $\lambda$ , se utilizan las relaciones derivadas para tubería de contorno liso, en el caso del modelo, y para conductos hidráulicamente rugosos, en el caso del prototipo, con flujo a sección parcialmente llena.

Tubería lisa (modelo): 
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \text{Log}_{10} (Re * \sqrt{\lambda}) - 0.80$$

Tubería rugosa (prototipo): 
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \text{Log}_{10} (2 * R/\varepsilon) + 1.14$$

En el caso de que el flujo esté en el régimen en transición, se tendrá:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \text{Log}_{10} \left( 2 * R/\varepsilon + \frac{18.7}{(Re * \sqrt{\lambda})} \right)$$

Los resultados obtenidos se presentan en los siguientes cuadros y su representación gráfica en las siguientes figuras.

**Cuadro No. 29 (a):** Resultado de las mediciones experimentales para el Túnel de Desvío.

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 2: TUNEL DE DESVIO</b>									
Caudal TD (m <sup>3</sup> /s)=		104,30							
Diámetro 1 (m)=		9,20							
Diámetro 2 (m)=		9,00							
Rugosidad absoluta (mm)=		0,60							
<b>Pto. medida</b>	<b><math>y</math> medido (m)</b>	<b><math>y/D</math></b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\lambda</math> prototipo</b>	<b><math>n</math> calculado</b>	<b><math>Fr</math> prototipo</b>	
TD-1	1,08	0,12	24,12	6,55E+07	2,21E-04	0,0162	0,0135	8,96	
TD-2	1,13	0,13	22,72	6,41E+07	2,13E-04	0,0161	0,0135	8,26	
TD-3	1,59	0,18	13,73	5,34E+07	1,54E-04	0,0150	0,0138	4,17	
TD-4	1,80	0,20	11,51	5,00E+07	1,38E-04	0,0147	0,0139	3,28	
TD-5	1,76	0,20	11,87	5,06E+07	1,41E-04	0,0147	0,0138	3,42	
TD-6	1,78	0,20	11,75	5,04E+07	1,40E-04	0,0147	0,0138	3,37	
TD-7	1,90	0,21	10,70	4,86E+07	1,32E-04	0,0145	0,0139	2,96	
TD-8	2,12	0,24	9,14	4,58E+07	1,20E-04	0,0142	0,0140	2,39	
TD-9	2,02	0,22	9,77	4,70E+07	1,25E-04	0,0144	0,0139	2,62	
n PROMEDIO EN TUNEL:							0,0138		

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Cuadro No. 29 (b):** Resultado de las mediciones experimentales para el Túnel de Desvío.

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>										
<b>PRUEBA No. 4: TUNEL DE DESVIO</b>										
Caudal TD (m <sup>3</sup> /s)=	498,51									
Diámetro 1 (m)=	9,20									
Diámetro 2 (m)=	9,00									
Rugosidad absoluta (mm)=	0,60									
<b>Pto. medida</b>	<b>y<sub>medido</sub> (m)</b>	<b>y/D</b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b>λ<sub>prototipo</sub></b>	<b>n<sub>calculado</sub></b>	<b>Fr<sub>prototipo</sub></b>		
TD-1	3,23	0,36	24,33	1,73E+08	8,46E-05	0,0133	0,0143	8,96		
TD-2	3,37	0,37	22,92	1,68E+08	8,18E-05	0,0132	0,0143	8,26		
TD-3	3,55	0,39	21,35	1,63E+08	7,86E-05	0,0131	0,0144	4,17		
TD-4	3,81	0,42	19,47	1,56E+08	7,47E-05	0,0129	0,0144	3,28		
TD-5	3,84	0,43	19,25	1,56E+08	7,42E-05	0,0129	0,0145	3,42		
TD-6	4,00	0,44	18,25	1,52E+08	7,21E-05	0,0128	0,0145	3,37		
TD-7	4,60	0,51	15,24	1,39E+08	6,57E-05	0,0126	0,0145	2,96		
TD-8	4,52	0,50	15,59	1,41E+08	6,65E-05	0,0126	0,0145	2,39		
TD-9	4,29	0,48	16,67	1,45E+08	6,88E-05	0,0127	0,0145	2,62		
n PROMEDIO EN TUNEL:							0,0144			

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

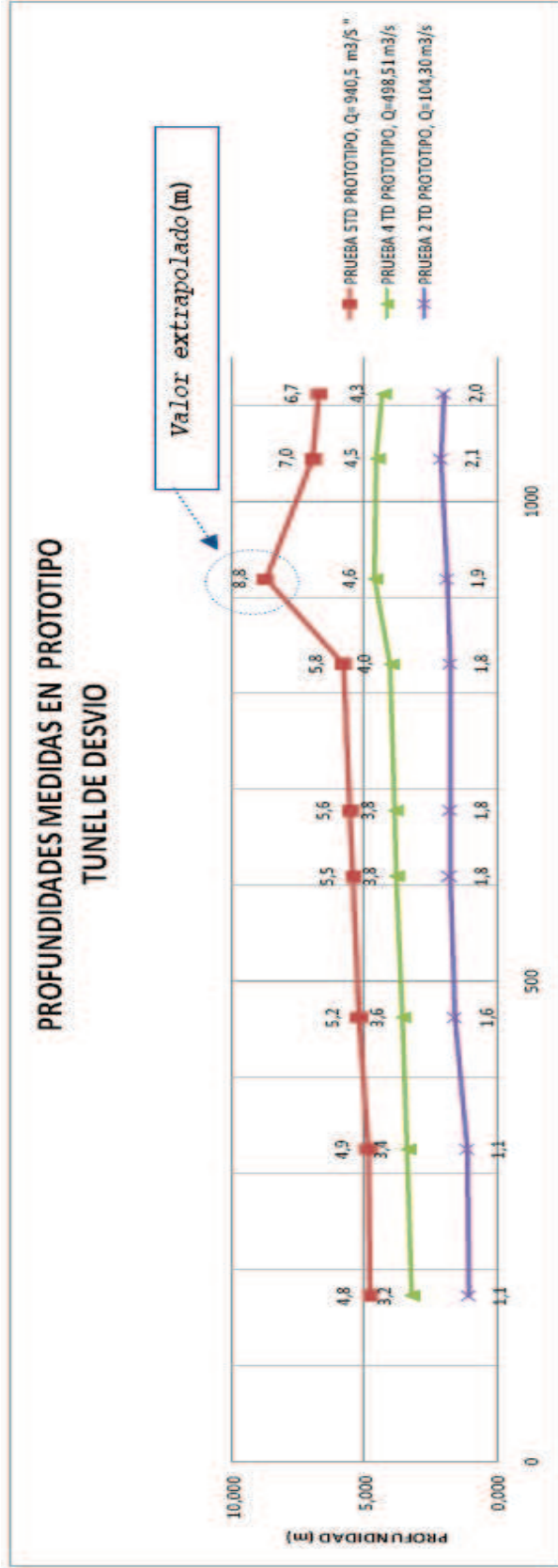
**Cuadro No. 29 (c):** Resultado de las mediciones experimentales para el Túnel de Desvío.

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 5: TUNEL DE DESVIO</b>									
Caudal TD (m <sup>3</sup> /s)=	940,45								
Diámetro 1 (m)=	9,20								
Diámetro 2 (m)=	9,00								
Rugosidad absoluta (mm)=	0,60								
<b>Pto. medida</b>	<b>y<sub>medido</sub> (m)</b>	<b>y/D</b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\lambda</math> prototipo</b>	<b><math>\eta</math> calculado</b>	<b><math>Fr_{prototipo}</math></b>	
TD-1	4,81	0,53	27,22	2,55E+08	6,40E-05	0,0126	0,0146	4,43	
TD-2	4,88	0,54	26,72	2,53E+08	6,35E-05	0,0125	0,0146	4,31	
TD-3	5,23	0,58	24,51	2,41E+08	6,10E-05	0,0124	0,0146	3,76	
TD-4	5,45	0,61	23,34	2,34E+08	5,98E-05	0,0124	0,0146	3,48	
TD-5	5,55	0,62	22,84	2,31E+08	5,92E-05	0,0124	0,0147	3,36	
TD-6	5,84	0,65	21,55	2,23E+08	5,79E-05	0,0123	0,0147	3,05	
TD-7	8,75	0,97	14,90	1,49E+08	6,00E-05	0,0124	0,0146	1,03	
TD-8	6,97	0,77	17,79	1,94E+08	5,50E-05	0,0122	0,0147	2,14	
TD-9	6,74	0,75	18,41	2,00E+08	5,53E-05	0,0122	0,0147	2,30	
<b><math>\eta</math> PROMEDIO EN TUNEL:</b>							<b>0,0146</b>		

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

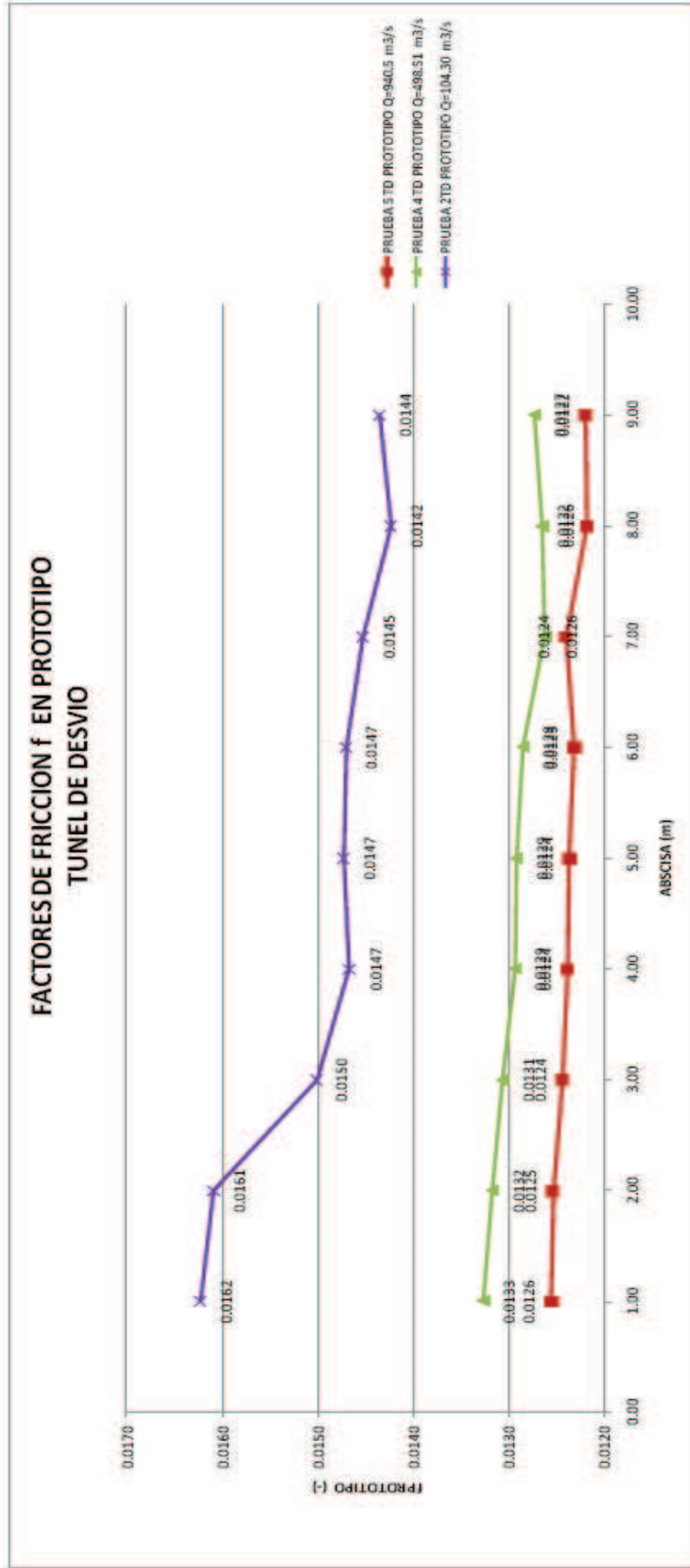


Figura No. 26 (a): Valores de profundidades medidas.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Figura No. 26 (b): Coeficientes de rugosidad calculados en el modelo.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Para el análisis de las mediciones en el modelo físico, se definen tres tramos dentro del desarrollo del Túnel de Desvío:

- ❖ El *primer tramo*, desde la curva vertical al finalizar el tramo con 18% de pendiente longitudinal, TD-1, hasta la sección TD-6 aguas arriba de la estructura de unión con la Descarga Intermedia. Este tramo tiene una longitud de desarrollo de 658,25 m e incluye la primera curvatura en planta del Túnel de Desvío, como se muestra en el plano No 3-M.
- ❖ El *segundo tramo*, corresponde a la estructura de unión con la Descarga Intermedia.
- ❖ El *tercer tramo*, se desarrolla desde la sección TD-7 aguas abajo de la estructura de unión hasta la sección TD-9, ubicada a 75,15 m aguas arriba del inicio del dissipador de energía en la salida del Túnel de Desvío. Este tramo tiene una longitud de 192,90 m y contiene a la segunda curvatura en planta del Túnel de Desvío.

Se observa que las profundidades presentan una tendencia creciente a lo largo del Túnel de Desvío. En el primer tramo, este incremento de las profundidades a lo largo del perfil de la superficie libre se muestra consistente para la gama de caudales ensayados. Los valores de variación de las profundidades medidas en este tramo se resumen en el siguiente cuadro.

**Cuadro No. 30:** Variación de profundidades de flujo en el Túnel de Desvío.

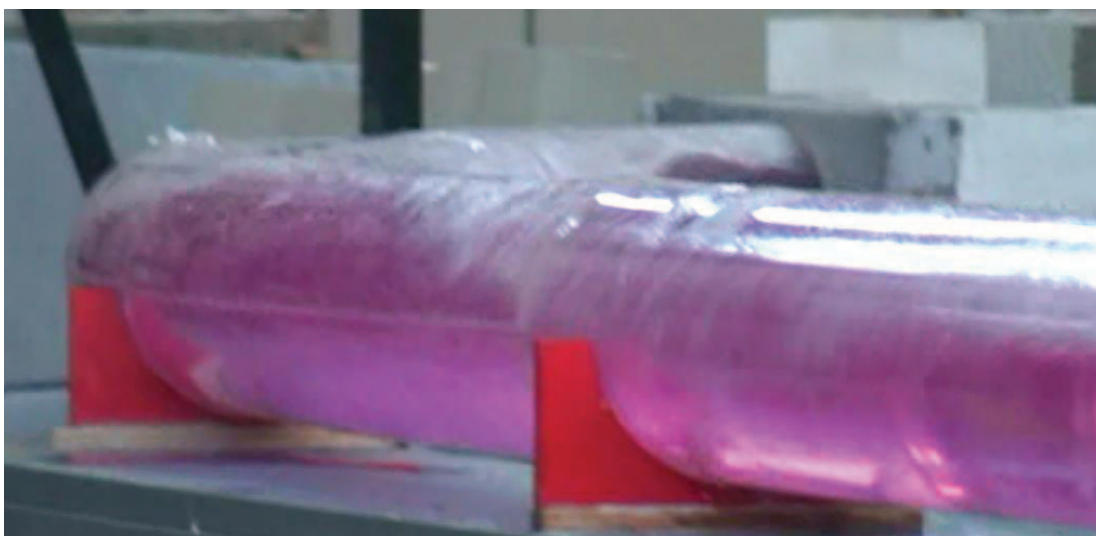
<b>Caudal medido (<math>m^3/s</math>)</b>	<b>Profundidad inicial medida (m)</b>	<b>Profundidad aguas arriba de la estructura de unión (m)</b>	<b>Valor medio del coeficiente de resistencia al flujo medido en modelo</b>	<b>Profundidad normal calculada (m)</b>
940,50	4,8	5,8	0,0147	6,64
498,51	3,2	4,0	0,0144	4,50
104,30	1,1	1,8	0,0138	2,06

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

En el primer y tercer tramo del Túnel de Desvío, se ratifica la tendencia creciente de perfiles que tratan de llegar a profundidad normal. Se observa un comportamiento especial en el corto tramo que corresponde a la estructura de unión con la Descarga Intermedia, debido a la falta de confinamiento lateral derecho, en el tramo donde ingresa el túnel de la Descarga Intermedia. Tan pronto como se pierde el confinamiento lateral de la sección circular del túnel, el flujo se abre lateralmente hasta topar con la pared derecha de la Descarga Intermedia y se refleja en ella para finalmente formar una onda, que gira y cae sobre el flujo del túnel. Para los caudales altos, se observa una obstrucción en la sección de unión, que limita su capacidad hidráulica y genera gran perturbación en el flujo hacia aguas abajo, a pesar de que la Descarga Intermedia no aporta caudal, como se observa en la siguiente Fotografía No 24.

**Fotografía No. 24:** Vista del flujo en la estructura de unión. Se observa la reflexión de la lámina de agua en las paredes laterales.

Flujo en el Túnel de Desvío  $Q_{TD} = 898,0 \text{ m}^3/\text{s}$



Este comportamiento se observa y en la serie de Fotografías Nos.17 a 20 del Anexo No. 2A. En la sección TD-7 no es posible determinar la altura de la superficie libre para caudales mayores a  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ , debido a la gran turbulencia que se produce por el cambio brusco de geometría. El flujo de salida de la estructura de unión es bastante desordenado y presenta mayor cantidad de ondas con amplitudes mayores, las mismas que inmediatamente ingresan en la segunda

curvatura en planta del túnel, donde se mantienen y tienden levemente a reducirse en el tramo recto final, antes de llegar a la estructura de disipación de energía en la salida del túnel. La longitud de este último tramo recto no es suficiente para uniformizar el flujo rápido.

Las velocidades de flujo son decrecientes en el sentido de flujo. Aguas abajo de la estructura de unión, es decir en el tercer tramo, se observa una disminución mayor de velocidades que en el primer tramo. Probablemente la fuerte turbulencia generada en la estructura de unión genera una pérdida de energía que justifica la reducción de velocidad observada en el tercer tramo del túnel. Este comportamiento es más relevante para el rango de caudales medios y altos; y menos importante para los caudales bajos.

Los valores del coeficiente de rugosidad  $n$  para la ecuación de Manning, determinados indirectamente sobre la base de la evaluación del coeficiente de fricción  $\lambda$ , tienen una tendencia diferente de aquella determinada para el coeficiente  $\lambda$ . Mientras el coeficiente de fricción  $\lambda$  tiene el mayor valor para el caudal más bajo, como se indica en el Cuadro No. 31, el valor de  $n$  es relativamente el menor para dicho caudal más bajo. No obstante, los valores promedio obtenidos son muy cercanos en todos los casos al valor de  $n = 0,014$  adoptado para el diseño original.

En el siguiente cuadro se presentan los valores medios de  $n$  calculados a base de las profundidades medidas en el modelo físico y su porcentaje de variación con respecto del valor adoptado en el diseño original.

**Cuadro No. 31:** Valores medios del coeficiente de rugosidad  $n$  - Túnel de Desvío

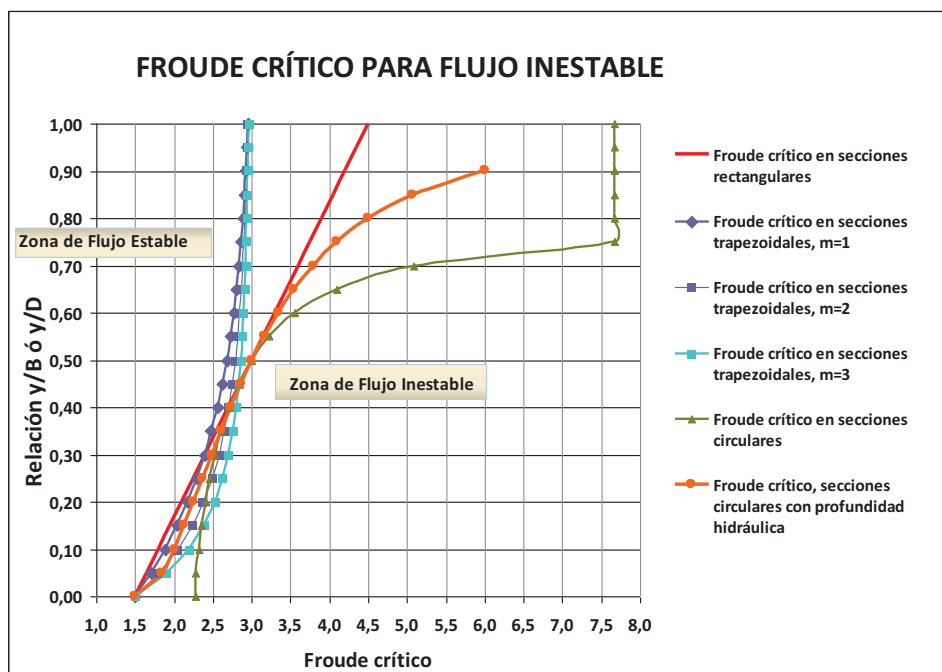
<i>Caudal medido (<math>m^3/s</math>)</i>	<i>Valor calculado en la sección TD-9</i>	<i>Valor promedio de <math>n</math> calculado</i>	<i>% de diferencia con el valor de <math>n</math> adoptado en el diseño original</i>
940,50	0,0122	0,0147	+ 5,00
498,51	0,0127	0,0144	+ 2,86
104,30	0,0144	0,0138	- 1,43

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

### 5.3.1.2.2 Análisis de la Estabilidad del Flujo en el Túnel de Desvío Fase I

Considerando los valores del Froude Crítico para secciones circulares se observa que para la gama de caudales ensayados el flujo en el Túnel de Desvío es inestable para valores de la relación de llenado  $y/D$  menores a 0,6. Es decir, que para los caudales bajos prácticamente el flujo escurre en toda la longitud con inestabilidad. Únicamente para los caudales más altos, cuando se tienen relaciones de llenado mayores a 0,6, en donde el flujo dentro de la sección circular se torna estable siempre que el valor de Froude no alcance el valor crítico que es igual a 3,5. En el siguiente cuadro se presentan los valores del parámetro adimensional Froude obtenido a base de las profundidades medidas en el modelo físico en el tramo con pendiente longitudinal igual al 2%. En el tramo inicial que presenta una pendiente del 18%, la relación de llenado será menor, por lo que la tendencia a la inestabilidad del flujo será importante.

**Figura No. 27:** Valores de Froude crítico para flujo inestable



Fuente: Informe de Fase I, Modelo Hidráulico del Túnel de Desvío de la Central Paute Molino.

**Cuadro No. 32:** Valores del parámetro Froude en el Túnel de Desvío

<b>Caudal medido (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Rango de valores y/D</b>	<b>Valores de Froude medidos</b>	<b>Valores de Froude críticos para la sección circular</b>	<b>Calificación del flujo</b>
940,50	0,53	4,43	3,00	Inestable
	0,54	4,31	3,30	Inestable
	0,58	3,76	3,40	Inestable
	0,61	3,48	3,60	Estable
	0,62	3,36	3,70	Estable
	0,65	3,05	4,00	Estable
	0,97	1,03	7,70	Estable
	0,77	2,14	7,70	Estable
	0,75	2,30	7,50	Estable
498.51	0,36	5,00	2,70	Inestable
	0,37	4,60	2,70	Inestable
	0,39	4,20	2,70	Inestable
	0,42	3,70	2,70	Inestable
	0,43	3,60	2,80	Inestable
	0,44	3,30	2,80	Inestable
	0,51	2,60	3,10	Estable
	0,50	2,60	3,00	Estable
	0,48	2,90	2,80	Estable
104,30	0,12	9,00	2,20	Inestable
	0,13	8,30	2,20	Inestable
	0,18	4,20	2,30	Inestable
	0,20	3,30	2,30	Inestable
	0,20	3,40	2,30	Inestable
	0,20	3,40	2,30	Inestable
	0,21	3,00	2,30	Inestable
	0,24	2,40	2,40	Inestable
	0,22	2,60	2,30	Inestable

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Para los caudales bajos, el flujo en el Túnel de Desvío tiende a ser inestable en toda su longitud, mientras que para los caudales medios y altos esta inestabilidad se presenta en el tramo inicial del trazado del túnel.

#### *5.3.1.2.3 Análisis del Flujo en las curvaturas en planta dentro del trazado del Túnel de Desvío Fase I*

Para el análisis sobre la generación de ondas cruzadas en las dos curvas en planta que presenta la alineación del Túnel de Desvío, se calcula a continuación el número de curva  $B_0$  definido como el producto  $Fr * (b/R)^{1/2}$ , donde  $b$  es el ancho de la superficie libre del agua en el túnel circular,  $Fr$  es el número de Froude y  $R$  el radio medio de curvatura. Se analiza para los dos valores de radio medio de curvatura  $R_1 = 300$  m y  $R_2 = 400$  m.



**Cuadro No. 33:** Valores del Número de Curva para las curvaturas del Túnel de Desvío.

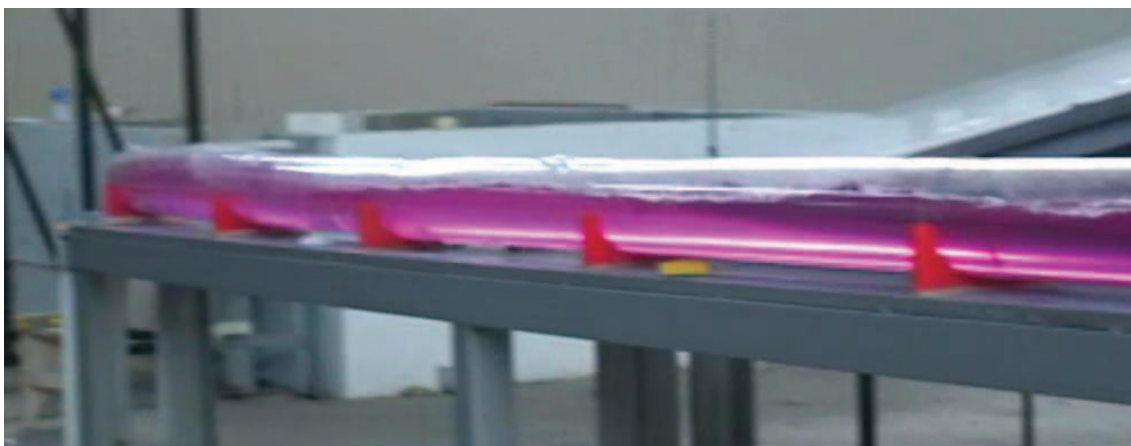
<b>Caudal medido (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Ubicación de la sección</b>	<b>y/D en curvatura en planta</b>	<b>Valores de Froude medidos</b>	<b>Ancho del espejo de aguas en la sección circular (m)</b>	<b>Numero de Curva B<sub>0</sub>, R<sub>1</sub> = 300 m</b>	<b>Numero de Curva B<sub>0</sub>, R<sub>2</sub> = 400 m</b>
940,05	Primera curva en planta , R = 400 m					
	TD – 3	0,58	3,76	8,88		0,56
	TD – 4	0,61	3,48	8,80		0,52
	TD – 5	0,62	3,36	8,75		0,50
	Segunda curva en planta , R = 300 m					
	TD – 7	0,97	1,03	2,96	0,10	
	TD – 8	0,77	2,14	7,52	0,34	
	TD – 9	0,75	2,30	7,81	0,37	
498.51	Primera curva en planta , R = 400 m					
	TD – 3	0,39	4,2	8,80		0,62
	TD – 4	0,42	3,7	8,89		0,55
	TD – 5	0,43	3,6	8,90		0,54
	Segunda curva en planta , R = 300 m					
	TD – 7	0,51	2,6	9,00	0,44	
	TD – 8	0,50	2,6	9,00	0,46	
	TD – 9	0,48	2,9	8,99	0,51	
104.30	Primera curva en planta , R = 400 m					
	TD – 3	0,18	4,2	6,87		0,55
	TD – 4	0,20	3,3	7,20		0,44
	TD – 5	0,20	3,4	7,14		0,46
	Segunda curva en planta , R = 300 m					
	TD – 7	0,21	3,0	7,34	0,46	
	TD – 8	0,24	2,4	7,64	0,38	
	TD – 9	0,22	2,6	7,51	0,41	

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Los valores obtenidos para el número de curva  $B_0$ , en todos los casos, son menores a 1,5, por lo que las dos curvaturas son consideradas débiles y los efectos sobre la generación de ondas cruzadas en el flujo del Túnel de Desvío es relativamente menor. Sin embargo, las observaciones en el modelo físico muestran que a pesar de los valores bajos del número de curva, se generan ondas cruzadas, de manera especial aguas abajo de la estructura de unión con la Descarga Intermedia, en donde el flujo sufre una fuerte perturbación que al ingresar a la segunda curvatura en planta genera ondas cruzadas de mayor amplitud que las observadas en el tramo aguas arriba de la unión.

Esta tendencia es similar en toda la gama de caudales ensayados. Debido a las condiciones especialmente desordenadas del flujo de aproximación, luego de la estructura de unión, el flujo en el Túnel de Desvío se muestra sinuoso y fuertemente ondulado en el tramo de salida del túnel. La curva con mayor valor de radio medio es la que presenta menor tendencia a la generación de ondas cruzadas, por lo que el flujo a lo largo de la primera curvatura en planta es relativamente aceptable, con formación de ondas de pequeña amplitud y amplia longitud, como se observa en la siguiente fotografía.

**Fotografía No. 25:** Flujo en la primera curvatura en planta del Túnel de Desvío, aguas arriba de la estructura de unión. Se observa la presencia de ondas en la superficie libre.  $Q_{TD} = 898,0 \text{ m}^3/\text{s}$



Estas ondas superficiales que viajan hacia aguas abajo y tienden a disminuir en el tramo recto antes de la estructura de unión. La presencia de estas ondas es más acentuada para los caudales medios y altos. En la segunda curvatura en planta el flujo ingresa con una excesiva turbulencia producida en el cambio geométrico que provoca la estructura de unión con la Descarga Intermedia. Se observa que, durante el paso del flujo ya perturbado y con presencia de ondas a lo largo de la segunda curvatura en planta, éstas se amplifican volviéndose más notorias y generando un flujo ondulante a la salida de la misma.

La longitud del tramo recto que continúa aguas abajo de la segunda curva del Túnel de Desvío no tiene una longitud suficiente para disminuir el efecto ondulatorio del flujo.

#### *5.3.1.2.4 Análisis del índice de cavitación Fase I*

El flujo en el Túnel de Desvío presenta velocidades altas por lo que es posible que se provoquen problemas de cavitación, especialmente para bajos niveles de presión de agua. Para el análisis sobre el riesgo de cavitación se calcula el valor del *índice de cavitación*  $\sigma$ , como se expresa en el numeral 2.4.1.2.

En el siguiente cuadro se presentan los valores del parámetro  $\sigma$  calculados a base de las magnitudes medidas en el modelo físico transformadas de acuerdo al criterio de similitud de Froude.

**Cuadro No. 34:** Valores del índice de cavitación  $\sigma$ 

<b>Caudal medido (<math>m^3/s</math>)</b>	<b>y</b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Tolerancia sin aireación</b>
940.50	4,81	27,22	0,32	Revisión de diseño
	4,88	26,72	0,34	Revisión de diseño
	5,23	24,51	0,41	T2
	5,45	23,34	0,46	T2
	5,55	22,84	0,49	T2
	5,84	21,55	0,56	T2
	8,75	14,90	1,43	T1
	6,97	17,79	0,89	T1
	6,74	18,41	0,82	T1
498.51	3,23	24,33	0,35	Revisión de diseño
	3,37	22,92	0,40	Revisión de diseño
	3,55	21,35	0,47	T2
	3,81	19,47	0,58	T2
	3,84	19,25	0,59	T2
	4,00	18,25	0,67	T1
	4,60	15,24	1,01	T1
	4,52	15,59	0,96	T1
	4,29	16,67	0,82	T1
104.30	1,08	24,12	0,29	Revisión de diseño
	1,13	22,72	0,32	Revisión de diseño
	1,59	13,73	0,94	T1
	1,80	11,51	1,36	T1
	1,76	11,87	1,28	T1
	1,78	11,75	1,30	T1
	1,90	10,70	1,59	T1
	2,12	9,14	2,23	T1
	2,02	9,77	1,93	T1

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Los resultados obtenidos muestran que existe riesgo de cavitación en el tramo inicial del Túnel de Desvío hasta la abscisa 325 m. A partir de esta sección la tolerancia sin aireación se califica como T2 o como T1, de acuerdo a los valores definidos por el U.S. Bureau of Reclamation.

### **5.3.1.3 Análisis del flujo en el Túnel de la Descarga Intermedia Fase I**

#### *5.3.1.3.1 Profundidades a lo largo de la Descarga Intermedia Fase I*

De acuerdo con el Plan de Pruebas planteado para el análisis del flujo con el diseño original, en la Descarga Intermedia se realizaron las mediciones de los perfiles a lo largo del eje del túnel de la sección transversal tipo baúl para una gama de caudales de operación considerada como representativa en el diseño. Los caudales que circulan en la Descarga Intermedia, considerando las operaciones previstas en las fases A - B y C de la Central Molino alcanzan un valor máximo extraordinario de 200 m<sup>3</sup>/s. El caudal normal en modelo de operación es del orden de 15 m<sup>3</sup>/s.

La gama de caudales de operación representativos en la Descarga Intermedia, adoptada en la modelación física para el análisis del comportamiento hidráulico con el diseño original es la siguiente:

- Caudal bajo: 15,91 m<sup>3</sup>/s
- Caudal medio 102,53 m<sup>3</sup>/s
- Caudal alto: 201,53 m<sup>3</sup>/s

Considerando que la sección transversal de inicio de la descarga intermedia definida con la abscisa 0+00 corresponde al tramo final de la cámara de interconexión representada en el modelo físico aguas arriba del vertedero tipo Creager, se han definido cinco secciones para la medición, que se ubican en el Plano No.3-M del Anexo No. 1 y corresponden a las siguientes abscisas:

**Cuadro No. 35:** Ubicación de las secciones transversales de medición en el Túnel de la Descarga Intermedia

<b>Sección transversal de medición</b>	<b>Abscisa medida (m)</b>	<b>Observaciones</b>
DI-1	17,0	En la cámara de interconexión, aguas arriba del vertedero Creager
DI-2	63,45	Al pie del vertedero Creager. Ancho de la sección B = 6 m y pendiente longitudinal $I_0 = 20\%$
DI-3	115,45	En la sección transversal tipo baúl, con pendiente longitudinal $I_0 = 20\%$
DI-4	147,20	En la sección transversal tipo baúl, con pendiente longitudinal $I_0 = 20\%$
DI-5	182,25	Aguas abajo de la curva vertical, inmediatamente antes de la descarga en el túnel de desvío. $I_0 = 2\%$

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Las secciones de medición seleccionadas en el túnel de Descarga Intermedia se ubican dentro del desarrollo del tramo con 20% de pendiente y sección transversal tipo baúl, ancho B = 6 m.

El flujo en el tramo inmediato, aguas abajo del vertedero tipo Creager, se desarrolla libre con la pendiente del 20%. Se observa claramente la formación de las ondas cruzadas, de manera especial en el tramo superior, como se observa en la serie de Fotografías Nos. 13 a 14 del Anexo No. 2A y en las fotografías siguientes.

**Fotografía No. 26:** Flujo a la salida del vertedero tipo Creager en la Descarga Intermedia,  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Fotografía No. 27:** Flujo a la salida del vertedero Creager en la Descarga Intermedia,  $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$





**Fotografía No. 28:** Flujo en el canal de la Descarga Intermedia,  $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ .



La superficie del agua en el tramo de aproximación hacia el vertedero tipo Creager es estable y se aprecia que la formación de ondas se debe principalmente a la reducción gradual del ancho, que se inicia desde la cresta del vertedero sobre el cimacio del mismo hasta llegar al pie con el ancho igual a 6 m, en donde se tiene la profundidad contraída.

El flujo hacia aguas abajo, se caracteriza por altas velocidades y pequeñas profundidades distinguiéndose claramente la formación de ondas cruzadas. Aguas abajo de la sección de medición DI-4 las ondas cruzadas tienden a desaparecer, de tal forma que el flujo que ingresa hacia el Túnel de Desvío está mejor distribuido en la sección transversal.

Los valores de los calados medidos aguas abajo del vertedero tipo Creager se presentan en el siguiente cuadro.



**Cuadro No. 36:** Profundidades de flujo medidas en el túnel de la Descarga Intermedia

<b>Caudal medido (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Profundidad medida aguas abajo del vertedero Creager (m)</b>	<b>Profundidad normal calculada para <math>I_o = 20\%</math> (m)</b>
201,53	1,93	1,31
102,53	1,05	0,85
15,91	0,12	0,26

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

A lo largo del túnel de Descarga Intermedia se espera por lo tanto el desarrollo de un perfil creciente que tiende a llegar al valor de la profundidad normal.

Los resultados obtenidos se presentan en los siguientes cuadros y su representación gráfica en las siguientes figuras.

**Cuadro No. 37 (a):** Resultado de las mediciones experimentales para el túnel de la Descarga Intermedia

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 1: DESCARGA INTERMEDIA</b>									
Caudal DI (m <sup>3</sup> /s)=		15,91							
Ancho sección baúl=		6,00							
Rugosidad absoluta (mm)=		0,60							
<b>Pto. medida</b>	<b>y<sub>medido</sub> (m)</b>	<b>y/D</b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b>λ<sub>prototipo</sub></b>	<b>n<sub>calculado</sub></b>	<b>Fr<sub>prototipo</sub></b>	
DI-2	0,12	0,02	22,10	1,02E+07	1,30E-03	0,0210	0,0114	20,37	
DI-3	0,23	0,04	11,79	9,87E+06	7,17E-04	0,0182	0,0117	7,93	
DI-4	0,34	0,06	7,92	9,54E+06	4,98E-04	0,0167	0,0120	4,37	
DI-5	0,33	0,05	8,16	9,57E+06	5,12E-04	0,0168	0,0119	4,57	
n PROMEDIO EN TUNEL:							0,0118		

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Cuadro No. 37 (b):** Resultado de las mediciones experimentales para el túnel de la Descarga Intermedia

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 2: DESCARGA INTERMEDIA</b>									
Caudal DI (m <sup>3</sup> /s)=		102,53							
Ancho sección baúl=		6,00							
Rugosidad absoluta (mm)=		0,60							
<b>Pto. medida</b>	<b><math>y_{medido}</math> (m)</b>	<b>y/D</b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\lambda_{prototipo}</math></b>	<b><math>n_{calculado}</math></b>	<b><math>Fr_{prototipo}</math></b>	
DI-2	1,05	0,17	16,35	5,07E+07	1,94E-04	0,0137	0,0126	5,11	
DI-3	0,79	0,13	21,63	5,41E+07	2,40E-04	0,0143	0,0125	7,77	
DI-4	0,89	0,15	19,20	5,27E+07	2,19E-04	0,0140	0,0125	6,50	
DI-5	0,90	0,15	19,09	5,26E+07	2,18E-04	0,0140	0,0125	6,44	
n PROMEDIO EN TUNEL:						0,0125			

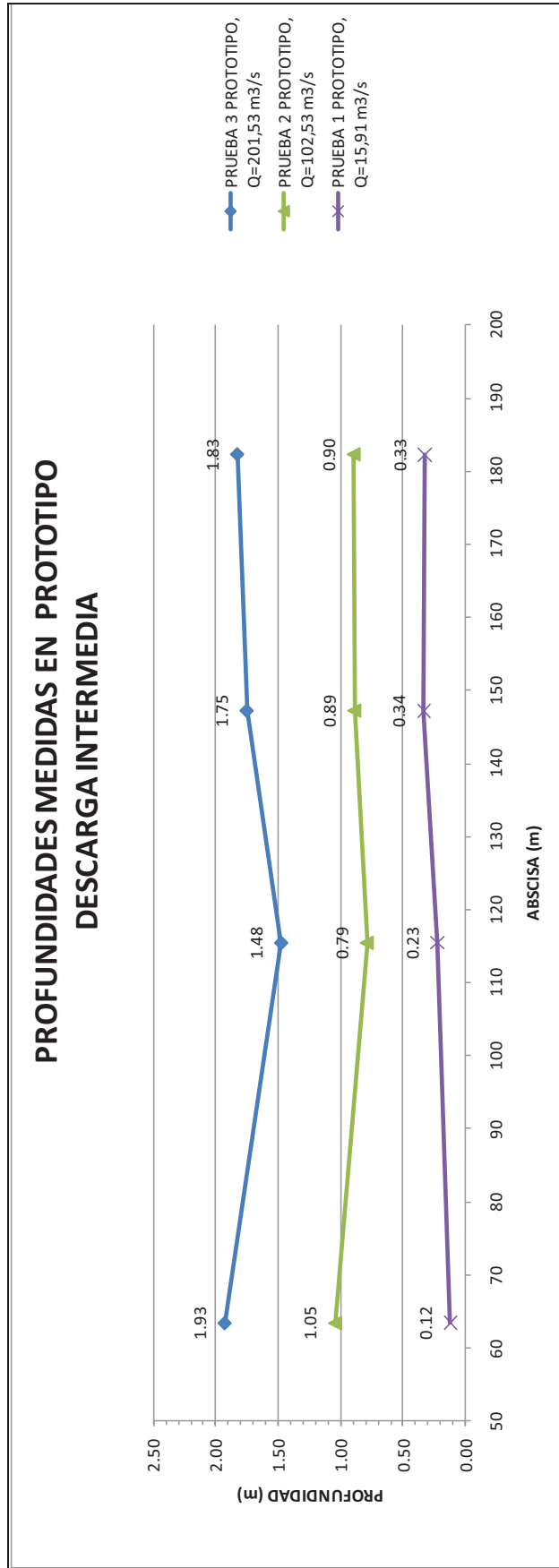
Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Cuadro No. 37 (c):** Resultado de las mediciones experimentales para el túnel de la Descarga Intermedia

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 3: DESCARGA INTERMEDIA</b>									
Caudal DI (m <sup>3</sup> /s)=		201,53							
Ancho sección baúl=		6,00							
Rugosidad absoluta (mm)=		0,60							
<b>Pto. medida</b>	<b><math>y</math> medido (m)</b>	<b><math>y/D</math></b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\lambda</math> prototipo</b>	<b><math>n</math> calculado</b>	<b><math>Fr</math> prototipo</b>	
DI-2	1,93	0,32	17,45	8,18E+07	1,28E-04	0,0126	0,0130	4,02	
DI-3	1,48	0,25	22,77	9,01E+07	1,52E-04	0,0130	0,0128	5,99	
DI-4	1,75	0,29	19,19	8,49E+07	1,36E-04	0,0127	0,0129	4,63	
DI-5	1,83	0,30	18,40	8,35E+07	1,32E-04	0,0127	0,0130	4,35	
n PROMEDIO EN TUNEL:							0,0129		

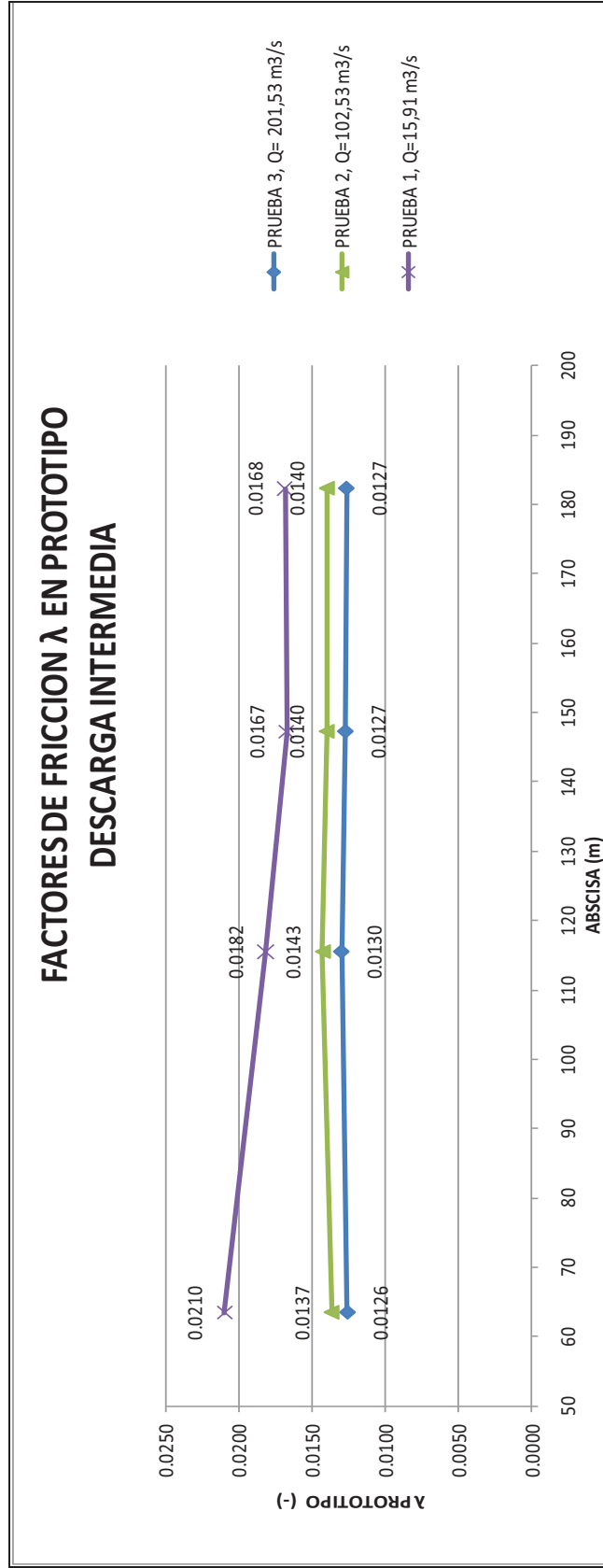
Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Figura No. 28 (a): Profundidades de agua en prototipo para túnel de la Descarga Intermedia.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Figura No. 28 (b):** Factores de fricción ( $\lambda$ ) para el túnel de la Descarga Intermedia.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

De acuerdo al Cuadro No. 37 se observa que las profundidades medidas en la sección DI-2, al pie del vertedero tipo Creager son relativamente grandes y superan el valor de la profundidad normal calculada para el respectivo caudal, considerando la pendiente longitudinal del 20%. Esto se justifica por el efecto de contracción gradual sobre el cimacio que genera ondas que se concentran en la sección estrecha al inicio del túnel de Descarga Intermedia. Las profundidades medidas al final de la Descarga Intermedia, en el tramo de ingreso hacia el túnel de desvío, son mayores que la profundidad normal calculada con la pendiente del 20%, debido a que en la sección DI-5 la pendiente se ha reducido al 2% para el ingreso hacia el Túnel de Desvío.

Los valores de variación de las profundidades medidas en este tramo se resumen en el siguiente cuadro.

**Cuadro No. 38:** Variación de profundidades medidas – Descarga Intermedia

<b>Caudal medido (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Profundidad inicial medida DI - 2 (m)</b>	<b>Profundidad aguas arriba de la estructura de unión DI - 5, I<sub>0</sub> = 2 % (m)</b>	<b>Valor medio del coeficiente de resistencia a flujo medido en modelo</b>	<b>Profundidad normal calculada I<sub>0</sub> = 20 % (m)</b>	<b>Profundidad normal calculada I<sub>0</sub> = 2 % (m)</b>
201,53	3,85	3,65	0,0164	1,31	2,98
102,53	1,05	0,90	0,0171	0,85	1,88
15,91	0,12	0,33	0,0172	0,26	0,54

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Para el caudal más bajo ensayado en la Descarga Intermedia se tienen valores de profundidades medidas en el modelo que son menores a 1 cm, por lo que estarían influenciadas por los efectos de escala.

En la estructura de unión se tiene un cambio de geometría que no puede ser seguido por el flujo, razón por la cual se presenta un choque del chorro en la

pared izquierda del Túnel de Desvío para luego generar un flujo con marcadas ondulaciones en el tramo de aguas abajo. Como el caudal máximo ensayado en la Descarga Intermedia es relativamente bajo para el Túnel de Desvío no se observa problemas de obturación eventual en la estructura de unión. Sin embargo el flujo en el Túnel de Desvío no logra uniformizarse, caracterizándose en la salida por un flujo sinuoso, con presencia de ondas cruzadas que llega hacia el dissipador de energía. Este comportamiento se observa en la fotografía No. 15 del Anexo No. 2A.

Las velocidades de flujo a lo largo del túnel de la Descarga Intermedia son altas. Aguas arriba de la estructura de unión, se observa una disminución mayor de velocidades debido al cambio de pendiente desde el 20% al 2% prevista en el diseño original.

Los valores medidos indirectamente del coeficiente de rugosidad  $n$  para la ecuación de Manning son mayores para los caudales más bajos. Considerando una rugosidad absoluta de 0,6 mm se calculan valores variables de  $n$  para los diferentes caudales ensayados así como para las diferentes relaciones de llenado. Los valores promedio obtenidos superan en todos los casos el valor de 0,014 adoptado para el diseño original. En el siguiente cuadro se presentan los valores medios de  $n$  calculados a base de las profundidades medidas en el modelo físico y su porcentaje de variación con respecto del valor adoptado en el diseño original.

**Cuadro No. 39:** Valores medios del coeficiente de rugosidad – Descarga Intermedia

<b><i>Caudal medido (m<sup>3</sup>/s)</i></b>	<b><i>Valor de n calculado en el modelo físico</i></b>	<b><i>% de diferencia con el valor de n adoptado en el diseño original</i></b>
201,53	0.0164	+ 17.14
102,53	0.0171	+ 22.14
15,91	0.0172	+ 22.85

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara



### 5.3.1.3.2 Análisis de la estabilidad del flujo en la Descarga Intermedia Fase I

Considerando los valores del Froude Crítico para secciones rectangulares se observa que, para la gama de caudales ensayados, el flujo en la Descarga Intermedia es inestable.

En el siguiente cuadro se presentan los valores del parámetro adimensional Froude obtenido a base de las profundidades medidas en el modelo físico en el tramo con pendiente longitudinal igual al 20%.

**Cuadro No. 40:** Valores del parámetro adimensional Froude en el túnel de la Descarga Intermedia

<b>PUNTOS DE MEDIDA</b>	<b>Caudal medido (<math>m^3/s</math>)</b>	<b>Valores de <math>y/B</math> medidos (<math>m</math>)</b>	<b>Valores de Froude medidos</b>	<b>Valores de Froude críticos para sección rectangular</b>	<b>Calificación del flujo</b>
DI – 2	201,53	0,32	4,02	2,5	Inestable
DI – 3		0,25	5,99	2,3	Inestable
DI – 4		0,29	4,63	2,4	Inestable
DI – 5		0,30	4,35	2,5	Inestable
DI – 2	102,53	0,17	5,11	2,0	Inestable
DI – 3		0,13	7,77	1,8	Inestable
DI – 4		0,15	6,50	1,9	Inestable
DI – 5		0,15	6,44	1,9	Inestable
DI – 2	15,91	0,02	20,37	1,5	Inestable
DI – 3		0,04	7,93	1,5	Inestable
DI – 4		0,06	4,37	1,5	Inestable
DI – 5		0,05	4,57	1,5	Inestable

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Los resultados obtenidos demuestran que el flujo en la Descarga Intermedia es inestable para toda la gama de caudales de operación.

### 5.3.1.3.3 Análisis del índice de cavitación Fase I

El flujo en la Descarga Intermedia presenta velocidades altas por lo que es posible que se provoquen problemas de cavitación, especialmente para bajos niveles de presión de agua.

Para el análisis sobre el riesgo de cavitación se calcula el valor del *índice de cavitación*  $\sigma$ , como se expresa en el tramo 2.4.1.2.

En el caso de la Descarga Intermedia, se adopta que el grado de tolerancia admisible es la T3, para la cual el índice de cavitación  $\sigma_i$  debe estar comprendido entre 0,20 y 0,40. Para valores del índice de cavitación, superiores a 0,40, se tiene el grado de tolerancia admisible igual a T2. En el siguiente cuadro se presentan los valores del parámetro  $\sigma$  calculados a base de las magnitudes medidas en el modelo físico transformadas de acuerdo al criterio de similitud de Froude.

**Cuadro No. 41:** Valores del índice de cavitación calculado para el flujo en la Descarga Intermedia

<b>PUNTOS DE MEDIDA</b>	<b>Caudal medido (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Y</b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b><math>\Sigma</math></b>	<b>Tolerancia sin aireación</b>
DI – 2	201,53	1,93	17,45	0,60	T2
DI – 3		1,48	22,77	0,34	T3
DI – 4		1,75	19,19	0,49	T2
DI – 5		1,83	18,40	0,53	T2
DI – 2	102,53	1,05	16,35	0,62	T2
DI – 3		0,79	21,63	0,34	T3
DI – 4		0,89	19,20	0,44	T2
DI – 5		0,90	19,09	0,45	T2
DI – 2	15,91	0,12	22,10	0,30	T3
DI – 3		0,23	11,79	1,08	T1
DI – 4		0,34	7,92	2,42	T1
DI – 5		0,33	8,16	2,27	T1

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

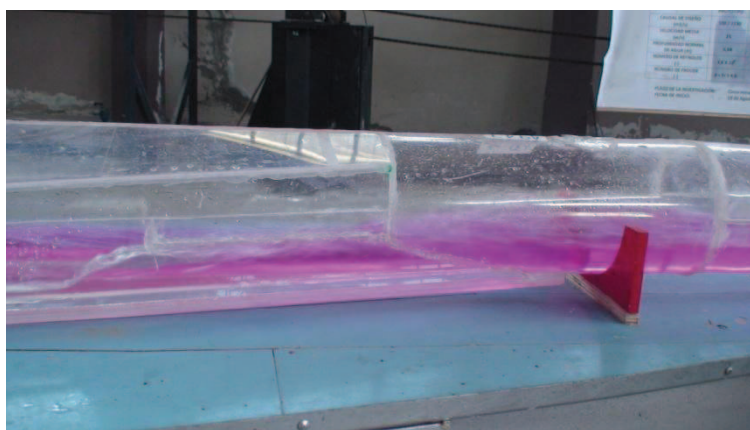
Los resultados obtenidos muestran que existe eventualmente un riesgo de cavitación en el tramo inicial de la Descarga Intermedia, al pie del vertedero Creager. A partir de esta sección la tolerancia sin aireación se califica como T2 o como T1, de acuerdo a los valores definidos por el U.S. Bureau of Reclamation.

#### *5.3.1.4 Análisis del flujo combinado en el Túnel de Desvío y Descarga Intermedia*

El flujo combinado en los túneles de Desvío y Descarga Intermedia mantiene las características señaladas anteriormente para cada una de las estructuras por separado, en los tramos que se desarrollan aguas arriba de la estructura de unión. Se ha observado que aún en el caso en que se tenga únicamente el flujo en el Túnel de Desvío o en la Descarga Intermedia, la presencia de la estructura de unión genera graves perturbaciones, de tal manera que el tramo aguas abajo de la misma presenta un flujo fuertemente ondulatorio, que no puede ser considerado como unidimensional.

La operación conjunta de la Descarga Intermedia y el Túnel de Desvío permite observar que la confluencia de los flujos de alta velocidad genera ondas de gran amplitud que a su vez provocan reflexión del flujo en las paredes laterales y obturación parcial o total para la operación con los caudales altos, como se observa en las fotografías siguientes.

**Fotografía No. 29:** Flujo en la estructura de unión. Se observa la presencia de ondas en la superficie libre. Flujo combinado:  $Q_{TD}= 199,76 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{DI}= 24,75 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 30:** Flujo en la estructura de unión. Se observa el control desde el Túnel de Desvío sobre el flujo de la Descarga Intermedia.

Flujo combinado:  $Q_{TD} = 199,76 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{DI} = 24,75 \text{ m}^3/\text{s}$

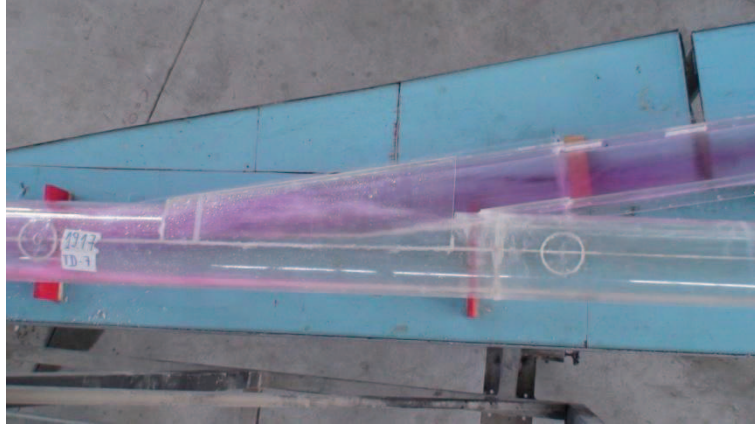


**Fotografía No. 31:** Flujo en la estructura de unión con flujo combinado:

$Q_{TD} = 898,0 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{DI} = 102,53 \text{ m}^3/\text{s}$



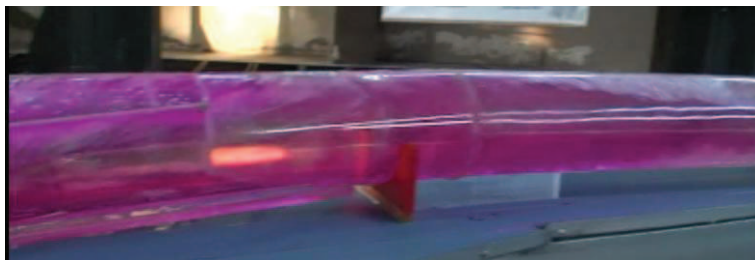
**Fotografía No. 32:** Vista en planta del flujo en la estructura de unión con flujo combinado:  $Q_{TD} = 898,0 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{DI} = 102,53 \text{ m}^3/\text{s}$



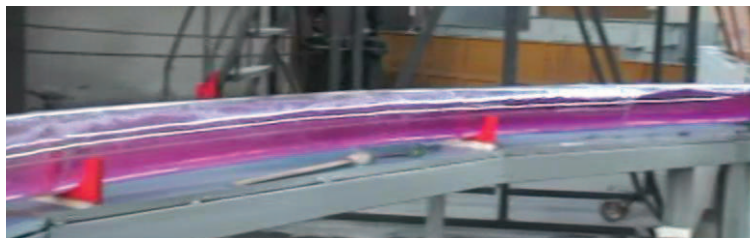
**Fotografía No. 33:** Flujo a la salida de la estructura de unión con flujo combinado:  $Q_{TD} = 898,0 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{DI} = 102,53 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se observa que la sección transversal en este tramo se llena completamente.



**Fotografía No. 34:** Flujo a la salida de la estructura de unión con flujo combinado:  $Q_{TD} = 898,0 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{DI} = 102,53 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se observa la generación de ondas.

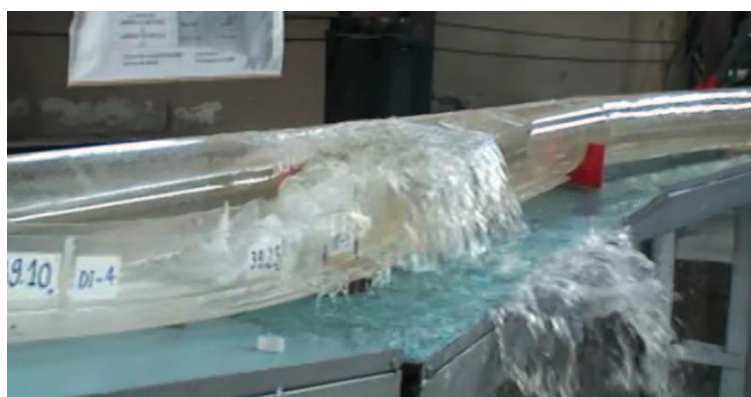


**Fotografía No. 35:** Flujo en el tramo de aguas debajo de la estructura de unión. Flujo combinado:  $Q_{TD} = 898,0 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{DI} = 102,53 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se observa la presencia de ondas cruzadas hasta la sección de salida del Túnel de Desvío.



En particular se observa que existe una fuerte obturación para operaciones conjuntas con caudales mayores a  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  en el Túnel de Desvío, de tal manera que se admite como máximo el flujo de hasta  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  en la Descarga Intermedia. Para valores mayores se produce un desborde como se observa en la siguiente fotografía.

**Fotografía No. 36:** Flujo en la estructura de unión con flujo combinado:  $Q_{TD} = 940,5 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{DI} = 102,53 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se observa la obturación del tramo que provoca el desborde.



Las características del flujo en el tramo de aguas abajo de la estructura de unión en el Túnel de Desvío presentan fuertes ondulaciones, producidas por la unión de flujos y reflexión de las láminas de agua en los contornos laterales.

Los valores de profundidades medidos para la operación conjunta del túnel de desvío y descarga intermedia se presentan en los siguientes cuadros.



**Cuadro No.42 (a):** Valores de profundidad medida para la operación combinada.

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 1: TUNEL DE DESVIO + DESCARGA INTERMEDIA</b>									
Caudal DI (m <sup>3</sup> /s)=		24,75							
Caudal TD (m <sup>3</sup> /s)=		199,76							
Diámetro 1 (m)=		9,20							
Diámetro 2 (m)=		9,00							
Rugosidad absoluta (mm)=		0,6							
<b>Pto. medida</b>	<b>y medido (m)</b>	<b>y/D</b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\lambda</math> prototipo</b>	<b>n calculado</b>	<b><math>F_r</math> prototipo</b>	
TD-1	1,98	0,22	19,22	9,09E+07	1,27E-04	0,0193	0,0117	5,20	
TD-2	1,94	0,22	19,85	9,20E+07	1,29E-04	0,0194	0,0161	5,44	
TD-3	2,11	0,23	17,59	8,78E+07	1,20E-04	0,0191	0,0162	4,60	
TD-4	2,35	0,26	15,11	8,28E+07	1,10E-04	0,0187	0,0163	3,73	
TD-5	2,39	0,27	14,75	8,20E+07	1,08E-04	0,0186	0,0163	3,61	
TD-6	2,52	0,28	13,68	7,96E+07	1,03E-04	0,0184	0,0163	3,25	
TD-7	3,05	0,34	11,82	8,03E+07	8,84E-05	0,0178	0,0164	2,53	
TD-8	3,11	0,35	11,51	7,94E+07	8,70E-05	0,0177	0,0164	2,44	
TD-9	3,12	0,35	11,46	7,92E+07	8,68E-05	0,0177	0,0164	2,42	
<b><math>\eta</math> PROMEDIO EN TUNEL:</b>							<b>0,0158</b>		

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Cuadro No.42 (b):** Valores de profundidad medida para la operación combinada.

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 2: TUNEL DE DESVIO + DESCARGA INTERMEDIA</b>									
Caudal DI (m <sup>3</sup> /s)=	100,76								
Caudal TD (m <sup>3</sup> /s)=	898,03								
Diámetro 1 (m)=	9,20								
Diámetro 2 (m)=	9,00								
Rugosidad absoluta (mm)=	0,60								
<b>Pto. medida</b>	<b><math>y</math> medido (m)</b>	<b><math>y/D</math></b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\lambda</math> prototipo</b>	<b><math>n</math> calculado</b>	<b><math>Fr</math> prototipo</b>	
TD-1	4,53	0,50	28,01	2,53E+08	6,64E-05	0,0126	0,0145	4,74	
TD-2	4,73	0,53	26,49	2,46E+08	6,46E-05	0,0126	0,0146	4,35	
TD-3	4,58	0,51	27,63	2,51E+08	6,60E-05	0,0126	0,0145	4,64	
TD-4	5,32	0,59	22,97	2,28E+08	6,05E-05	0,0124	0,0146	3,49	
TD-5	5,03	0,56	24,56	2,36E+08	6,23E-05	0,0125	0,0146	3,88	
TD-6	5,45	0,61	22,31	2,24E+08	5,98E-05	0,0124	0,0146	3,33	
TD-7	8,75	0,97	15,82	1,58E+08	6,00E-05	0,0124	0,0146	1,09	
TD-8	7,18	0,80	18,36	2,01E+08	5,48E-05	0,0122	0,0147	2,14	
TD-9	7,38	0,82	17,90	1,96E+08	5,48E-05	0,0122	0,0147	2,01	
n PROMEDIO EN TUNEL:							0,0146		

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara



### **5.3.2 DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES EN EL MODELO DEL TÚNEL DE DESVÍO EN LA FASE II**

Las modificaciones implementadas en el modelo físico del Túnel de Desvío, para su análisis en la Fase II de la investigación, fueron realizadas de la siguiente manera:

- a) Cambios en la estructura de entrada:
  - i. Incremento del diámetro de la boca de entrada al Túnel de Desvío.
  - ii. Cambio en la transición inicial del Túnel de Desvío.
  - iii. Geometría del estribo derecho: forma del estribo en planta y variación de la altura (estribo de altura declinante).
  - iv. Eliminación de la curvatura en planta e incremento de longitud en el estribo izquierdo.
  - v. Introducir una ranura de aireación en el tramo inicial del túnel de desvío, que garantice la ventilación requerida para mantener el flujo a superficie libre en toda la longitud de esta estructura.
  
- b) Eliminación de la Estructura de Unión del Túnel de Desvío y de la Descarga Intermedia. Esto implica que el túnel de la Descarga Intermedia tenga una alineación independiente del Túnel de Desvío.

#### **5.3.2.1 Modificaciones en la Estructura de Entrada**

Las modificaciones correspondientes Fase II de la investigación, implementadas en la estructura de ingreso hacia el Túnel de Desvío y en el tramo inmediato hacia aguas abajo son las siguientes:

- i. Ampliación del diámetro de la boca de entrada de 9,20 m a 11,0 m.
  
- ii. Modificación de la transición en el tramo inicial del Túnel de Desvío.

- iii. Modificación de las pilas laterales o estribos de la bocatoma. En particular, se requiere modificar la geometría del estribo de la margen derecha, donde se origina un importante flujo de separación.

A continuación se describen cada una de las modificaciones realizadas para la segunda Fase de la investigación:

**MB-1:** Modificación del tramo inicial del Túnel de Desvío, que corresponde al cambio de la transición original por otra cuyo diámetro inicial es  $D_1 = 11$  m (boca de entrada al Túnel de Desvío) y diámetro final es  $D_2 = 9$  m (sección transversal del Túnel de Desvío). La longitud de esta transición se incrementa a 55 m. Esta modificación se presenta en las siguientes fotografías y en el plano No. 10-M del Anexo No. 1. Además se modificó la geometría en la aproximación hacia la boca de entrada de la estructura, rellenando las esquinas superiores e inferiores, como se puede observar en la Fotografía No.37.

**MB-2:** Adicionalmente al cambio en la transición de entrada, se modifica la geometría del extremo de aguas arriba del estribo derecho de la estructura de entrada, el mismo está conformado en planta con dos arcos de circunferencia, como se muestra en las fotografías Nos. 38 y 39. El estribo presenta ahora una longitud variable, mayor en la parte superior con un desarrollo de 5,50 m (11 cm en modelo) y menor en la parte inferior, con una longitud de 1,50 m (3 cm en modelo). El detalle de este cambio geométrico se observa en la fotografía No. 4 y en el plano No. 10-M del Anexo No. 1.

**Fotografía No. 37:** Vista de relleno colocado en la boca de la estructura de entrada.



**Fotografía No. 38:** Vista superior del estribo derecho. Modificación MB-2.



**Fotografía No. 39:** Vista lateral del estribo derecho. Modificación MB-2.



**Fotografía No. 40:** Vista frontal del estribo derecho modificado: la longitud varía en forma gradual, en dirección de la vertical. Modificación MB-2



**MB-3:** Eliminación de la curvatura en planta del estribo derecho, manteniendo los cambios geométricos definidos en las modificaciones MB-1 y MB-2. Para la definición de la geometría propuesta en esta modificación MB-3, se realizaron pruebas previas, utilizando tabla triplex para la prolongación recta de la pared, como se indica en las siguientes fotografías.



**Fotografía No. 41:** Flujo junto al estribo derecho, para el caudal de  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se elimina la curvatura en planta del estribo. Modificación MB-3



**Fotografía No. 42:** Aparecen pequeñas fluctuaciones de la superficie libre para el flujo junto al estribo derecho, para el caudal de  $Q= 500 \text{ m}^3/\text{s}$ . El estribo es recto. Modificación MB-3



En forma comparativa, se observa en las siguientes fotografías No. 43 y No. 44, la operación de la estructura de entrada al Túnel de Desvío con caudales similares y con las modificaciones MB-2 y MB-3, respectivamente. Se reconoce el efecto positivo sobre la uniformidad del flujo de entrada que provoca la eliminación de la curvatura en planta del estribo derecho y la prolongación del tramo recto de la

pared hacia la orilla derecha del río Paute. Se eliminan notablemente las ondulaciones de la superficie libre del agua en la zona de ingreso al Túnel de Desvío y la depresión de la profundidad de agua alrededor de la cabeza del estribo.

**Fotografía No. 43:** Flujo inadecuado en el extremo derecho por la curvatura en la pared. Modificación MB-2



**Fotografía No. 44:** Mejora en la calidad del flujo en el extremo derecho por la eliminación de la curvatura en la pared. Modificación MB-3



Los principales cambios geométricos en la estructura de entrada al Túnel de Desvío, ensayados en esta segunda fase de la investigación, se detallan en el siguiente Cuadro No.43

**Cuadro No. 43:** Cambios geométricos en la estructura de entrada

<i>Elemento de la estructura</i>	<i>Diseño Original</i>	<i>Diseño Modificado</i>
Cota del umbral de fondo	1.326,00 msnm	1.346,00 msnm
Diámetro del orificio de entrada al Túnel de Desvío	9,00 m	11,00 m
Geometría entre la sección rectangular, en el inicio de la estructura de desvío; y circular en el inicio del túnel	Abrupta con esquinas	Gradual, con redondeamiento de esquinas
Longitud de la transición asimétrica entre las tuberías circulares	55,00 m	55,00 m
Configuración en planta del extremo de aguas arriba del estribo de la margen	Sección recta	Sección con dos arcos de circunferencia
Longitud del estribo de la margen derecha	Constante	Variable
Aireación en el inicio del Túnel de Desvío	No considera	Si considera

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

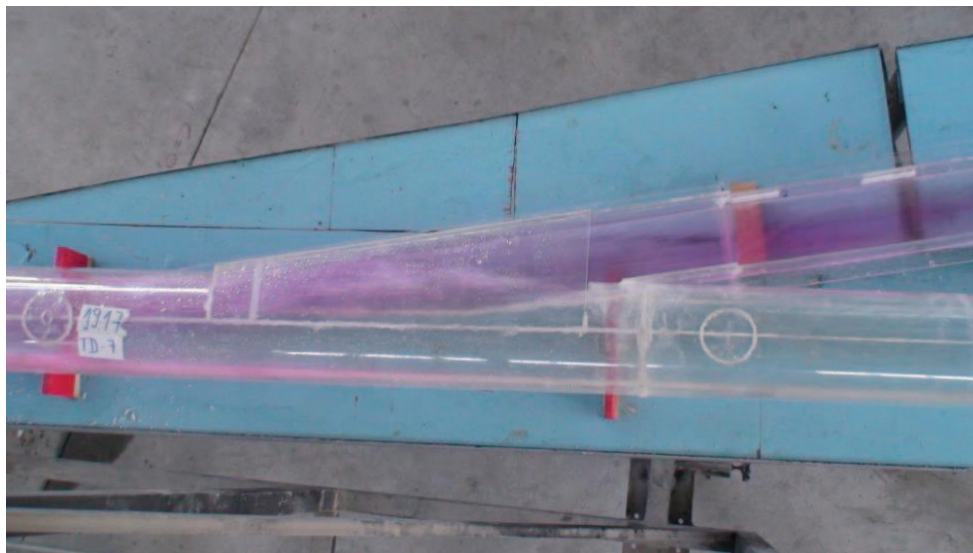
### 5.3.2.2 Modificaciones a lo largo del Túnel de Desvío

En el Túnel de Desvío se realizó la siguiente modificación:

**MTD-1:** Separación de la confluencia del Túnel de Desvío y la Descarga Intermedia, es decir se elimina la estructura de unión entre los dos túneles. Como se muestra en el Plano No. 8-M del Anexo No. 1. En las siguientes fotografías Nos. 45 y 46 se puede observar el comportamiento del flujo a lo largo del Túnel de Desvío, comparando las fotografías se concluye que con la eliminación de la estructura de unión la calidad del flujo mejora notablemente.



**Fotografía No. 45:** Vista en planta del flujo en la estructura de unión con flujo combinado:  $Q_{TD} = 898,0 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{DI} = 102,53 \text{ m}^3/\text{s}$ , según pruebas realizadas en la Fase I.



**Fotografía No. 46:** Vista del Túnel de Desvío sin la estructura de unión.



En la siguiente fotografía No. 47 se muestra el flujo como resultado de la eliminación de la estructura de unión entre el Túnel de Desvío y la Descarga Intermedia. Existe una mejora apreciable en la calidad del flujo a lo largo del Túnel de Desvío.



**Fotografía No. 47:** Túnel de Desvío sin estructura de unión, se observa flujo a tubo lleno para caudal máximo.



### 5.3.3 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EN LAS PRUEBAS DEL MODELO FÍSICO.- FASE II DE LA INVESTIGACIÓN.

#### 5.3.3.1 Análisis de la operación de la estructura de entrada al Túnel de Desvío con las modificaciones geométricas ensayadas en la Fase II.

##### 5.3.3.1.1 Curva de Descarga en la Bocatoma de ingreso al Túnel de Desvío Fase II

En la Fase II de la investigación con las modificaciones al Diseño Original del Modelo se realizaron varias mediciones de la carga sobre el umbral o azud en la zona de ingreso al Túnel de Desvío y del caudal. En estos casos, se tiene como la cota del punto más alto del umbral, aguas arriba de la boca de entrada de la estructura de desvío, al valor 1.326,00 msnm. En el Cuadro No. 44 se presentan los valores registrados de la carga sobre el umbral y del caudal, junto con los valores calculados de la cota de la superficie libre del agua en la zona de aproximación hacia la entrada al Túnel de Desvío. Esta cota es medida sobre la cresta del umbral. En la Figura No. 29 se presenta la curva de descarga con valores medidos según las modificaciones realizadas en la Fase II.

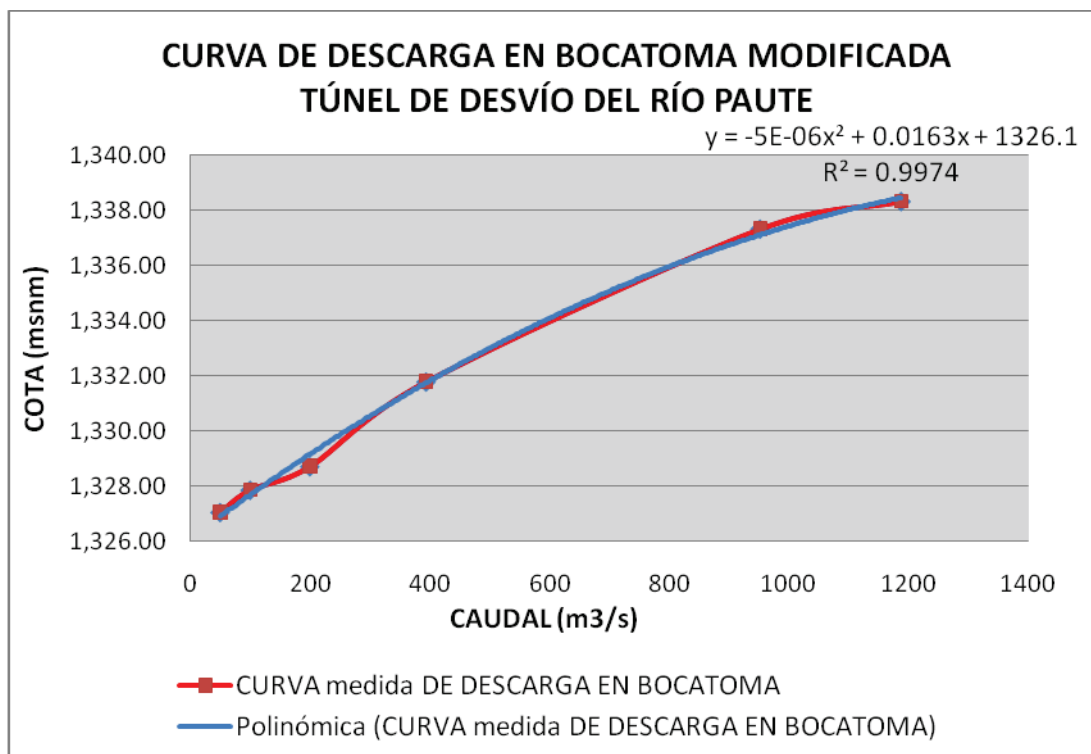
**Cuadro No. 44:** Valores medidos del caudal, de la carga sobre el umbral de fondo y de la cota de la superficie libre del agua en la aproximación al Túnel. Diámetro de entrada 11 m, en la sección inicial de la transición.

**BOCATOMA DEL TÚNEL DE DESVÍO**

<b>Q</b> <b>(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>H</b> <b>(m)</b>	<b>COTA</b> <b>(msnm)</b>
<i>Valores calibrados volumétricamente</i>		<i>Ref.: 1.326,00 msnm</i>
50,03	1,06	1.327,06
100,06	1,87	1.327,87
199,93	2,72	1.328,72
393,86	5,80	1.331,80
951,69	11,34	1.337,34
1.186,98	12,34	1.338,34

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Figura No. 29:** Curva de Descarga: Caudal vs. Cota de la superficie libre del agua sobre la cresta del umbral de fondo a la entrada del Túnel de Desvío (msnm). (Valores medidos y Curva calculada con ajuste de curva polinómica de segundo orden). Según las modificaciones realizadas en la Fase II.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Un resultado importante de esta serie de pruebas en el modelo físico constituye la mejor eficiencia de la estructura de entrada modificada y ensayada, que tiene la capacidad de conducir el caudal máximo de 1.130 m<sup>3</sup>/s con una cota de la superficie libre del agua igual a 1.338,13 msnm. De este modo, se tendría la posibilidad de mantener las condiciones de la cota máxima admisible en el curso natural del río Paute, para la cual fueron dimensionados el trazado y la sección transversal del Túnel de Desvío. En estas pruebas, no obstante, se observa que el Túnel de Desvío requiere de ventilación y aireación adicionales, desde la sección transversal inicial circular de diámetro 11 m, en el primer tramo de la transición asimétrica de diámetros, donde la pendiente es fuerte igual al 18%, para evitar el flujo con sección llena o la presencia de flujo intermitente a presión. En el proceso de análisis experimental de las modificaciones requeridas para

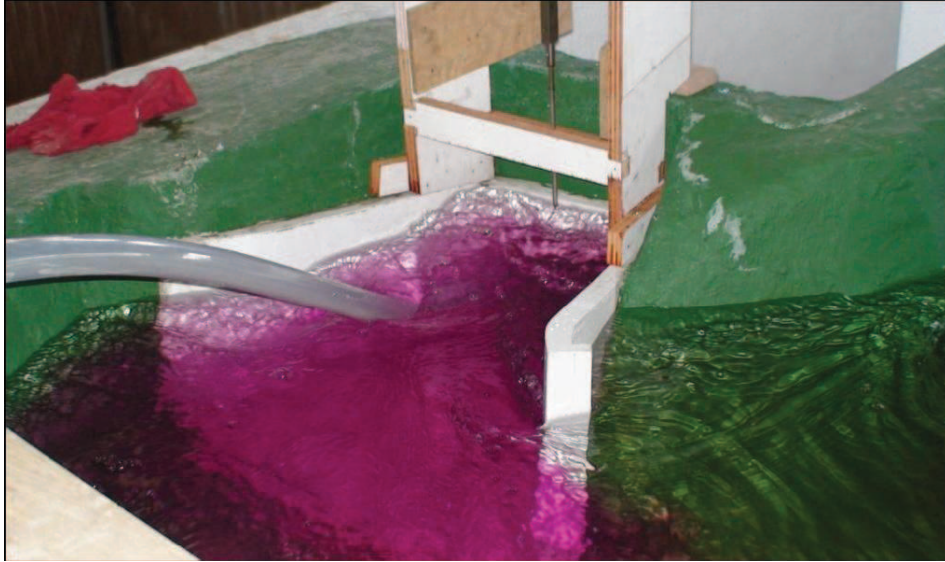
lograr el funcionamiento óptimo de la estructura de entrada, se ejecutaron pruebas con ventilación artificial en el modelo, por medio de la inserción de tubería plástica (manguera de 3 plg. de diámetro) orientada apropiadamente y de capacidad suficiente para proporcionar el volumen suficiente de aire al Túnel de Desvío. Posteriormente se colocó una tubería de aireación en la zona posterior a la boca de inicio del túnel como se observa en la fotografía No. 48.

**Fotografía No. 48:** Vista superior de la tubería PVC, de aireación al inicio de la transición del Túnel de Desvío.



En el registro fotográfico del Anexo No. 2B y en las siguientes Fotografías Nos. 49 a 51 se muestra el resultado positivo de la aireación artificial sobre el comportamiento del flujo al interior del Túnel de Desvío. En el diseño definitivo de la estructura de entrada, en consecuencia, se deben disponer de aireadores o estructuras de ventilación, en número y dimensiones suficientes, que garanticen el ingreso del volumen de aire requerido para mantener el flujo con superficie libre o a gravedad, a lo largo de todo el Túnel de Desvío.

**Fotografía No. 49:** Inserción de tubería plástica para proporcionar volumen de aire a lo largo del Túnel de Desvío.

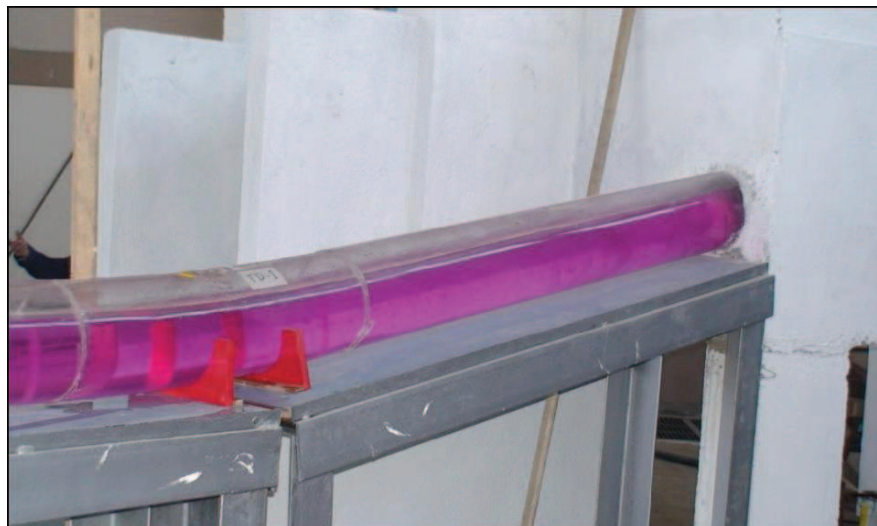


**Fotografía No. 50:** Ingreso de aire al Túnel de Desvío por medio de ventilación artificial.





**Fotografía No. 51:** Flujo en el Túnel de Desvío aguas abajo de la estructura de entrada (flujo con superficie libre), notablemente controlado por el ingreso de aire.



El comportamiento del flujo junto al estribo derecho y alrededor de esta estructura, notablemente mejorado con los cambios geométricos en planta, a lo largo de la vertical en su punto inicial y en su alineación, se muestra en la Fotografía No. 52; en la que se indica adicionalmente la modificación analizada para la geometría de las esquinas inferior y superior entre la sección transversal rectangular al inicio de la estructura de desvío y la sección transversal circular, con que se inicia el túnel.

**Fotografía No. 52:** Flujo en la zona de aproximación hacia la estructura de entrada al Túnel de Desvío, para  $Q \approx 200 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Sin embargo, como se observa en las Fotografías Nos. 53 a 56 durante las pruebas de esta segunda fase de ensayos expeditivos, aún con la modificación MB-2 en la geometría del estribo derecho, el flujo no alcanza las condiciones requeridas de uniformidad en su distribución horizontal y se siguen presentando ondulaciones asimétricas y relativamente grandes en el ingreso hacia la transición inicial del Túnel de Desvío. El flujo mantiene una fuerte contracción a pesar de los redondeamientos introducidos en las esquinas inferiores y superiores. No se consigue el cambio de dirección que requiere la masa de agua desde el cauce del río Paute hacia el Túnel de Desvío, mientras se ejerce una aceleración importante no sólo por el cambio de ancho en la sección transversal sino también por el cambio hacia la fuerte pendiente longitudinal. La aproximación que se observa en el flujo junto al estribo izquierdo es siempre de mejor calidad que en el estribo derecho. Sin embargo también existe un efecto de direccionamiento del flujo hacia la margen derecha, desde la zona de empate del estribo izquierdo con la topografía. Este efecto incrementa la formación de ondas asimétricas en la boca del túnel.

**Fotografía No. 53:** Flujo de aproximación y de ingreso en el modelo de la estructura de entrada al Túnel de Desvío. Se observa la presencia del flujo contraído por la configuración del estribo de la margen izquierda, para el caudal  $Q \approx 200 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Asimismo, la presencia de esta contracción en el ancho útil del flujo principal, conduce a que se inicie una perturbación en forma de onda superficial; la misma que, dadas las características de flujo supercrítico o rápido, es transportada hacia aguas abajo, en el interior y a lo largo de la transición en el tramo inicial del Túnel de Desvío. Esta perturbación se amplifica, como se muestra con las fotografías Nos. 54 a 56, siempre y cuando permanezca la geometría con el cambio brusco de sección rectangular a circular.

**Fotografía No. 54:** Flujo de aproximación y de ingreso en el modelo de la estructura de entrada al Túnel de Desvío para el caudal  $Q \approx 500 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se observa la mayor contracción del flujo principal desde el estribo derecho.





**Fotografía No. 55:** Flujo de ingreso hacia la estructura de entrada al Túnel de Desvío ( $Q \approx 500 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Se observa la contracción generada en el estribo de la margen derecha dando lugar a la perturbación en la sección inicial del Túnel de Desvío y el direccionamiento desde el estribo izquierdo hacia el derecho desde la zona de empate del estribo izquierdo con la topografía.



**Fotografía No. 56:** Flujo en la zona de aproximación a la estructura de entrada al Túnel de Desvío con el caudal máximo ensayado ( $Q \approx 1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ ). El efecto de la contracción por el estribo de la margen derecha es menor; existe, en cambio, la sobre-elevación en la entrada al Túnel de Desvío.

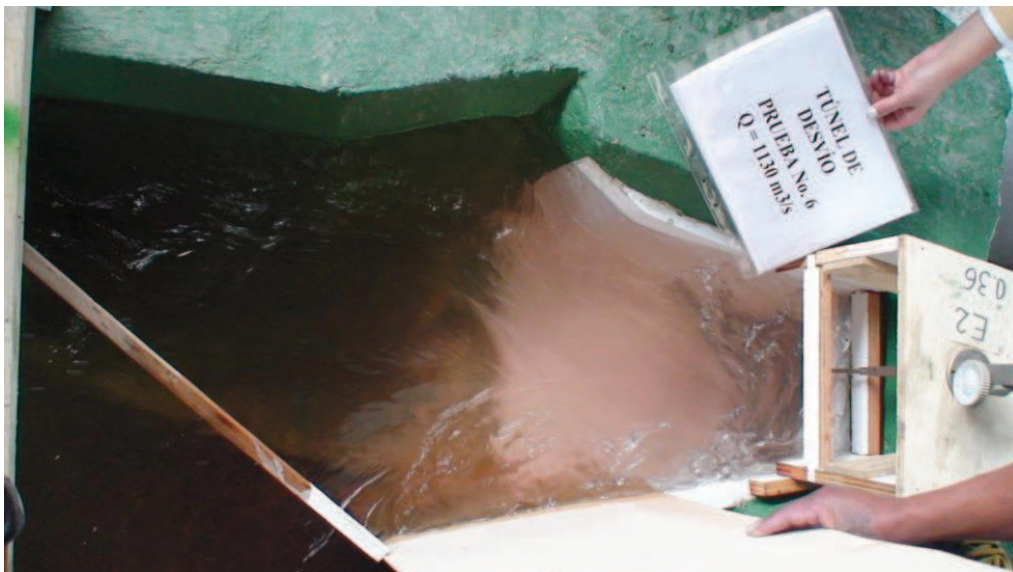


Para lograr el comportamiento apropiado y aceptable del flujo junto a la margen derecha, en esta zona de aproximación e inicial a la entrada de la bocatoma, se recomienda aprovechar las observaciones en el modelo a lo largo de la margen derecha, donde se logra eliminar las ondulaciones con la rectificación de la alineación en planta del estribo derecho.

**Fotografía No. 57:** Mejora en la calidad del flujo en el estribo derecho modificado, para  $Q= 500 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No.58:** Comportamiento del flujo mejorado, con la eliminación de la curvatura de la pared derecha de la estructura de entrada  $Q= 1.130 \text{ m}^3/\text{s}$





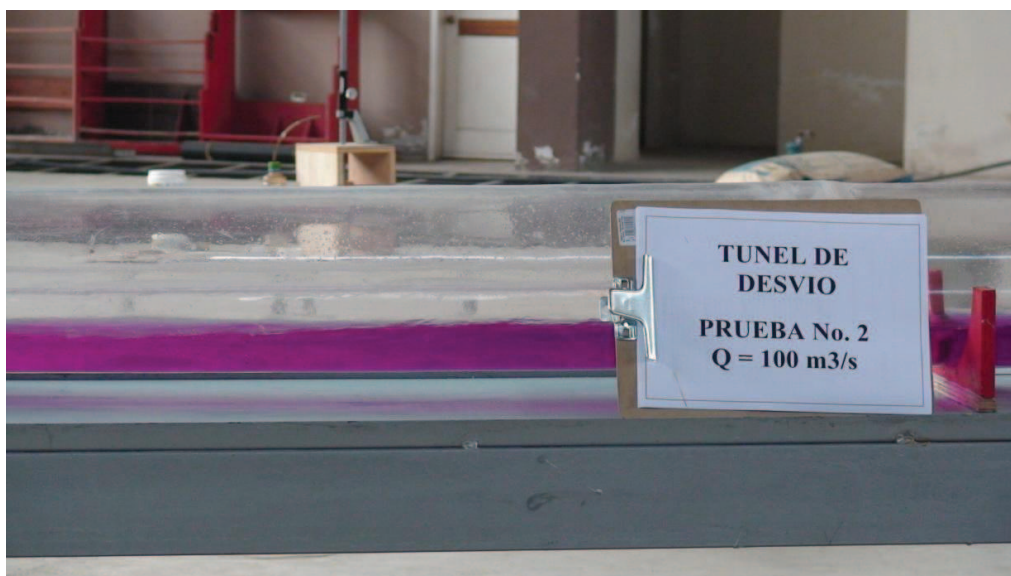
### 5.3.3.2 Análisis del flujo a lo largo del Túnel de Desvío. Fase II

Se realizaron las pruebas para la serie de los siguientes caudales: 50, 100, 200, 400 y 1.000 m<sup>3</sup>/s, valores referenciales expresados para el prototipo. En las siguientes Fotografías Nos. 59 a 63, se presentan las características del movimiento del agua al interior del Túnel de Desvío sin la influencia de la unión con el flujo de la Descarga Intermedia para los diferentes caudales ensayados.

**Fotografía No. 59:** Flujo a lo largo del Túnel de Desvío sin estructura de unión, para  $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tramo donde se ubicaba la estructura de unión con la Descarga Intermedia en el diseño original.



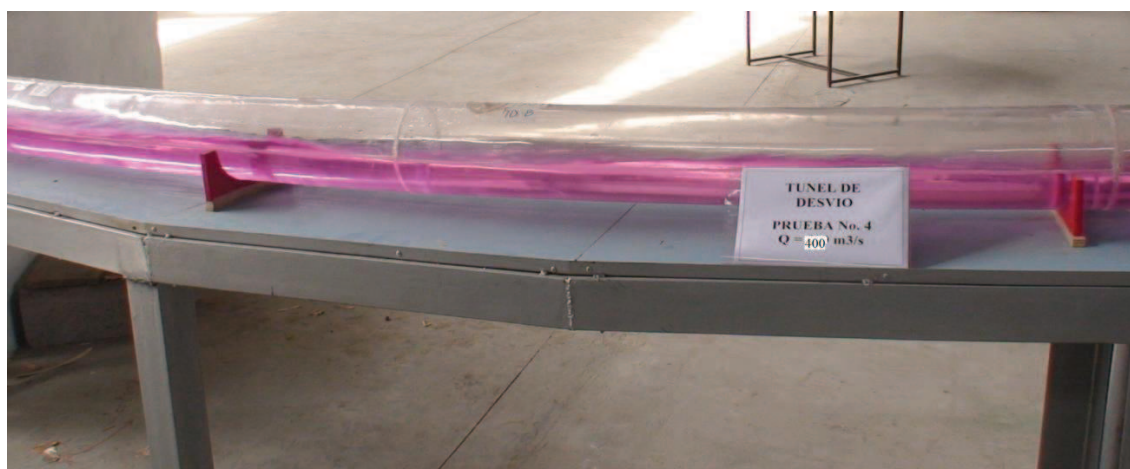
**Fotografía No. 60:** Flujo a lo largo del Túnel de Desvío sin estructura de unión, para  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tramo inmediato aguas abajo de la curva vertical.



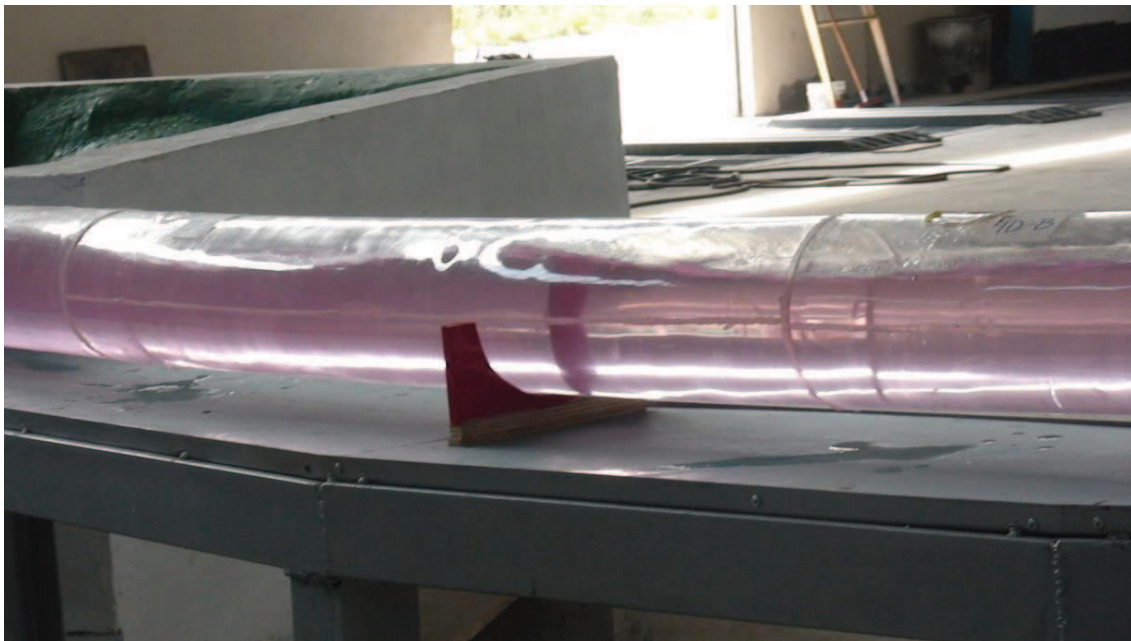
**Fotografía No. 61:** Flujo a lo largo del Túnel de Desvío sin estructura de unión, para  $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tramo inmediato aguas abajo del sitio donde estaba la estructura de unión en el diseño original. Se observa la presencia de ondas cruzadas generadas por el cambio de dirección en planta del túnel en la segunda curva.



**Fotografía No. 62:** Flujo en el Túnel de Desvío sin estructura de unión, para  $Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tramo correspondiente al desarrollo de la segunda curvatura del Túnel de Desvío.



**Fotografía No. 63:** Flujo a lo largo del Túnel de Desvío sin estructura de unión, para  $Q = 951,77 \text{ m}^3/\text{s}$ . Salida de la segunda curvatura del túnel. Se observa la presencia de ondas cruzadas cuyas amplitudes son más fuertes para los mayores caudales.



A continuación se muestran los perfiles de flujo medidos a lo largo del túnel de desvío, en forma tabular y en forma gráfica. Las secciones transversales de medición de profundidades son las mismas definidas en la Primera Fase de la Investigación y los valores registrados corresponden a las profundidades medias, sin considerar la presencia de las ondas cruzadas que se observan junto a las paredes interiores del túnel.

**Cuadro No. 45 (a):** Principales variables hidrodinámicas definidas para el flujo en el Túnel de Desvío, calculadas con la profundidad medida en el eje central del Túnel de Desvío, para la gama de caudales ensayados.

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 1 TUNEL DE DESVIO</b>									
Caudal TD (m <sup>3</sup> /s)=		50,03							
Diámetro (m)=		9,00							
Rugosidad absoluta (mm)=		0,60							
<b>Pto. medida</b>	<b><math>y</math> medido (m)</b>	<b><math>y/D</math></b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\lambda</math> prototipo</b>	<b><math>n</math> calculado</b>	<b><math>Fr</math> prototipo</b>	
TD-1	0,87	0,10	15,81	3,51E+07	2,70E-04	0,0234	0,0157	6,60	
TD-2	1,08	0,12	11,65	3,15E+07	2,20E-04	0,0222	0,0158	4,30	
TD-3	1,28	0,14	9,01	2,87E+07	1,80E-04	0,0213	0,0159	3,10	
TD-4	1,34	0,15	8,45	2,81E+07	1,80E-04	0,0211	0,0159	2,80	
TD-5	1,34	0,15	8,47	2,81E+07	1,80E-04	0,0211	0,0159	2,80	
TD-6	1,34	0,15	8,45	2,81E+07	1,80E-04	0,0211	0,0159	2,80	
TD-8	1,38	0,15	8,14	2,77E+07	1,70E-04	0,0210	0,0159	2,70	
TD-9	1,36	0,15	8,29	2,79E+07	1,70E-04	0,0210	0,0159	2,70	
n PROMEDIO EN TUNEL:							0,0159		

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Cuadro No. 45 (b):** Principales variables hidrodinámicas definidas para el flujo en el Túnel de Desvío, calculadas con la profundidad medida en el eje central del Túnel de Desvío, para la gama de caudales ensayados.

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 2 TUNEL DE DESVIO</b>									
Caudal TD (m <sup>3</sup> /s)=		100,06							
Diámetro (m)=		9,00							
Rugosidad absoluta (mm)=		0,60							
<b>Pto. medida</b>	<b>y<sub>medido</sub> (m)</b>	<b>y/D</b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b>λ<sub>prototipo</sub></b>	<b>n<sub>calculado</sub></b>	<b>Fr<sub>prototipo</sub></b>	
TD-1	1,25	0,14	18,75	5,83E+07	1,90E-04	0,0215	0,0159	6,50	
TD-2	1,61	0,18	12,94	5,09E+07	1,50E-04	0,0202	0,0160	3,90	
TD-3	1,74	0,19	11,62	4,89E+07	1,40E-04	0,0199	0,0161	3,40	
TD-4	1,77	0,20	11,34	4,84E+07	1,40E-04	0,0198	0,0161	3,30	
TD-5	1,90	0,21	10,21	4,65E+07	1,30E-04	0,0195	0,0161	2,80	
TD-6	1,93	0,21	9,04	4,62E+07	1,30E-04	0,0195	0,0161	2,80	
TD-8	2,07	0,23	9,45	4,44E+07	1,20E-04	0,0192	0,0162	2,40	
TD-9	2,01	0,22	8,29	4,52E+07	1,20E-04	0,0193	0,0161	2,50	
η PROMEDIO EN TUNEL:							0,0161		

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara



**Cuadro No. 45 (c):** Principales variables hidrodinámicas definidas para el flujo en el Túnel de Desvío, calculadas con la profundidad medida en el eje central del Túnel de Desvío, para la gama de caudales ensayados.

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 3 TUNEL DE DESVIO</b>									
Caudal TD (m <sup>3</sup> /s)=		199,93							
Diámetro (m)=		9,00							
Rugosidad absoluta (mm)=		0,60							
<b>Pto. medida</b>	<b>Y medido (m)</b>	<b>y/D</b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\lambda</math> prototipo</b>	<b><math>n</math> calculado</b>	<b><math>Fr</math> prototipo</b>	
TD-1	1,78	0,20	22,43	9,64E+07	1,40E-04	0,0198	0,0161	6,40	
TD-2	1,90	0,21	20,39	9,30E+07	1,30E-04	0,0195	0,0161	5,60	
TD-3	2,22	0,25	16,38	8,55E+07	1,10E-04	0,0189	0,0162	4,20	
TD-4	2,34	0,26	15,23	8,31E+07	1,10E-04	0,0187	0,0162	3,80	
TD-5	2,35	0,26	15,14	8,29E+07	1,10E-04	0,0187	0,0163	3,70	
TD-6	2,43	0,27	14,43	8,13E+07	1,10E-04	0,0185	0,0163	3,50	
TD-8	2,52	0,28	13,71	7,97E+07	1,00E-04	0,0184	0,0163	3,30	
TD-9	2,55	0,28	13,49	7,92E+07	1,00E-04	0,0184	0,0163	3,20	
n PROMEDIO EN TUNEL:						0,0162			

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara



**Cuadro No. 45 (d):** Principales variables hidrodinámicas definidas para el flujo en el Túnel de Desvío, calculadas con la profundidad medida en el eje central del Túnel de Desvío, para la gama de caudales ensayados.

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 4 TUNEL DE DESVIO</b>									
Caudal TD (m <sup>3</sup> /s)=		393,86							
Diámetro (m)=		9,00							
Rugosidad absoluta (mm)=		0,60							
<b>Pto. medida</b>	<b>y medido (m)</b>	<b>y/D</b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\lambda</math> prototipo</b>	<b><math>n</math> calculado</b>	<b><math>Fr_{prototipo}</math></b>	
TD-1	3,26	0,36	18,96	1,36E+08	7,90E-05	0,0175	0,0165	3,91	
TD-2	3,51	0,39	17,15	1,30E+08	7,80E-05	0,0173	0,0165	3,38	
TD-3	3,58	0,40	16,73	1,28E+08	7,50E-05	0,0173	0,0165	3,27	
TD-4	3,82	0,42	15,34	1,23E+08	7,30E-05	0,0171	0,0166	2,88	
TD-5	3,93	0,44	14,76	1,21E+08	7,20E-05	0,0170	0,0166	2,72	
TD-6	3,96	0,44	14,63	1,21E+08	6,80E-05	0,0170	0,0166	2,69	
TD-8	4,41	0,49	12,72	1,13E+08	6,70E-05	0,0167	0,0167	2,19	
TD-9	4,39	0,49	12,77	1,13E+08	6,70E-05	0,0167	0,0167	2,20	
<b><math>n</math> PROMEDIO EN TUNEL:</b>							<b>0,0166</b>		

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

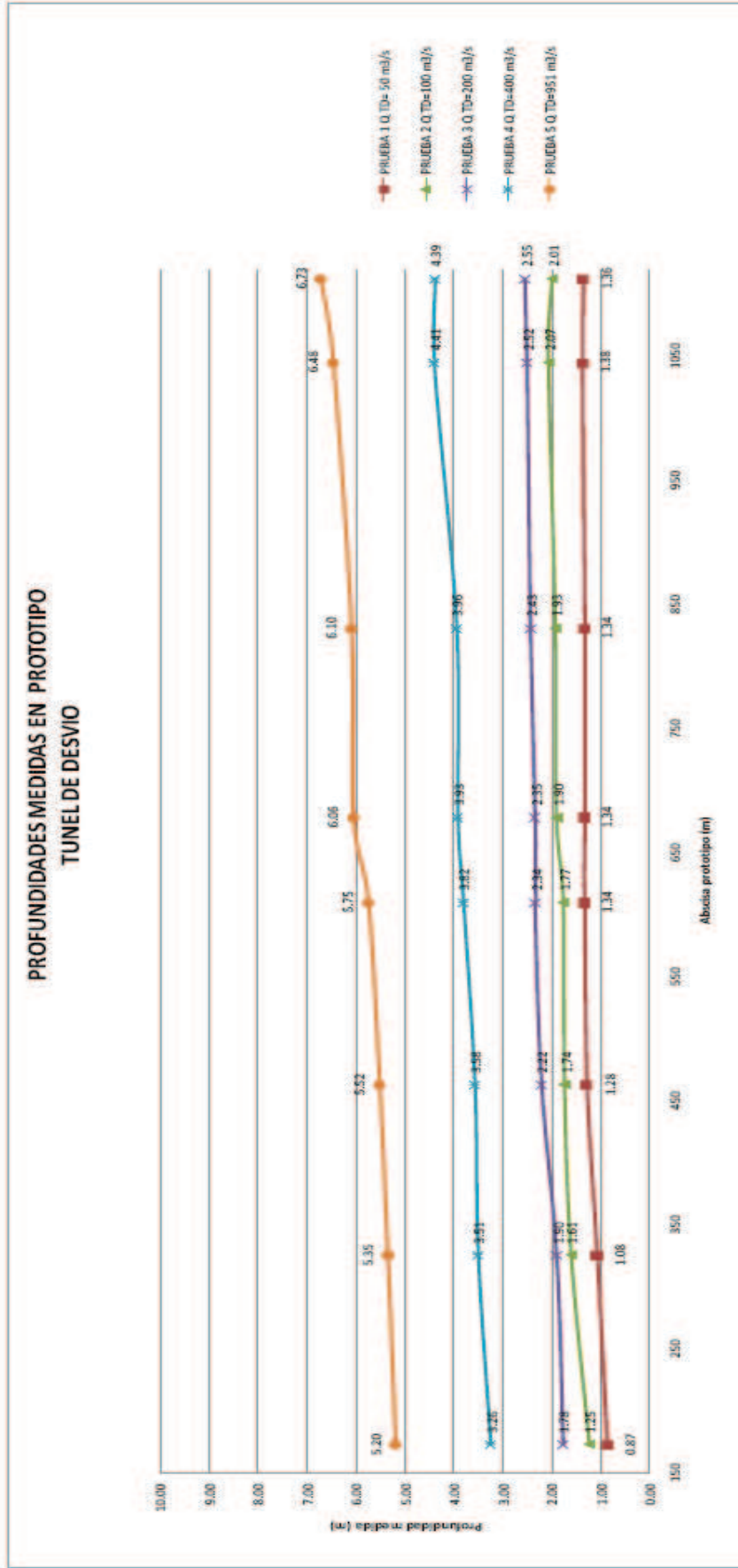
**Cuadro No. 45:** Principales variables hidrodinámicas definidas para el flujo en el Túnel de Desvío, calculadas con la profundidad medida en el eje central del Túnel de Desvío, para la gama de caudales ensayados.

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 5 TUNEL DE DESVIO</b>									
Caudal TD (m <sup>3</sup> /s)=		951,77							
Diámetro (m)=		9,00							
Rugosidad absoluta (mm)=		0,60							
<b>Pto. medida</b>	<b>y medido (m)</b>	<b>y/D</b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\Lambda</math> prototipo</b>	<b><math>n</math> calculado</b>	<b><math>Fr</math> prototipo</b>	
TD-1	5,20	0,58	25,02	2,45E+08	6,10E-05	0,0163	0,0168	3,90	
TD-2	5,35	0,59	24,18	2,40E+08	6,00E-05	0,0163	0,0168	3,70	
TD-3	5,52	0,61	23,25	2,35E+08	5,90E-05	0,0162	0,0168	3,40	
TD-4	5,75	0,64	22,19	2,28E+08	5,80E-05	0,0162	0,0168	3,20	
TD-5	6,06	0,67	20,91	2,20E+08	5,70E-05	0,0161	0,0168	2,90	
TD-6	6,10	0,68	20,75	2,20E+08	5,60E-05	0,0161	0,0168	2,80	
TD-8	6,48	0,72	19,42	2,19E+08	5,50E-05	0,0160	0,0168	2,50	
TD-9	6,73	0,75	18,66	2,03E+08	5,50E-05	0,0160	0,0168	2,30	
n PROMEDIO EN TUNEL:							0,0168		

La ubicación de los puntos de medida se encuentra especificada en el plano No. 9-M, Anexo No. 1.

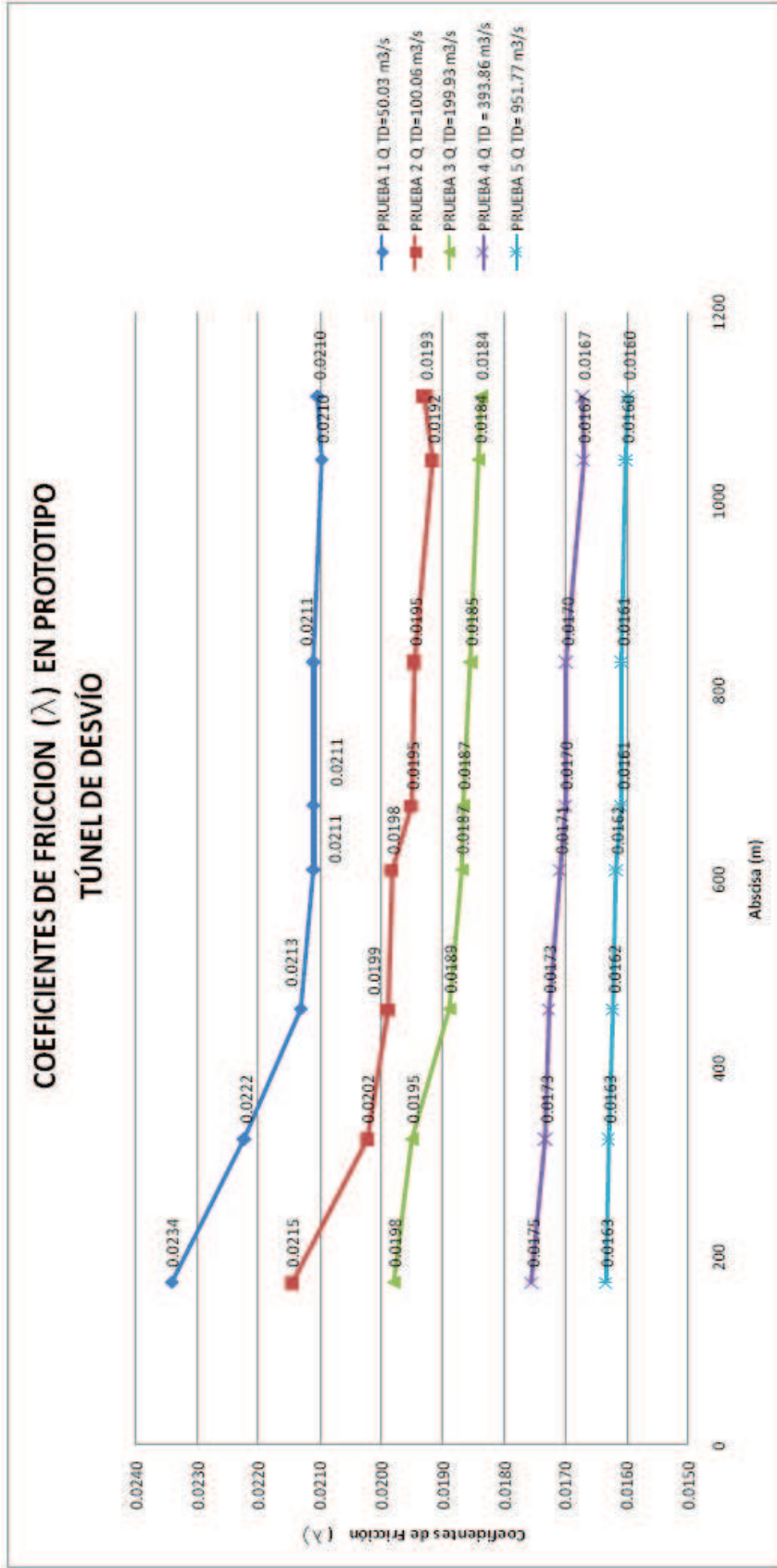
Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Figura No. 30: Perfiles de Flujo medidos a lo largo del Túnel de Desvío sin la estructura de empate.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

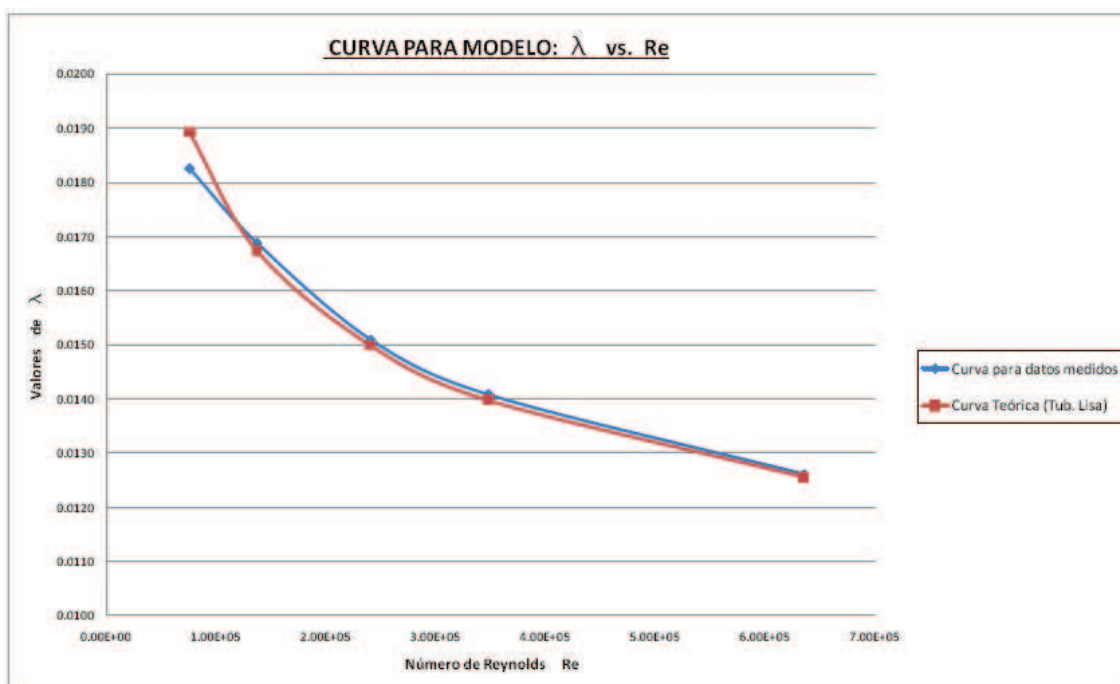
Figura No. 31: Coeficientes de fricción ( $\lambda$ ) medidos a lo largo del Túnel de Desvío sin la estructura de empate.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Los valores de coeficientes de resistencia al flujo calculados, a lo largo del Túnel de Desvío varían proporcionalmente con el caudal. Considerando una rugosidad absoluta de 0,6 mm, se calculan valores variables de  $n$ .

**Figura No. 32:** Gráfica comparativa entre las curvas: Curva teórica para tubería lisa y Curva con datos medidos en modelo,  $\lambda$  - (Re).



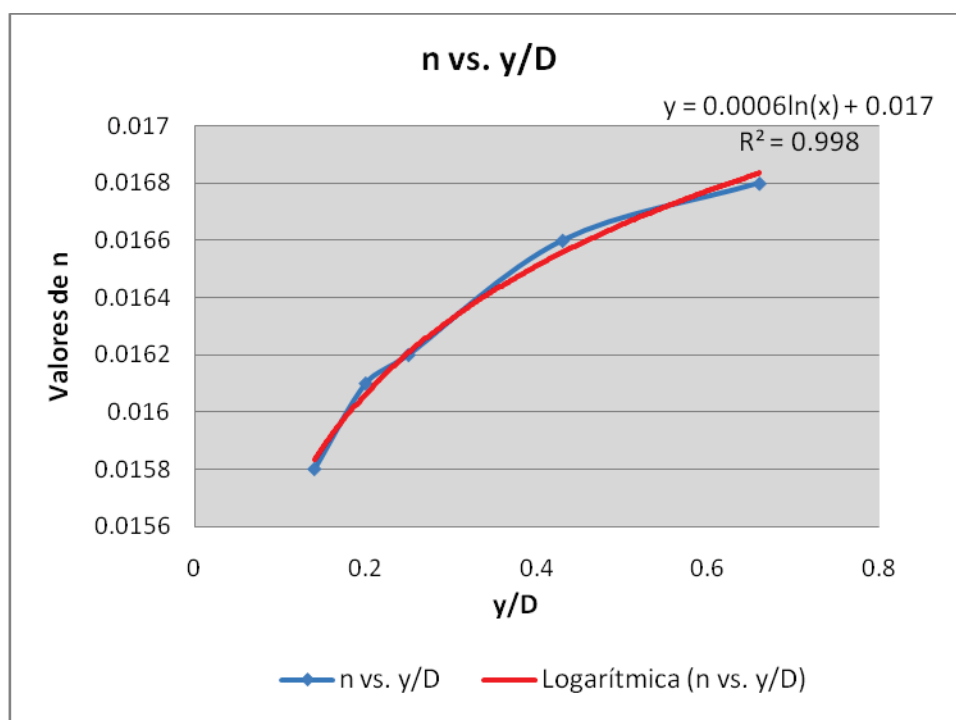
Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Las tendencias observadas en la figura anterior ratifican las observaciones anotadas con respecto al comportamiento liso del modelo, siempre que sea válido el valor de rugosidad absoluta adoptada en el diseño original. Adicionalmente se concluye que los valores del coeficiente de fricción tanto en modelo,  $\lambda_m$ , como en prototipo,  $\lambda_p$ , no son constantes para toda la gama de caudales de operación. En el caso del Túnel de Desvío, con una geometría circular de la sección transversal, se observa que el valor de  $\lambda$  disminuye con el aumento de la relación de llenado, en prototipo.

**Cuadro No. 46:** Valores del coeficiente de rugosidad  $n$  en prototipo.

$Q$ ( $m^3/s$ )	$y/D$	$Re_{proto}$	$n_{proto}$
50,03	0,14	2,93E+07	0,0158
100,06	0,20	4,86E+07	0,0161
199,93	0,25	8,51E+07	0,0162
393,86	0,43	1,23E+08	0,0166
951,77	0,66	2,24E+08	0,0168

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Figura No. 33:** Variación del coeficiente de rugosidad  $n$  con la relación de llenado en prototipo.

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Los resultados obtenidos muestran que el valor del coeficiente de rugosidad  $n$  de la ecuación de Manning no es un valor constante para la gama de caudales de operación. En el Túnel de Desvío, cuya sección transversal es circular y opera parcialmente llena, se observa que el valor del coeficiente de rugosidad crece con

el incremento del caudal o de la relación de llenado. Los valores obtenidos son, en todos los casos, mayores al valor constante 0,014 adoptado en el diseño original. Para los caudales altos, mayores a  $800 \text{ m}^3/\text{s}$ , se tiene un valor igual a 0,0168, que corresponde a un incremento aproximado del 20% con respecto al valor adoptado en el diseño. En cambio para los caudales bajos, menores a  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , el valor de  $n$  obtenido es igual a 0,0158, es decir un 12% mayor que el valor constante de  $n$  adoptado en el diseño. Luego de analizar y comparar los perfiles de flujo a lo largo del Túnel de Desvío obtenidos en los ensayos realizados en la primera fase y los realizados en la presente segunda fase, se concluye:

- i. Con la eliminación de la estructura de unión, la calidad del flujo a lo largo del Túnel de Desvío mejora notablemente. Se observa siempre la formación de ondas cruzadas en los cambios de dirección en planta, pero ya no existe la alteración violenta del flujo, observada por la falta de contornos laterales en la estructura de unión entre los dos túneles.
- ii. Comparando los perfiles de flujo y tomando como referencia puntos de medición de profundidades de flujo antes y después de la sección transversal de unión de los Túneles de Desvío y Descarga Intermedia, *sin la estructura de unión y para un caudal alto ( $\approx 950 \text{ m}^3/\text{s}$ )*, se observa que el flujo es más uniformemente distribuido y estable.
- iii. Sin la estructura de unión, el flujo presenta menos turbulencia y fluctuaciones en la superficie libre. El tramo de salida y de aguas abajo de la segunda curvatura en planta del Túnel de Desvío, presenta la formación de ondas cruzadas. Sin embargo la calidad del flujo a superficie libre es mucho mejor que la observada con el diseño original luego de la estructura de unión.
- iv. A lo largo del flujo en el Túnel de Desvío se observa la presencia de ondas cruzadas desde la transición inicial hasta su descarga en la estructura de salida. En el primer tramo desde el inicio del túnel, incluyendo la curva vertical hasta antes del ingreso hacia la primera curvatura en planta, la

presencia de ondas cruzadas es menor y es función de la asimetría en el flujo observado en la estructura de entrada. A lo largo de la primera curva en planta se observa la presencia de las ondas cruzadas con mayor definición que se mantienen hasta el inicio de la segunda curvatura en planta. En ésta las ondas se amplifican, debido a la superposición del efecto de este segundo cambio de dirección del flujo rápido, de tal manera que en el corto tramo recto previo a la salida del túnel se observan ondas con amplitudes importantes, cuyo resultado es la asimetría en el flujo de descarga en la estructura de disipación de energía. Para caudales mayores a los  $950 \text{ m}^3/\text{s}$ , la presencia de estas ondas cruzadas reduce el bordo libre, siendo crítico en el tramo final del Túnel de Desvío desde la segunda curvatura hacia la salida.

- v. El bordo libre observado para el tránsito del caudal de diseño en el tramo que se desarrolla desde la segunda curvatura en planta hasta el inicio de la estructura de salida, aparece como muy reducido, considerando de manera particular el rango de velocidades del flujo, que exige a su vez el transporte de grandes volúmenes de aire. Un bordo libre inferior al 20% del diámetro del túnel sería inadmisibles por la característica de flujo rápido y por la presencia de ondas cruzadas provocadas por los cambios de alineación.
- vi. En la salida del Túnel de Desvío se mantiene una concentración del flujo hacia el lado izquierdo, debido principalmente al efecto de la segunda curvatura en planta, muy próxima a la sección de descarga.
- vii. Para los caudales superiores a los  $950 \text{ m}^3/\text{s}$  y ausencia de ventilación en la entrada de la estructura de desvío, se observa que el flujo llena la sección transversal del túnel. Este ya no opera con flujo a superficie libre. Tan pronto como se introduce la ventilación en la zona de inicio del Túnel de Desvío, el flujo recupera su condición de escurrimiento a superficie libre.



**Fotografía No. 64:** Introducción de manguera de ventilación en la estructura de entrada para caudal superior a  $950 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Fotografía No. 65:** Introducción de manguera de ventilación en la transición del Túnel de Desvío para caudal superior a  $950 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Fotografía No. 66:** Flujo a superficie libre por introducción de aire en la estructura de entrada para caudal superior a  $950 \text{ m}^3/\text{s}$ .



## **5.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VARIANTES.**

### **5.4.1 CONCLUSIONES**

#### **5.4.1.1 Sobre la Fase I de la investigación**

- ❖ La geometría ensayada de la pila o estribo derecho origina una asimetría del flujo en la zona de entrada. Esta perturbación es rápidamente amortiguada por el flujo supercrítico del primer tramo del Túnel de Desvío con pendiente del 18 % y desaparece hacia aguas abajo.

- ❖ La sección transversal circular seleccionada para el Túnel de desvío se muestra eficiente, hasta los caudales ensayados ( $Q_{\text{máx.}} \text{ ensayado} \sim 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Se observa que la tendencia a inestabilidad del flujo, es menor para los caudales más altos y mayor para los caudales bajos. Las mayores perturbaciones de la superficie libre del agua obedecen a:
  - (i) La geometría de la estructura de unión con la Descarga Intermedia.
  - (ii) En menor grado, por la presencia de las curvas verticales y horizontales en el trazado del Túnel de Desvío.
  
- ❖ El Túnel de Desvío opera siempre con superficie libre en el tramo de la pendiente igual al 2%, que se encuentra hacia aguas arriba de la estructura de unión con la Descarga Intermedia. El transporte de aire se muestra garantizado a lo largo del túnel y en la estructura de unión debido a la presencia de los ductos de ventilación existentes en el modelo y de la ventana de empate con la Descarga Intermedia. No se observa la presencia de “slug flow” o la tendencia a cambios violentos del caudal “caudal pulsatorio” por deficiencia en la cantidad de aire al interior del conducto.
  
- ❖ La calidad del flujo al interior del Túnel de Desvío se deteriora total y gravemente a partir de la estructura de unión y en el tramo hacia aguas abajo debido a:
  - (i) La geometría existente en el empate.
  - (ii) Por la confluencia de dos flujos supercríticos del Túnel de Desvío y de la Descarga Intermedia.
  
- ❖ En el tramo final del Túnel de Desvío, antes de la descarga al dissipador de energía, la sección transversal circular resulta insuficiente para los caudales máximos como consecuencia de la presencia de la estructura tipo Kumin.

- ❖ La geometría ensayada de las paredes del cimacio en el vertedero de ingreso al túnel de Descarga Intermedia, que es una geometría convergente, origina la presencia de ondas cruzadas, que son amortiguadas a lo largo del canal rectangular de pendiente fuerte. Este tipo de perturbaciones es rápidamente amortiguado por el flujo supercrítico ( $4 < Fr < 10$ ) del primer tramo del túnel y desaparece hacia aguas abajo.
- ❖ La sección transversal tipo baúl, con la forma rectangular en la base, seleccionada para la Descarga Intermedia, presenta la tendencia temprana de flujo inestable y bajo amenaza de cavitación. La pendiente longitudinal del orden del 20 % resulta muy fuerte.
- ❖ Las mayores perturbaciones de la superficie libre del agua obedecen a la geometría en planta de las paredes de la transición o canal sobre el cimacio.
- ❖ Para la operación únicamente de la Descarga Intermedia se tiene que el flujo supercrítico desciende en el interior del Túnel de Desvío con relaciones de llenado bajas, menores al 50%. Luego de su ingreso en la estructura de unión con el Túnel de Desvío se observa un flujo muy perturbado, con mayor presencia de ondas cruzadas de amplitudes más grandes, que se mantiene en el tramo inferior del Túnel de Desvío hasta el dissipador de energía. Para la gama de caudales ensayados bajo esta condición,  $Q \leq 200 \text{ m}^3/\text{s}$ , no se registran, sin embargo graves fluctuaciones del flujo principal desde una margen hacia la otra; el flujo presenta en todos los casos relaciones de llenado bastante bajas, por lo que la presencia de ondas cruzadas no resulta crítica.
- ❖ Para la gama de caudales ensayados en la Descarga Intermedia, el flujo al pie del vertedero tipo Creager se inicia con la presencia de ondas cruzadas bien definidas que desaparecen en el tramo inferior antes de la curva vertical. El flujo que ingresa a la estructura de unión ya no las presenta.

#### 5.4.1.2 Sobre la Fase II de la investigación.

- ❖ Con la estructura de entrada modificada aumenta la capacidad de conducir un caudal máximo de  $1.130 \text{ m}^3/\text{s}$  y se mejoran las condiciones de flujo. Se obtuvo resultados positivos en el comportamiento del flujo, mediante la introducción de mangueras para aireación, por lo que se requiere estructuras de ventilación. El flujo mejora notablemente con la modificación de la pared y del estribo derecho, permitiendo la uniformización del flujo.
- ❖ El flujo en la aproximación y al interior del túnel es estable y totalmente aireado si se mantiene la geometría de la transición en el tramo inicial del Túnel de Desvío, desde el diámetro 11 m hasta el diámetro 9 m, en una longitud de 55 m. Esta estructura de transición entre la sección rectangular a la entrada y la sección circular del túnel, debe incluir una ranura o ventana de aireación como la ensayada en el modelo, que garantice el ingreso del caudal de aire necesario para ventilar todo el túnel y asegurar un flujo a superficie libre.
- ❖ El desarrollo del flujo de aproximación y al interior del Túnel de Desvío es satisfactorio para la gama de caudales ensayados, si se mantiene el diámetro de 11 m para la sección transversal circular inicial en el Túnel de Desvío.
- ❖ La modificación en la configuración en planta del estribo de la margen derecha en la zona de aproximación a la bocatoma del Túnel de Desvío conduce a mantener un flujo libre de contracciones y con la superficie libre estable, evitando el origen de ondulaciones en el interior del túnel.
- ❖ La presencia de las curvaturas en planta dentro de la alineación del Túnel de Desvío provoca la formación de ondas cruzadas. Se recomienda incrementar el radio de curvatura del segundo cambio de dirección del

túnel y si es posible incrementar también la longitud del tramo recto previo a la salida del túnel.

- ❖ El diámetro de la sección circular del Túnel de Desvío es suficiente para el tránsito del caudal de diseño en el tramo con pendiente longitudinal del 2%. La presencia de ondas cruzadas reduce el bordo libre, en el tramo final del túnel. Se recomienda revisar el dimensionamiento del túnel para garantizar la ventilación adecuada en este tramo y la presencia de un bordo libre suficiente para el caudal de diseño.
- ❖ El rediseño del túnel de Descarga Intermedia, tanto en su implantación como en su geometría transversal, deberá ser realizado tomando en consideración las observaciones del flujo en el Túnel de Desvío.

## 5.4.2 RECOMENDACIONES

### 5.4.2.1 Sobre la Fase I de la investigación.

Se proponen las siguientes modificaciones imprescindibles al diseño hidráulico original del Túnel de Desvío y Descarga Intermedia, de tal modo que las estructuras puedan llegar a satisfacer los requerimientos técnicos:

- ❖ Ampliación del diámetro del 9,20 m en la sección de entrada del Túnel de Desvío. El diseño y dimensionamiento de la boca de entrada al Túnel de Desvío que se seleccione para la fase de ensayos con la variante definitiva, depende de la cota máxima de la superficie libre del agua, que pueda admitirse sobre la sección del umbral de fondo en la estructura de toma. La ampliación deberá garantizar que el nivel del agua en la estructura no sobrepase la cota 1.341 msnm prevista en los diseños de las obras.
- ❖ Modificación de las pilas laterales o estribos de la bocatoma. En particular, se requiere modificar la geometría del estribo de la margen derecha, donde se origina un importante flujo de separación.



- ❖ Cambio de la estructura de empate entre el Túnel de Desvío y la Descarga Intermedia. Se propone analizar las posibilidades, en su orden:
  - Separación de los dos flujos supercríticos para dos descargas diferentes hacia el río Paute, en cuyo caso se garantiza una mejor calidad de flujo en todo el Túnel de Desvío y Descarga Intermedia, incluyendo además una mejora en el flujo de aproximación hacia el dissipador de energía.
  - Mantener la confluencia de las descargas supercríticas cambiando la geometría de la estructura de unión de tal forma que se mantenga el confinamiento del flujo en el Túnel de Desvío hasta caudales del orden de los  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ , con lo que se lograría evitar la grave perturbación en toda la gama de caudales de operación de esta estructura, aceptándose únicamente la formación de ondas para el rango de caudales mayor a  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ . Esta segunda propuesta deberá complementarse incrementando el diámetro del tramo de aguas abajo del Túnel de Desvío, para evitar la obturación observada por el choque de los flujos. La unión de la Descarga Intermedia debería entonces elevarse al menos  $4,50 \text{ m}$  sobre el fondo del Túnel de Desvío, debiéndose considerar el impacto de este flujo para los eventos en que el túnel no opere.
- ❖ Optimización de la curvatura en planta de las paredes laterales del canal sobre el cimacio del vertedero al inicio de la Descarga Intermedia. La geometría óptima debe ser definida para el caudal de diseño de  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- ❖ De ser posible, disminuir la pendiente longitudinal de la Descarga Intermedia hasta que el Froude característico sea menor que el Froude crítico para flujo inestable.

#### 5.4.2.2 Sobre la Fase II de la investigación.

Para la Fase de Ensayos con el Diseño Definitivo de las Obras, se recomiendan los siguientes cambios en la geometría de la estructura de entrada al Túnel de Desvío:

- ❖ Mantener la modificación en la geometría y dimensionamiento de la boca de entrada al Túnel de Desvío.
- ❖ Modificar la geometría de la transición inicial.
- ❖ Modificar la alineación y la geometría de los dos estribos.
- ❖ Ampliar la plataforma de ingreso hacia el Túnel de Desvío.
- ❖ Disponer de la ranura de ventilación.
- ❖ Para la Fase de Ensayos con el Diseño Definitivo de las Obras, se recomiendan los siguientes cambios en la geometría:
  - Modificar el trazado en planta del Túnel de Desvío, para la separación de la Descarga Intermedia.
  - Modificar el perfil longitudinal del Túnel de Desvío, para posibilitar el cambio en la transición de entrada y en la cota a la salida de la estructura.
  - Modificar el tramo final, cerca de la estructura de disipación de energía



## **CAPÍTULO 6**

### **ESTUDIO DE VARIANTES**

El diseño modificado para la Fase III de la investigación presenta cambios importantes en su geometría tanto en la sección transversal como en el trazado y perfil de los túneles independientes, de acuerdo a las recomendaciones planteadas en base a los resultados obtenidos en las Fases I y II de la investigación experimental, razón por la cual se requiere de la reconstrucción del modelo físico.

#### **6.1 DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES EN EL MODELO FÍSICO.**

##### **6.1.1 DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES EN EL TÚNEL DE DESVÍO**

El Túnel de Desvío está conformado por la estructura de entrada, el túnel propiamente dicho y la estructura de salida. A continuación se describe la geometría de cada una de las partes principales.

Las modificaciones realizadas en la estructura de entrada para la Fase III corresponden a las siguientes:

- i. Cambio de geometría en la sección de entrada al Túnel de Desvío.
- ii. Eliminación de la curvatura en planta del estribo derecho. Modificación de la forma del estribo en su extremo aguas arriba, además se introduce una variación de su longitud y su altura.
- iii. Eliminación de la curvatura en planta y aumento de la longitud del estribo izquierdo. Modificación de la topografía de la margen izquierda del tramo inmediato de aguas arriba del estribo izquierdo.

- iv. Adición de una ranura de ventilación en la parte superior y frontal de la estructura de entrada para garantizar la aireación del flujo en todo el desarrollo del Túnel de Desvío.

#### **6.1.1.1 Descripción de la geometría de la Estructura de Entrada al Túnel de Desvío planteada para la Fase III.**

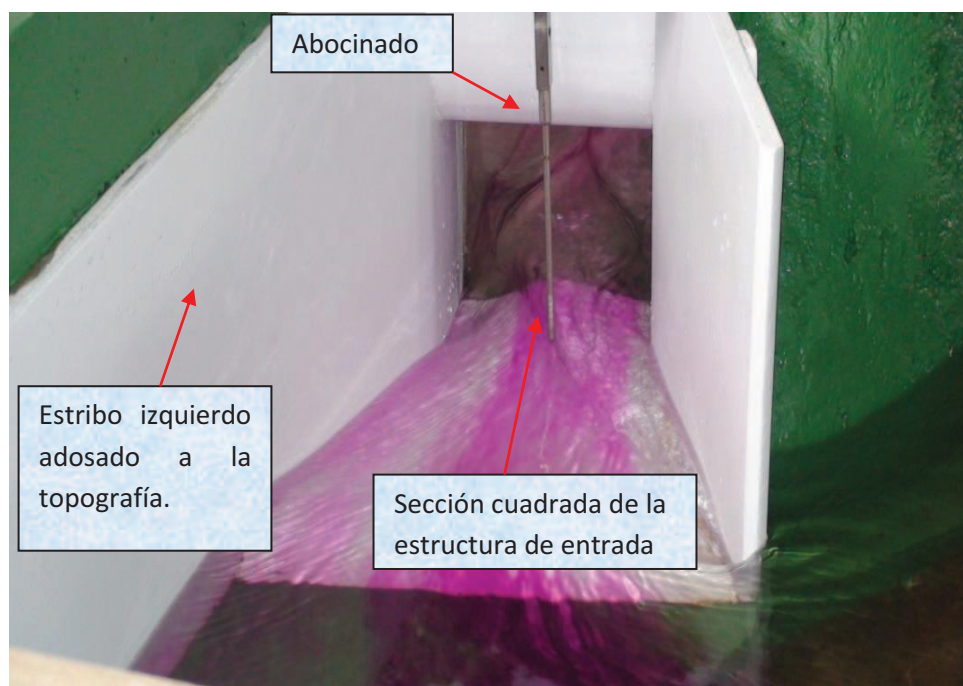
La estructura de entrada al Túnel de Desvío se inicia con una plataforma de aproximación que se desarrolla junto a la margen izquierda del río Paute. Su implantación ocupa una sección trapezoidal con un desarrollo longitudinal de 24,55 m. En el extremo aguas arriba de la plataforma de aproximación se tiene un ancho de 6,21 m y en su extremo final frente a la boca de entrada tiene un ancho de 15,90 m. El eje de la plataforma de aproximación forma un ángulo de 19,13 grados con el eje del río en el tramo de derivación. La cota de inicio de esta plataforma corresponde a 1.325,56 msnm y se desarrolla con una pendiente en el sentido de flujo de 2,5 %, de tal manera que la cota al ingreso al túnel es la 1.324,89 msnm. A 25,40 m aguas arriba de la sección de entrada al Túnel de Desvío se ha ubicado un umbral que ocupa todo el ancho de la plataforma. La cresta del umbral se ubica en la cota 1.326,0 msnm.

Los estribos laterales de la estructura de entrada tienen una implantación recta, siguiendo los contornos laterales de la plataforma de aproximación. El estribo derecho tiene una longitud variable con la altura, desarrollándose 24,90 m medidos desde la boca de entrada hacia aguas arriba, para la cota inferior que coincide con la plataforma, y 27,70 m de longitud en la cota máxima de este estribo que corresponde a 1.343,0 msnm. El estribo izquierdo presenta también una alineación recta que se desarrolla adosado a la topografía modificada de la margen izquierda del río Paute. La longitud de desarrollo de este estribo es de aproximadamente 55,42 m, mayor que la del estribo derecho y su cota de coronación es la misma que la del estribo derecho.

La geometría del extremo de aguas arriba del estribo derecho está conformada por dos radios de curvatura iguales que se cortan simétricamente. Los radios que definen la geometría del extremo del estribo derecho son iguales a 0,89 m.

La sección inicial del Túnel de Desvío presenta una forma cuadrada con dimensiones de 10 m x 10 m. El contorno inferior de esta sección se ubica en la cota 1.320,87 msnm. En la parte superior de esta sección se ha dispuesto una pared vertical que se empata con la misma mediante un redondeamiento, conformando un abocinado. Lateralmente las paredes son verticales, como se observa en la siguiente Fotografía No. 67.

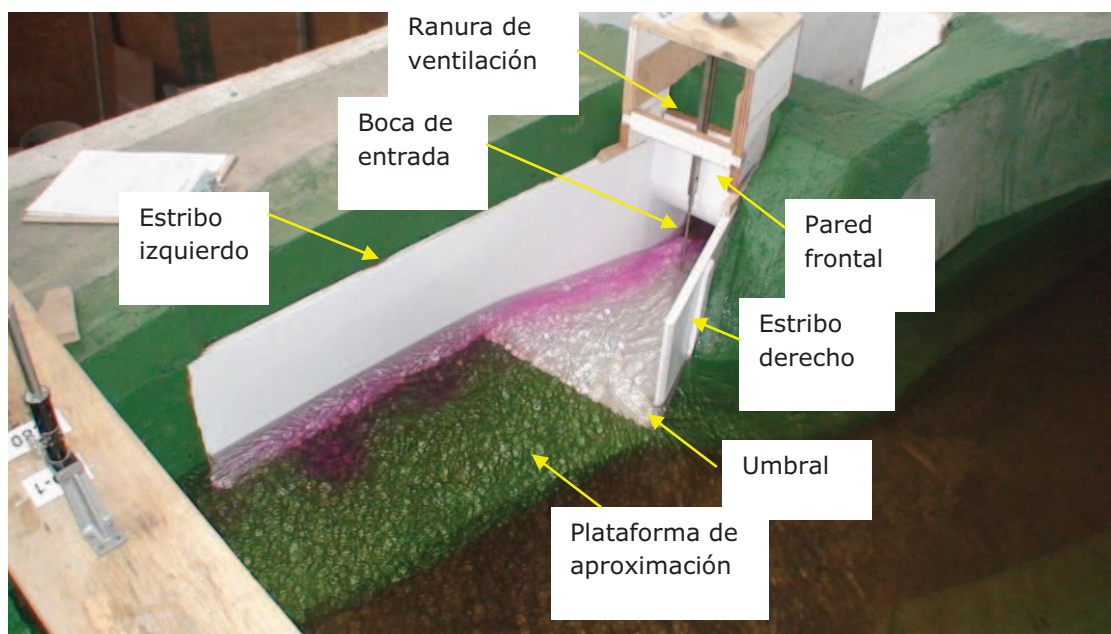
**Fotografía No. 67:** Vista frontal de la estructura de entrada con la sección transversal de entrada de forma cuadrada.



Para unir la boca de entrada del Túnel de Desvío con el tramo de aguas abajo, cuya sección transversal es circular con diámetro de 9 m se ha dispuesto de una transición inicial entre las 2 geometrías mencionadas. La longitud de este tramo corresponde a 70,0 m y su desarrollo se realiza desde la abscisa 0+007,00 Km hasta 0+077,00 Km. La pendiente longitudinal de la transición inicial es constante e igual a 18%, iniciándose en la cota 1.320,87 msnm para el fondo de la boca de entrada hasta 1.308,27 msnm en el fondo de la sección circular.

Otra modificación definida en la estructura de entrada para la Fase III de la investigación es una ranura de ventilación, la misma que corresponde a una ventana que ocupa todo el ancho de la pared frontal. Tiene una dimensión en el sentido del flujo, de 10,0 m, garantizando así la posibilidad de ingreso de un caudal de aire suficiente para asegurar la ventilación de todo el túnel.

**Fotografía No. 68:** Vista superior de la estructura de entrada, donde se indican sus componentes con la geometría definida para la Fase III.



#### 6.1.1.2 Descripción de las modificaciones en el Túnel de Desvío definidas para la Fase III.

Considerando los resultados experimentales obtenidos en las Fases I y II de la investigación, se acogieron algunas de las recomendaciones para la optimización del funcionamiento del Túnel de Desvío, las mismas que se enumeran a continuación.

- i. Cambio de geometría y dimensiones en la sección de la boca de entrada al Túnel de Desvío. Se adopta la sección transversal cuadrada con dimensión igual a 10,0 m x 10,0 m.
- ii. Cambio de la transición inicial del Túnel de Desvío.
- iii. Cambio en la implantación y en perfil del Túnel de Desvío.

El Túnel de Desvío, en su geometría definida para la Fase III de la investigación, se presenta en el Plano No. 4-P del Anexo No. 1. En los Planos Nos. 11-M y 12 - M, del mismo anexo, se muestra, la implantación y el perfil del modelo a escala reducida construido en el Laboratorio CIERHI. Las características principales de la estructura en modelo se observa también en las Fotografías Nos. 69 a 72 y en la serie de fotografías 50 a 52 del Anexo No. 2C.

- a. El Túnel de Desvío se inicia con una sección de entrada cuadrada, de 10 x 10 m unida con una sección circular del túnel, cuyo diámetro es 9 m, mediante una transición asimétrica que se desarrolla desde la abscisa 0+007,00 Km hasta la abscisa 0+077,00 Km, con una longitud de 70 m y una pendiente constante del 18%. La cota de fondo de la transición en su inicio es de 1.320,87 msnm y la cota de fondo al final de la transición es de 1.308,27 msnm.
- b. A continuación de la transición se desarrolla el primer tramo recto de sección circular de diámetro 9 m, en una longitud de 96,21 m, con la misma pendiente longitudinal del 18%. Este tramo finaliza con el inicio de la única curva vertical descrita en el recorrido del Túnel de Desvío.
- c. La curva vertical mantiene siempre la sección circular de diámetro 9 m. Su radio de curvatura es de 230,0 m y permite la unión con el tramo del Túnel de Desvío que presenta una menor pendiente longitudinal del 2% desde la abscisa 0+209,35 Km hasta la sección final del túnel.
- d. Luego de la curvatura vertical se continúa con el segundo tramo recto, de sección circular de diámetro 9 m, en una longitud de 345,53 m y con pendiente del 2%. Este tramo finaliza en la abscisa 0+554,80 Km, luego del cual se inicia la primera curvatura en planta dentro de la alineación del túnel. Se mantiene siempre la misma sección transversal circular. El radio de curvatura adoptado para el cambio de alineación es igual a 400,0 m. El desarrollo de esta primera curva en planta alcanza una longitud de 131,54 m.

- e. A continuación se tiene el tercer tramo recto de igual sección circular, en una longitud de 110,88 m, con la misma pendiente del 2%. Este tramo se desarrolla entre las abscisas 0+686,52 Km y 0+799,40 Km.
- f. La alineación del túnel describe una segunda curvatura en planta cuyo radio es igual a 400,0 m, es decir, idéntico a la primera curva horizontal. La sección transversal se mantiene con la geometría circular de diámetro 9,0 m. El desarrollo de este segundo cambio en la alineación del túnel tiene una longitud de 402,49 m, manteniendo la misma pendiente del 2%. Al final de la segunda curva en planta se tiene la abscisa 1+201,90 Km.
- g. Posteriormente se tiene el cuarto tramo recto de muy corta longitud, igual a 18,49 m y pendiente del 2%, hasta la abscisa 1+220,39 Km, en donde se inicia la transición final.
- h. Finalmente el Túnel de Desvío termina con la transición asimétrica final que se desarrolla para unir la geometría de la sección circular de diámetro 9,0 m con la sección de salida del túnel que presenta una geometría tipo baúl, de base igual a 9,0 m, con una longitud de 32,0 m y con la misma pendiente del 2%. La abscisa final del Túnel de Desvío corresponde a 1+252,39 Km, que representa la longitud total de esta estructura. En el Cuadro No. 47 se resumen los tramos que conforman el desarrollo del Túnel de Desvío con sus abscisas y cotas.

**Cuadro No. 47:** Desarrollo del Túnel de Desvío.

<b>Tramo</b>	<b>Abscisa inicial /Abscisa final (m)</b>	<b>Cota inicial /Cota final (msnm)</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Pendiente</b>	<b>Forma de Sección Transversal</b>
Transición inicial	0+007,00 0+077,00	1.320,87 1.308,27	70,00	18%	Variable de cuadrada 10x10 m <sup>2</sup> a circular $\phi = 9$ m
Primer tramo recto	0+077,00 0+173,21	1.308,27 1.290,95	96,21	18%	Circular $\phi = 9$ m
Curva vertical	0+173,21 0+209,35	1.290,95 1.287,36	36,14	-	Circular $\phi = 9$ m
Segundo tramo recto	0+209,35 0+554,88	1.287,36 1.280,45	345,53	2%	Circular $\phi = 9$ m
Primera Curva en planta	0+554,88 0+686,52	1.280,45 1.277,82	131,54	2%	Circular $\phi = 9$ m
Tercer tramo recto	0+686,52 0+799,40	1.277,82 1.275,56	112,88	2%	Circular $\phi = 9$ m
Segunda Curva en planta	0+799,40 1+201,90	1.275,56 1.267,51	402,50	2%	Circular $\phi = 9$ m
Cuarto tramo recto	1+201,90 1+220,39	1.267,51 1.267,14	18,49	2%	Circular $\phi = 9$ m
Transición final	1+220,39 1+252,39	1.267,14 1.266,50	32,00	2%	Variable de circular $\phi = 9$ m a baúl de 9x9 m <sup>2</sup>

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

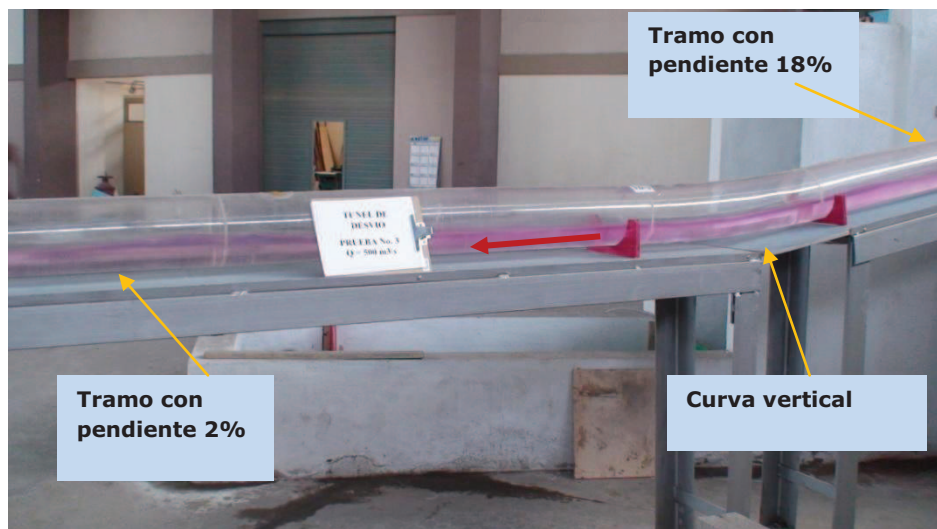
En las siguientes fotografías se muestran las principales características geométricas y constructivas del modelo a escala 1:50, del Túnel de Desvío construido en el laboratorio CIERHI.



**Fotografía No.69:** Vista superior de la transición inicial entre las secciones cuadrada y circular, aguas abajo de la estructura de entrada.

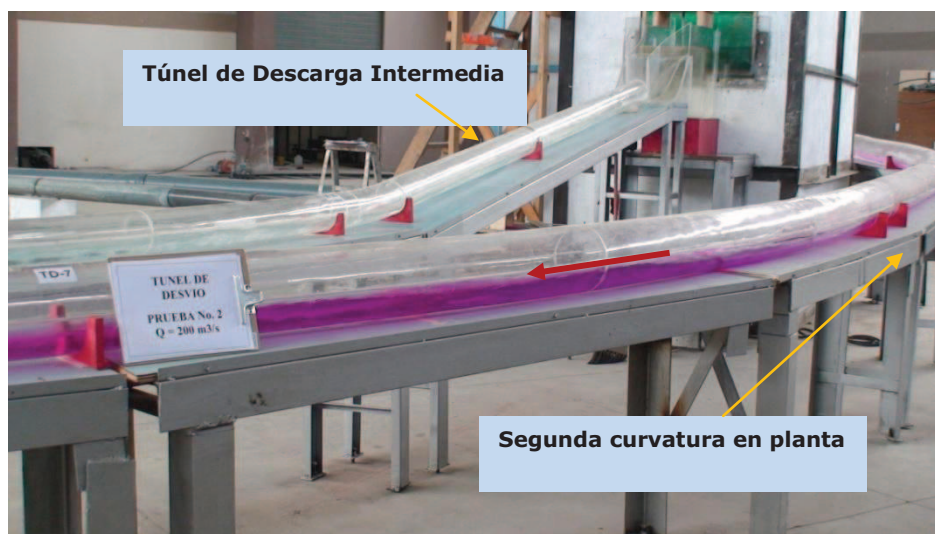


**Fotografía No.70:** Vista lateral de la curva vertical modificada en el primer tramo del Túnel de Desvío.

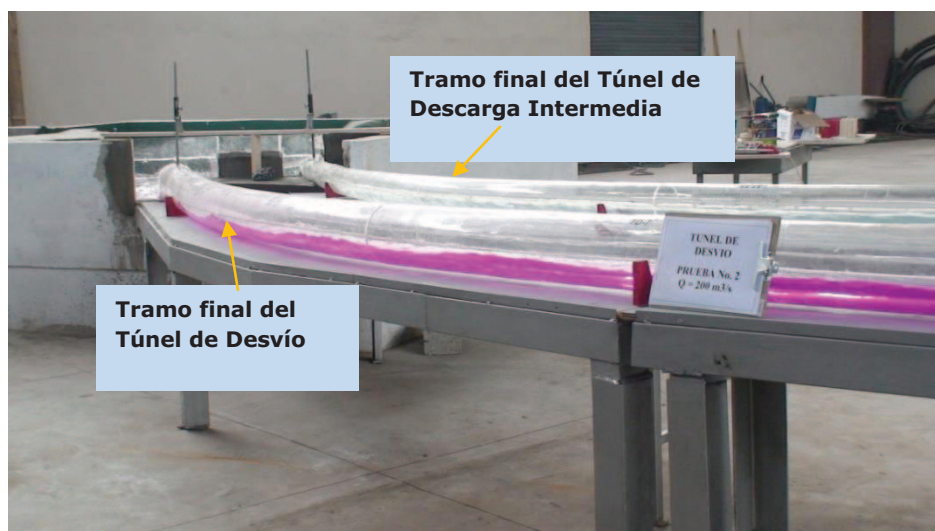




**Fotografía No. 71:** Vista desde aguas abajo, de la curva horizontal (en planta) del Túnel de Desvío. Se observa que es independiente de la Descarga Intermedia.



**Fotografía No.72:** Vista desde aguas arriba del Túnel de Desvío. Segunda curva horizontal, inmediatamente aguas arriba del cambio de sección a tipo baúl.



### **6.1.2 DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES DEL TÚNEL DE DESCARGA INTERMEDIA**

La geometría definida para la Fase III de la investigación es totalmente diferente de la prevista en el diseño original. A base de los resultados obtenidos luego del análisis experimental realizado en la Fase I se definieron los cambios requeridos que se enumeran a continuación:

- a. Entrada al Túnel de Descarga Intermedia – Vertedero tipo Creager
  - i. Cambios en la geometría del cimacio del vertedero. La sección final del perfil se ubica en una cota superior a la prevista en el diseño original.
  
- b. Túnel de la Descarga Intermedia:
  - i. Cambio en la geometría de la sección transversal del túnel de la Descarga Intermedia. Se adopta una geometría circular.
  
  - ii. Eliminación de la estructura de unión con el Túnel de Desvío.
  
  - iii. Tramo de transición de la sección tipo baúl, al pie del vertedero de entrada, hacia la geometría circular del túnel de Descarga Intermedia.
  
  - iv. Nuevo trazado en planta y en perfil del túnel de Descarga Intermedia hasta su entrega independiente en el tramo del río Paute.

### 6.1.2.1 Descripción de las modificaciones en la geometría del Vertedero tipo Creager definidas para la Fase III de la investigación.

El vertedero a la salida de la cámara de interconexión tiene la cresta ubicada en la cota 1.315,60 msnm y abscisa 0+000,00 Km, tiene un ancho de 14,0 m que se reduce gradualmente sobre el cimacio hasta el ancho del túnel de Descarga Intermedia. La geometría e implantación de las paredes laterales que definen esta contracción gradual se mantienen con la misma geometría del diseño original. Se presenta una modificación al diseño original para el Vertedero tipo Creager, necesaria para empatar la misma cota en la cresta con una nueva cota en el inicio del túnel de Descarga Intermedia. El cimacio se desarrolla desde la cresta ubicada en la cota 1.315,60 hasta el inicio del túnel, en la cota 1.301,80. El desarrollo del perfil para esta nueva geometría se presenta en el siguiente cuadro.

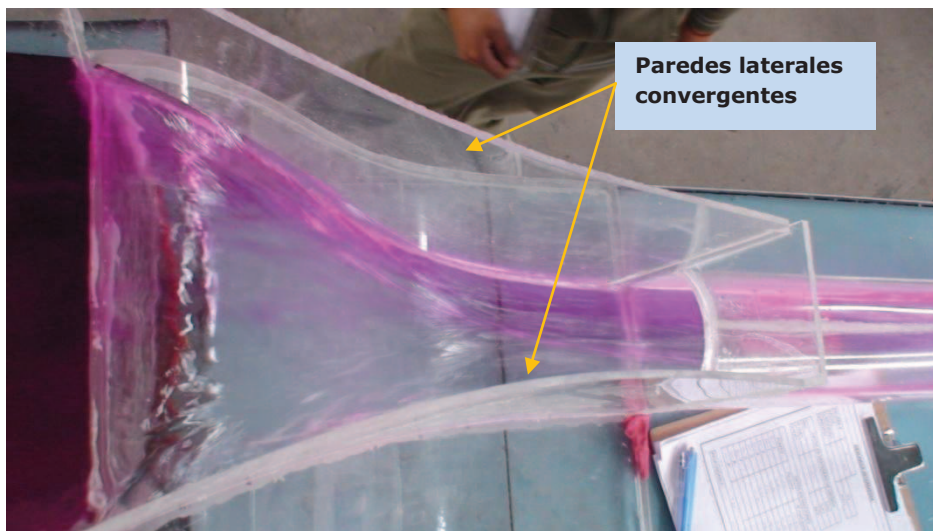
**Cuadro No. 48:** Desarrollo del Vertedero tipo Creager.

<b>Abscisa (Km)</b>	<b>Cota (msnm)</b>
- 0 + 001,00	1.315,15
- 0 + 000,84	1.315,49
0 + 000,00	1.315,60
0 + 003,35	1.314,00
0 + 005,19	1.312,00
0 + 006,70	1.310,00
0 + 008,32	1.307,17
0 + 017,32	1.302,11

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Los detalles de la conformación geométrica del vertedero de entrada hacia el Túnel de Descarga Intermedia, definidos para la Fase III se presentan en el Plano No. 6-P del Anexo No. 1. La geometría y las características constructivas del modelo a escala reducida construido e instalado en el laboratorio CIERHI se observan en los Planos Nos. 11-M y 12-M del Anexo No.1 y en las siguientes Fotografías Nos. 73 y 74.

**Fotografía No. 73:** Vista superior del cimacio del Vertedero tipo Creager modificado, con ancho variable. Se observa la disposición de las paredes laterales con doble curvatura y convergentes que terminan en la sección inicial del túnel cuya geometría corresponde al tipo baúl.



**Fotografía No.74:** Vista lateral del cimacio del Vertedero tipo Creager modificado con la geometría para Fase III.



### **6.1.2.2 Descripción de las modificaciones en el Túnel de Descarga Intermedia definidas para la Fase III de la investigación.**

Después de realizadas las pruebas correspondientes en el Túnel de la Descarga Intermedia y según las recomendaciones emitidas al finalizar la Fase I y II de la investigación se plantea un nuevo diseño para este túnel, el mismo que tiene las siguientes características:

- a. Al pie del vertedero tipo Creager se inicia el túnel con una transición de sección tipo baúl, de 6 m x 6 m hasta la sección circular de diámetro 6 m. La longitud de esta transición es de 22 m, con una pendiente longitudinal del 16%. Su desarrollo se ubica entre las abscisas 0+023,76 Km y 0+045,76 Km, respectivamente.
- b. A continuación se desarrolla el primer tramo recto, con una sección circular constante de diámetro 6 m, con una longitud de 125,62 m; es decir hasta la abscisa 0+171,38 Km. La pendiente es del 16% para esta transición inicial y primer tramo recto.
- c. En la abscisa 0+171,38 Km se inicia la curva vertical, manteniendo la misma sección transversal del túnel. El radio de curvatura definido en la curva vertical es de 120 m y su desarrollo en longitud alcanza 16,63 m, terminando en la abscisa 0+187,94 Km.
- d. Luego se tiene el segundo tramo recto, también con la misma sección circular de diámetro 6 m en una longitud de 4,54 m y con una pendiente del 2%, que se mantiene constante hasta su entrega en el cauce del río Paute.
- e. En la abscisa 0+192,48 Km m se inicia la primera curvatura en planta prevista en la alineación del túnel de Descarga Intermedia. La sección transversal se mantiene circular con diámetro de 6 m. El radio de curvatura de este cambio de alineación es de 250 m, con una longitud de desarrollo igual a 246,08 m y con la pendiente del 2%. La curva horizontal finaliza en la abscisa 0+438,43

Km, donde a su vez se inicia el tercer tramo recto de sección circular de diámetro 6 m, con una longitud de 26,62 m y con una pendiente del 2%.

- f. Finalmente el túnel de Descarga Intermedia termina con una segunda transición que permite el cambio de geometría de la sección transversal circular, de diámetro 6 m hasta la sección final, con una sección transversal tipo baúl de 6 m x 6 m. La longitud de esta transición final es de 22 m, donde termina el túnel de Descarga Intermedia en la abscisa 0+487,05 Km.

En el cuadro No. 49 se resumen las principales características del túnel de Descarga Intermedia con sus abscisas y sus cotas.

**Cuadro No. 49:** Desarrollo del Túnel de la Descarga Intermedia.

<i>Tramo</i>	<i>Abscisa inicial/ Abscisa final (m)</i>	<i>Cota Inicial/ Cota Final (msnm)</i>	<i>Longitud (m)</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Forma de Sección transversal</i>
Transición inicial	0+023.76 0+045.76	1301.08 1297.56	22.00	16%	Variable de baúl 6x6 m <sup>2</sup> a circular $\Phi = 6$ m
Primer tramo recto	0+045.76 0+171.38	1297.56 1277.46	125.62	16%	circular $\Phi = 6$ m
Curva Vertical	0+171.38 0+187.94	1277.46 1275.98	16.56	-	circular $\Phi = 6$ m
Segundo tramo recto	0+187.94 0+192.48	1275.98 1275.89	4.54	2 %	circular $\Phi = 6$ m
Primera Curva en planta	0+192.48 0+438.43	1275.89 1270.97	245.95	2 %	circular $\Phi = 6$ m
Tercer Tramo recto	0+438.43 0+465.05	1270.97 1270.44	26.62	2 %	circular $\Phi = 6$ m
Transición final	0+465.05 0+487.05	1270.44 1270.00	22.00	2 %	Variable de circular $\Phi = 6$ m a baúl 6x6 m <sup>2</sup>

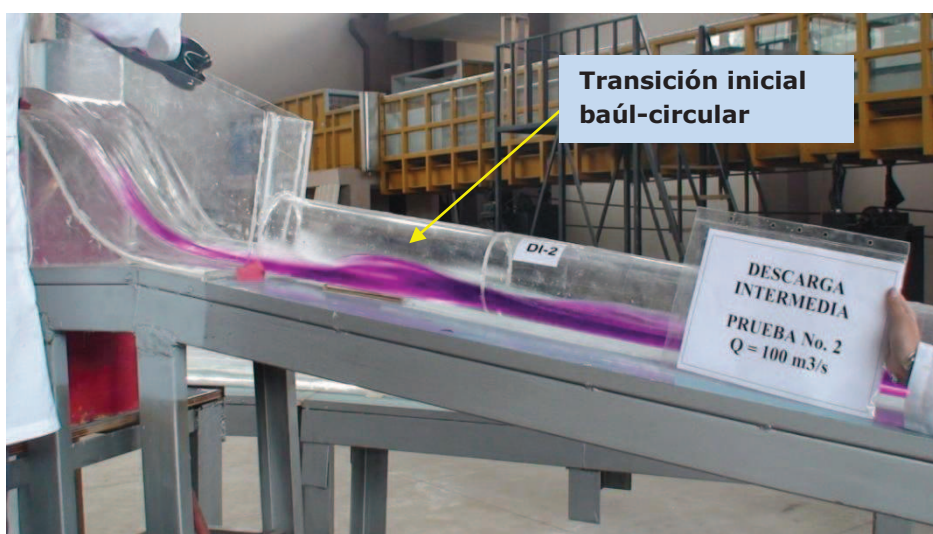
Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara



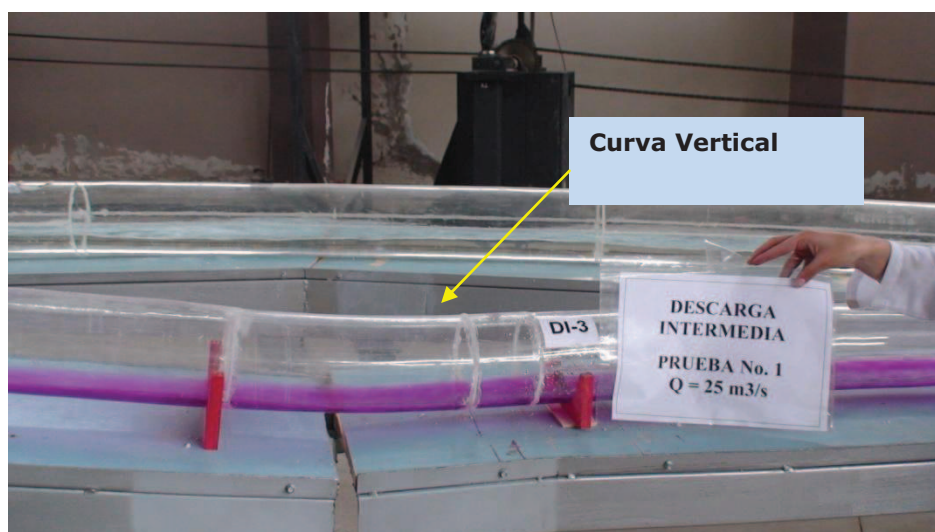
La cota de entrega del Túnel de Descarga Intermedia se ubica por lo tanto, 3,5 m por arriba de la cota de entrega del Túnel de Desvío.

La geometría definida para el Túnel de Descarga Intermedia para la Fase III de la investigación, así como las características constructivas del modelo a escala 1:50, se muestran en las siguientes Fotografías Nos.75 a 78 y en los planos Nos. 11-M y 12-M del Anexo No.1.

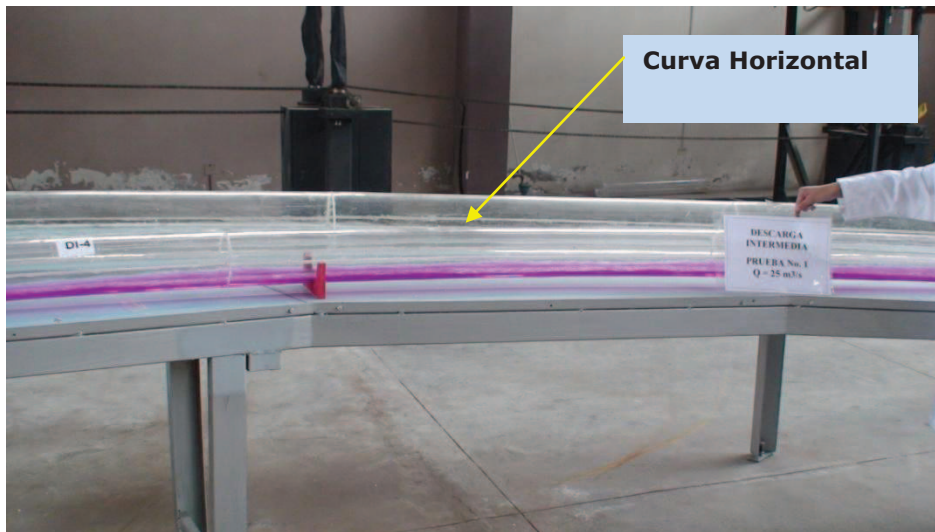
**Fotografía No. 75:** Tramo de transición inicial (sección tipo baúl – sección circular), aguas abajo de Vertedero tipo Creager.



**Fotografía No.76:** Curva vertical en el túnel de la Descarga Intermedia.



**Fotografía No.77:** Tramo de la primera curvatura en planta en el trazado de la Descarga Intermedia.



**Fotografía No.78:** Vista superior de la Transición final en la entrega de la Descarga Intermedia al cauce del río Paute.





### **6.1.3 ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA Y ENTREGA AL CAUCE DEL RIO PAUTE.**

El principal cambio previsto en la estructura de disipación de energía definido para la Fase III de la investigación se refiere a que cada túnel tiene su propia estructura independiente. La ubicación de éstas, sin embargo es próxima en el mismo tramo del río Paute. Adicionalmente los resultados de las fases I y II en el único disipador de energía previsto en el diseño original, permitió recomendar las siguientes modificaciones para mejorar su funcionamiento hidráulico:

- a. Estructura de Disipación y Entrega del Túnel de Desvío:
  - i. Eliminación de bloque de impacto tipo Kumin.
  - ii. Cambio de la geometría circular de la sección de salida del Túnel de Desvío por una tipo baúl.
  - iii. Plataforma de entrega con ancho creciente en el sentido de flujo.
  - iv. Disminución de la cota de implantación de la estructura al menos 6 m por debajo de la cota prevista en el diseño original.
  
- b. Estructura de Disipación y Entrega del Túnel de la Descarga Intermedia:
  - i. Introducción de una estructura propia para la Descarga Intermedia, ubicado a corta distancia aguas arriba de la estructura de disipación y entrega del Túnel de Desvío.
  - ii. Aplicación de las recomendaciones definidas para optimizar la estructura de disipación de energía y entrega del Túnel de Desvío, considerando el diferente rango de caudales de operación.

Cabe recalcar que el comportamiento de la estructura de disipación y entrega al río, no se analizará en el presente proyecto de titulación.

## **6.2 PLAN DE PRUEBAS CON LAS VARIANTES SELECCIONADAS POR COMPONENTES.**

Para alcanzar los objetivos de la investigación en modelo, se propuso el siguiente Plan de Pruebas para ser desarrollado en la Fase III de la investigación, el mismo que fue ejecutado luego de su aprobación.

El Plan de pruebas está definido por una serie de ensayos en el Túnel de Desvío y en la Descarga Intermedia, por separado para una gama de caudales determinada. El objetivo principal de este grupo de pruebas es visualizar la calidad de flujo en la aproximación hacia el ingreso del Túnel de Desvío y en el vertedero de entrada al túnel de la Descarga Intermedia. Posteriormente se definirán las características del movimiento dentro de cada túnel y el efecto de su geometría en planta y en perfil.

En el siguiente Cuadro No. 50 se resume el Plan de Pruebas ejecutado en la Fase III de la investigación.

**Cuadro No.50:** Plan de Pruebas para el análisis de la calidad del flujo en los túneles de Desvío y de Descarga Intermedia.

PRUEBA No.	TÚNEL DE DESVÍO		DESCARGA INTERMEDIA		CAUDAL TOTAL		OBSERVACIONES
	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal modelo (l/s)	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal modelo (l/s)	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal modelo (l/s)	
1	100	5,7			100	5,7	<i>Se obtendrán:</i> - Patrones de flujo de aproximación en el Túnel y en la Descarga Intermedia. - Perfiles de flujo en el modelo físico del Túnel y la Descarga Intermedia.
2	200	11,3			200	11,3	
3	500	28,3			500	28,3	
4	800	45,3			800	45,3	
5	1.130	63,9			1.130	63,9	
6			25	1,4	25	1,4	
7			100	5,7	100	5,7	
8			150	8,5	150	8,5	
9			200	11,3	200	11,3	

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

### 6.3 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACION DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL CON LAS VARIANTES EN EL MODELO.

#### 6.3.1 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACION DE LOS RESULTADOS EN LA ESTRUCTURA DE ENTRADA AL TÚNEL DE DESVÍO.

##### 6.3.1.1 Curva de Descarga en la Bocatoma de ingreso al Túnel de Desvío con la geometría definida para la Fase III.

La geometría de la sección inicial del Túnel de Desvío definida para la Fase III de la investigación no mantuvo la forma y dimensiones ensayadas en la Fase II, pues la boca de entrada en la Fase III es cuadrada con dimensiones de 10 m x 10 m. Se mantuvo la cresta del umbral en la plataforma de aproximación ubicada en la cota 1.326,00 msnm.

Los resultados obtenidos a partir del Plan de pruebas con la geometría para la Fase III se presentan en el Cuadro No. 51. Los valores registrados de las profundidades medidas en la zona de aproximación, sobre el umbral y del caudal que ingresa al Túnel de Desvío, permite obtener las cotas de ubicación de la superficie libre del flujo de aproximación. Esta cota es medida sobre el umbral de fondo.

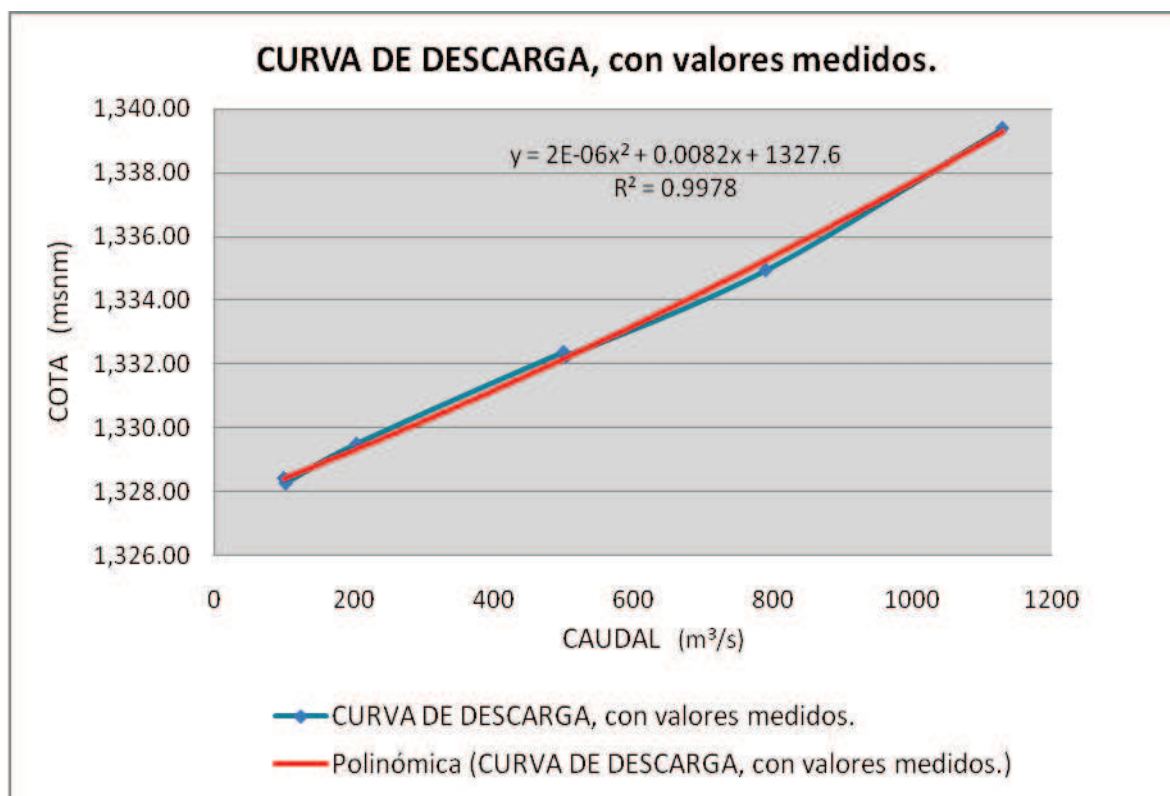
**Cuadro No. 51:** Valores medidos del caudal, de la carga sobre el umbral de fondo y de la cota de la superficie libre del agua en la aproximación al Túnel de Desvío.

Fase III

<b>Q</b> <b>(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>y</b> <b>(m)</b>	<b>COTA</b> <b>(msnm)</b>
Valores de la curva de descarga		Ref.: 1.326,00 msnm
98,49	2,42	1.328,42
101,15	2,26	1.328,26
202,62	3,49	1.329,49
499,62	6,37	1.332,37
503,29	6,24	1.332,24
789,56	8,94	1.334,94
1.128,62	13,39	1.339,39

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Figura No. 34:** Curva de Descarga: Caudal vs. Cota de la superficie libre del agua sobre el umbral de fondo en la plataforma de aproximación hacia la entrada del Túnel de Desvío (msnm). Fase III (Valores medidos y Curva calculada con ajuste de curva polinómica de segundo orden).



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

El resultado de esta serie de pruebas en el modelo físico muestra una eficiencia satisfactoria y adecuada de la estructura de entrada, modificada y ensayada, con la capacidad de conducir el caudal máximo de  $1.130 \text{ m}^3/\text{s}$  con una cota de la superficie libre de agua igual a  $1.339,39 \text{ msnm}$ .

Sin embargo, se mantienen las condiciones de la cota máxima admisible en el curso natural del río Paute, para la cual fueron dimensionados el trazado y la sección transversal del Túnel de Desvío. No obstante, al comparar el valor alcanzado en el nivel de la superficie libre del agua se detecta que existe un incremento de  $1,26 \text{ m}$ , respecto de los ensayos de la Fase II, originados por el cambio en la geometría y dimensiones de la sección inicial del Túnel de Desvío así como por la disminución del caudal unitario en la zona de aproximación a la entrada al Túnel de Desvío,

donde aún se tiene flujo subcrítico o lento.

En la Fotografía No. 79 se muestra el comportamiento del flujo en la zona de la aproximación a la entrada al Túnel de Desvío. La calidad del flujo mejora notablemente por la configuración recta de las paredes y de los dos estribos derecho e izquierdo.

Sobre la base de las observaciones en el modelo, que se reportan en la serie de fotografías Nos. 53, 56, 59, 60, 62, 64 y 67 del Anexo No. 2C. Así como del análisis de los datos experimentales, se ratifica que el comportamiento del flujo en la aproximación al Túnel de Desvío es apropiado y aceptable. Las cotas requeridas en la zona inicial a la entrada de la bocatoma se mantienen en los niveles impuestos para el dimensionamiento de las obras principales del desvío y el flujo se presenta estable y libre de fuertes ondulaciones inadmisibles en amplitud o en desarrollo.

El funcionamiento de la ranura de ventilación se muestra satisfactorio, eliminando toda tendencia a un flujo pulsatorio, de manera especial para el ingreso de los mayores caudales dentro del rango de operación definido para esta estructura.

Se recomienda por lo tanto mantener la geometría definida para la Fase III, como la alternativa óptima en la estructura de entrada al Túnel de Desvío.

**Fotografía No.79:** Flujo en la zona de aproximación al Túnel de Desvío para el caudal de  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$  (se observa que el flujo es adecuado y estable).



## 6.3.2 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACION DE LOS RESULTADOS EN EL TUNEL DE DESVIO.

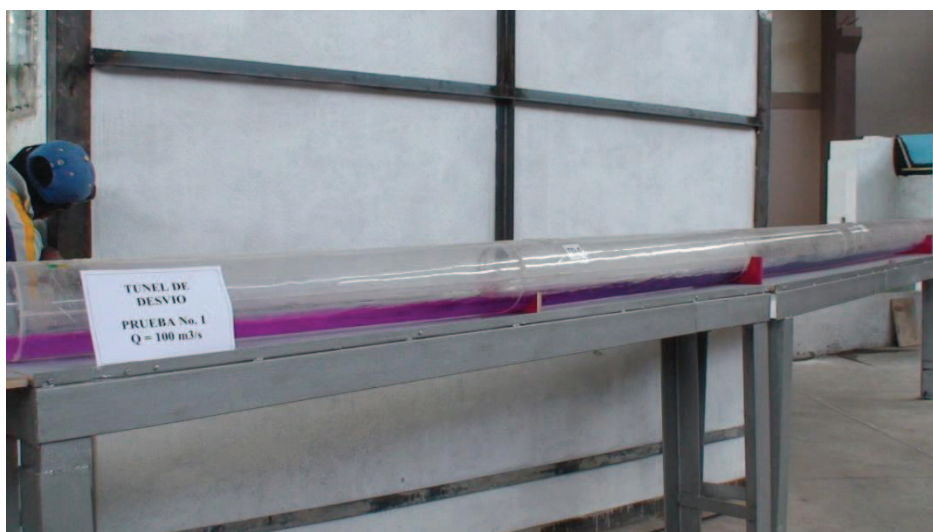
### 6.3.2.1 Análisis del flujo a lo largo del Túnel de Desvío con la geometría definida para la Fase III

De conformidad con el Plan de Pruebas aprobado, se realizaron los ensayos previstos para la serie de caudales: 100, 200, 500, 800 y 1.130 m<sup>3</sup>/s, que son valores referenciales expresados para el prototipo.

En las siguientes fotografías se observa el comportamiento aceptable y eficiente del flujo a lo largo del Túnel de Desvío, para la gama de los caudales ensayados hasta valores de 800 m<sup>3</sup>/s.

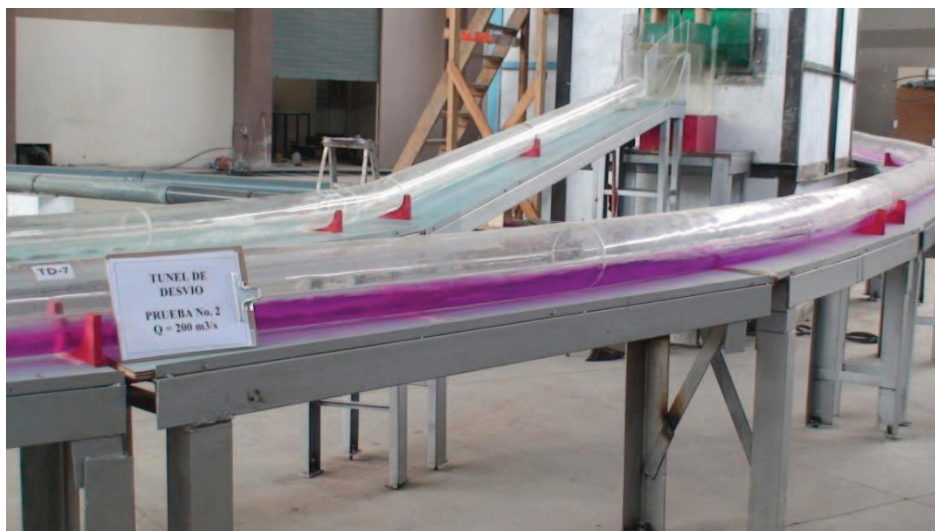
Para el tránsito del caudal de diseño se observa que el bordo libre previsto se reduce por la presencia de las ondas, cuya amplitud se incrementa a lo largo de la segunda curvatura en planta del túnel y su tramo final, quedando un espacio relativamente pequeño o insuficiente para garantizar la circulación del flujo con características estables y ventiladas.

**Fotografía No.80:** Flujo a lo largo del Túnel de Desvío para el  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se observa el tránsito a lo largo de la primera curvatura en planta. La superficie libre se presenta estable y la amplitud de las ondas cruzadas es pequeña.





**Fotografía No. 81:** Flujo a lo largo del Túnel de Desvío para  $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Operación en la segunda curvatura en planta. Se observa la presencia de ondas cruzadas de mayor amplitud. El dimensionamiento de la sección es suficiente para garantizar un flujo estable y aireado.



**Fotografía No. 82:** Flujo a lo largo del Túnel de Desvío para  $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ , operación del tramo en donde se ubica la curva vertical y el segundo tramo recto. Se observa la ausencia de ondas cruzadas. La superficie libre se muestra estable y la sección presenta un bordo libre muy grande para garantizar la ventilación.





**Fotografía No. 83:** Flujo a lo largo del Túnel de Desvío para  $Q = 800 \text{ m}^3/\text{s}$ , operación del tramo en donde se inicia la segunda curva en planta con la presencia de ondas y bordo libre reducido.



**Fotografía No. 84:** Flujo en la curva vertical del Túnel de Desvío para  $Q = 1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ , se observa el flujo sin la presencia de ondas.



El flujo observado para toda la gama de caudales ensayados en el Túnel de Desvío corresponde a un flujo supercrítico con los mayores valores de velocidad y del parámetro adimensional Froude en el tramo inicial del Túnel de Desvío donde se tiene la pendiente del 18%. En los siguientes Cuadros Nos. 53 a 57 se muestran los resultados del procesamiento de los datos experimentales para las pruebas en el modelo.

La ubicación de los puntos de medición a lo largo del Túnel de Desvío se presenta en el plano No. 13-M del Anexo No. 1 y se resumen en el siguiente cuadro No. 52, tanto para las magnitudes en prototipo como en modelo.

**Cuadro No.52:** Ubicación en prototipo y en modelo de los puntos de medición a lo largo del Túnel de Desvío.

<b>Punto de Medición</b>	<b>Abscisa Prototipo (m)</b>	<b>Abscisa Modelo (m)</b>	<b>Observaciones</b>
TD – 1	214.00	4.28	Al pie de la curva vertical. $I_0 = 18 \%$
TD – 2	477.50	9.55	1.55 m antes de la 1era. Curva horizontal. $I_0 = 2 \%$
TD – 3	613.50	12.27	Punto medio de la 1era. Curva Horizontal. $I_0 = 2 \%$
TD – 4	859.00	17.18	Inicio de la 2da. Curva Horizontal. $I_0 = 2 \%$
TD – 5	1017.09	20.35	Punto medio de la 2da. Curva Horizontal. $I_0 = 2 \%$
TD – 6	1208.95	24.18	Inicio de la transición final. $I_0 = 2 \%$
TD – 7	1244.00	24.88	Fin de transición en la salida. $I_0 = 2 \%$

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Cuadro No. 53:** Principales variables hidrodinámicas definidas para el flujo en el Túnel de Desvío, calculadas con la profundidad medida en el eje central del Túnel de Desvío,  $Q = 101,15 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se observa que el rango de velocidades es alto, siendo mayor en el tramo inicial de mayor pendiente. Los valores del Froude en el tramo de salida son relativamente bajos.

**CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO**

**PRUEBA No. 1 TUNEL DE DESVIO**

Caudal TD ( $\text{m}^3/\text{s}$ )= 101,15  
 Diámetro 1 (m)= 9,00  
 Diámetro 2 (m)= 9,00  
 Rugosidad absoluta (mm)= 0,60

Pto. medida	$Y_{\text{medido}}$ (m)	$y/D$	Velocidad media de flujo (m/s)	Reynolds	Rugosidad relativa (-)	$\lambda_{\text{prototipo}}$	$n_{\text{calculado}}$	$Fr_{\text{prototipo}}$
TD-1	1,41	0,12	15,95	5,53E+07	1,70E-04	0,0209	0,0159	5,17
TD-2	1,80	0,13	10,42	4,72E+07	1,30E-04	0,0195	0,0161	2,89
TD-3	1,98	0,18	9,71	4,60E+07	1,20E-04	0,0193	0,0161	2,62
TD-4	2,17	0,20	8,57	4,38E+07	1,20E-04	0,0190	0,0162	2,21
TD-5	2,10	0,20	8,98	4,46E+07	1,20E-04	0,0191	0,0162	2,35
TD-6	2,14	0,20	8,74	4,42E+07	1,20E-04	0,0190	0,0162	2,27
TD-7	1,34	0,21	8,40	3,47E+07	1,50E-04	0,0200	0,0160	2,32
n PROMEDIO EN TUNEL:						0,0161		

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Cuadro No.54:** Principales variables hidrodinámicas en el Túnel de Desvío, calculadas con la profundidad medida en el eje central del Túnel de Desvío,  $Q = 200,64 \text{ m}^3/\text{s}$ . Las mayores velocidades se producen en el tramo inicial de mayor pendiente. Se mantienen valores relativamente bajos para el Froude en el tramo final del flujo.

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 2 TUNEL DE DESVIO</b>									
Caudal TD ( $\text{m}^3/\text{s}$ )=	200,64								
Diámetro 1 (m)=	9,00								
Diámetro 2 (m)=	9,00								
Rugosidad absoluta (mm)=	0,60								
<b>Pto. medida</b>	<b><math>y</math> medido (m)</b>	<b><math>y/D</math></b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\lambda</math> prototipo</b>	<b><math>n</math> calculado</b>	<b><math>Fr</math> prototipo</b>	
TD-1	1,69	0,12	24,35	9,96E+07	1,46E-04	0,0200	0,0160	7,18	
TD-2	2,37	0,13	14,99	8,27E+07	1,08E-04	0,0186	0,0163	3,69	
TD-3	2,41	0,18	14,65	8,20E+07	1,07E-04	0,0186	0,0163	3,57	
TD-4	2,77	0,20	12,08	7,59E+07	9,55E-05	0,0181	0,0164	2,73	
TD-5	2,73	0,20	12,33	7,65E+07	9,66E-05	0,0181	0,0164	2,81	
TD-6	2,95	0,20	11,05	7,31E+07	9,00E-05	0,0179	0,0164	2,41	
TD-7	2,00	0,21	11,13	6,17E+07	1,08E-05	0,0186	0,0163	2,51	
$n$ PROMEDIO EN TUNEL:							0,0163		

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Cuadro No. 55:** Principales variables hidrodinámicas en el Túnel de Desvío, calculadas con la profundidad medida en el eje central del Túnel de Desvío,  $Q = 499,66 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se mantiene que las mayores velocidades se presentan en el tramo inicial del túnel. Las velocidades de salida son altas, sin embargo el valor del Froude es menor a 3.

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 3 TUNEL DE DESVIO</b>									
Caudal TD ( $\text{m}^3/\text{s}$ )=		499,66							
Diámetro 1 (m)=		9,00							
Diámetro 2 (m)=		9,00							
Rugosidad absoluta (mm)=		0,60							
<b>Pto. medida</b>	<b><math>Y_{\text{medido}}</math> (m)</b>	<b><math>y/D</math></b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\lambda_{\text{prototipo}}</math></b>	<b><math>n_{\text{calculado}}</math></b>	<b><math>Fr_{\text{prototipo}}</math></b>	
TD-1	3,16	0,12	25,13	1,75E+08	8,60E-05	0,0176	0,0164	5,27	
TD-2	3,85	0,13	19,23	1,56E+08	7,40E-05	0,0170	0,0166	3,59	
TD-3	4,13	0,18	17,54	1,49E+08	7,10E-05	0,0169	0,0166	3,14	
TD-4	4,09	0,20	17,77	1,50E+08	7,10E-05	0,0169	0,0166	3,20	
TD-5	4,19	0,20	16,70	1,46E+08	6,90E-06	0,0168	0,0166	2,92	
TD-6	4,36	0,20	16,36	1,44E+08	6,80E-05	0,0167	0,0167	2,83	
TD-7	3,63	0,21	15,28	1,23E+08	7,50E-06	0,0171	0,0166	2,56	
n PROMEDIO EN TUNEL:						0,0166			

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Cuadro No.56:** Principales variables hidrodinámicas en el Túnel de Desvío, calculadas con la profundidad medida en el eje central del Túnel de Desvío,  $Q = 800,27 \text{ m}^3/\text{s}$  El calado medio en la segunda curvatura en planta corresponde aproximadamente a los 2/3 del diámetro del túnel.

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 4 TUNEL DE DESVIO</b>									
Caudal TD ( $\text{m}^3/\text{s}$ )=	800,27								
Diámetro 1 (m)=	9,00								
Diámetro 2 (m)=	9,00								
Rugosidad absoluta (mm)=	0,60								
<b>Pto. medida</b>	<b><math>y</math> medido (m)</b>	<b><math>y/D</math></b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\lambda</math> prototipo</b>	<b><math>n</math> calculado</b>	<b><math>Fr</math> prototipo</b>	
TD-1	4,48	0,12	25,27	2,27E+08	6,68E-05	0,0167	0,0167	4,30	
TD-2	4,91	0,13	22,56	2,14E+08	6,32E-05	0,0165	0,0167	3,62	
TD-3	5,30	0,18	20,54	2,03E+08	6,06E-05	0,0163	0,0168	3,12	
TD-4	5,34	0,20	20,35	2,02E+08	6,04E-05	0,0163	0,0168	3,08	
TD-5	5,88	0,20	18,18	1,89E+08	5,77E-06	0,0161	0,0168	2,56	
TD-6	5,98	0,20	17,81	1,87E+08	5,73E-05	0,0161	0,0168	2,47	
TD-7	4,97	0,21	17,89	1,69E+08	6,35E-05	0,0165	0,0167	2,56	
$n$ PROMEDIO EN TUNEL:							0,0168		

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

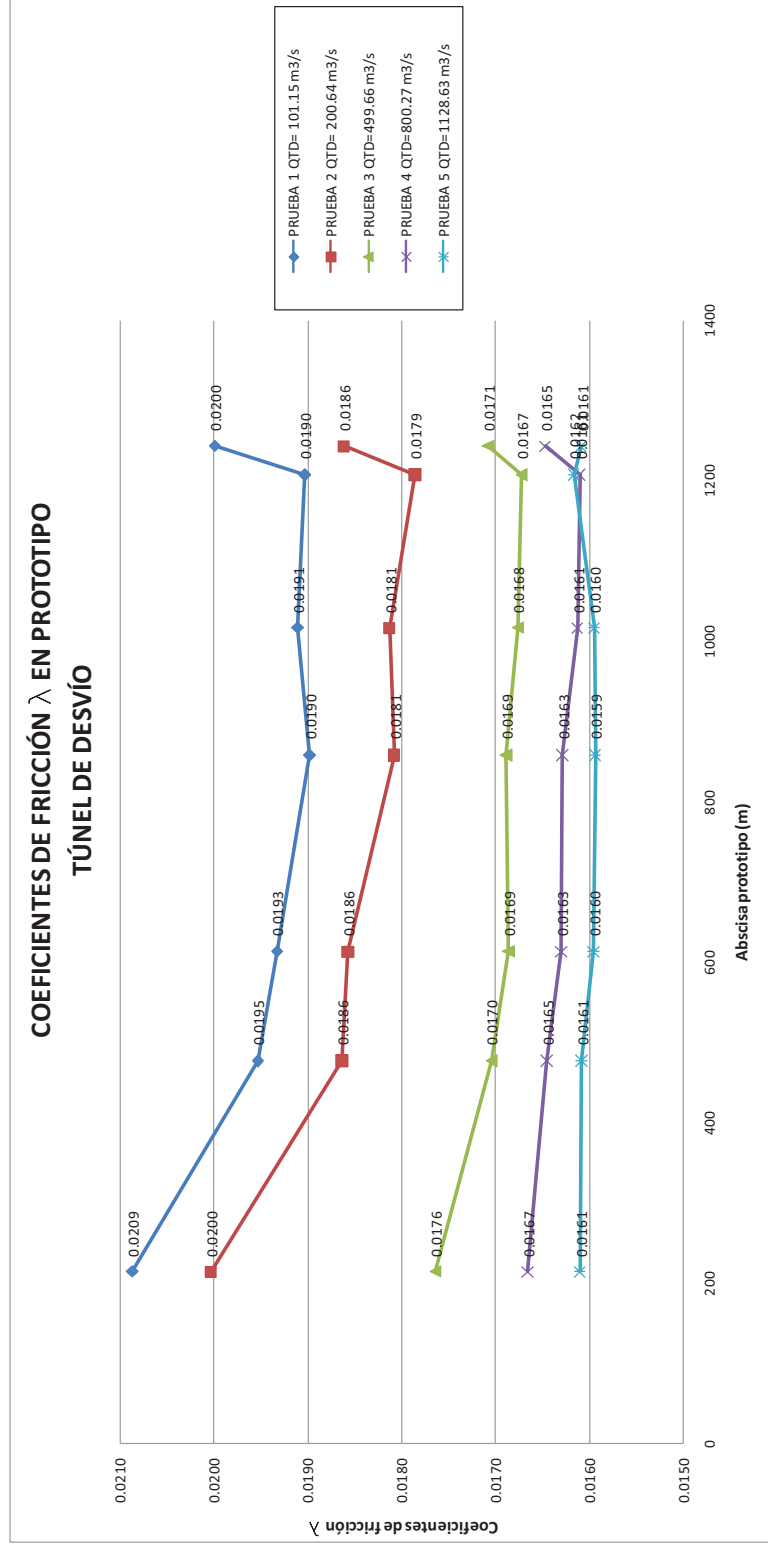
**Cuadro No.57:** Principales variables hidrodinámicas en el Túnel de Desvío calculadas para  $Q = 1.128,63 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se observa que el rango de velocidades para el tramo de mayor pendiente supera los 24 m/s y en tramo restante se alcanzan también valores de velocidad altos en el orden de 20 m/s. El porcentaje de llenado que se alcanza en el tramo de desarrollo de la segunda curvatura en planta supera el 80% recomendado normalmente en la literatura técnica.

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 5 TUNEL DE DESVIO</b>									
Caudal TD ( $\text{m}^3/\text{s}$ )=		1.128,63							
Diámetro 1 (m)=		9,00							
Diámetro 2 (m)=		9,00							
Rugosidad absoluta (mm)=		0,60							
<b>Pto. medida</b>	<b><math>y</math> medido (m)</b>	<b><math>y/D</math></b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\lambda</math> prototipo</b>	<b><math>n</math> calculado</b>	<b><math>Fr</math> prototipo</b>	
TD-1	5,99	0,12	25,10	2,63E+08	5,73E-05	0,0161	0,0168	3,48	
TD-2	6,60	0,13	24,79	2,61E+08	5,70E-05	0,0161	0,0168	3,41	
TD-3	6,93	0,18	21,47	2,34E+08	5,50E-05	0,0160	0,0169	2,60	
TD-4	7,30	0,20	20,43	2,24E+08	5,47E-05	0,0159	0,0169	2,33	
TD-5	7,67	0,20	19,55	2,13E+08	5,49E-05	0,0160	0,0169	2,08	
TD-6	8,59	0,20	18,04	1,85E+08	5,84E-06	0,0162	0,0168	1,41	
TD-7	6,65	0,21	19,10	2,01E+08	5,70E-05	0,0161	0,0168	2,23	
<b><math>n</math> PROMEDIO EN TUNEL:</b>						0,0168			

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

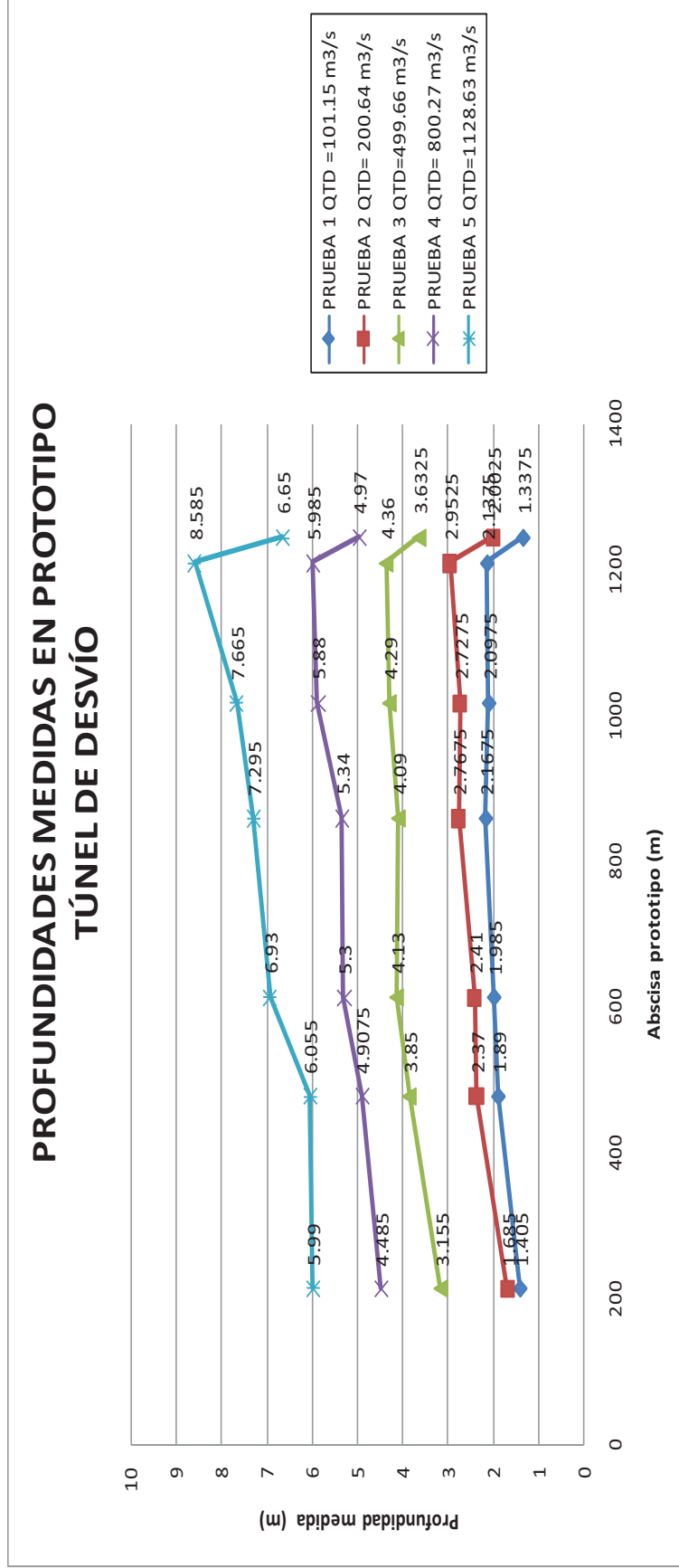


**Figura No. 35:** Perfiles de Flujo medidos a lo largo del Túnel de Desvío con la geometría recomendada. Se observa que el cambio de la forma de la sección transversal en la sección de salida del túnel produce una reducción de la profundidad. Las mayores profundidades se registran en la abscisa 1+208,95 Km, que corresponde a la segunda curvatura en planta del túnel. Para el tránsito del caudal de diseño el porcentaje de llenado en este punto supera el 80% recomendado en la literatura técnica.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Figura No. 36:** Valores de los coeficientes de fricción  $\lambda$  a lo largo del Túnel de Desvío, con la geometría definida para la Fase III.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

De acuerdo a lo observado en la figura No. 35 es notable una reducción en el valor del calado en el último punto de medición; esto se debe al cambio de geometría de la sección en el Túnel de Desvío, de sección circular a sección de tipo baúl.

Se puede observar que el comportamiento del flujo en la transición final es favorable porque se conduce a superficie libre, aún para el tránsito del caudal de diseño. Sin embargo en la segunda curvatura en planta el bordo libre observado para el caudal máximo aparece muy reducido. Los porcentajes de llenado para el caudal de diseño superan el 80% de llenado.

Los valores de los coeficientes de fricción calculados, a lo largo del Túnel de Desvío presentan una tendencia inversamente proporcional con el caudal. Considerando una rugosidad absoluta de 0,6 mm, para el terminado del hormigón en el prototipo, se considera que el comportamiento del túnel corresponderá al hidráulicamente rugoso. Los valores del coeficiente de rugosidad  $n$  en la ecuación de Manning, estimados a partir de los valores obtenidos de los coeficientes de fricción  $\lambda$ , presentan una relación creciente con el caudal de circulación en el túnel, debido a la influencia del valor del radio hidráulico, que también es creciente con el caudal.

En el siguiente cuadro No. 58, se resumen los valores promedio del coeficiente de fricción y del coeficiente de rugosidad  $n$  estimados a lo largo del Túnel de Desvío para el rango de caudales ensayados. Estos valores ratifican los obtenidos para la Fase II de la investigación.

**Cuadro No. 58:** Cuadro de resumen de valores promedio del factor de fricción ( $\lambda$ ) y del coeficiente de rugosidad ( $n$ ), para gama de caudales ensayados.

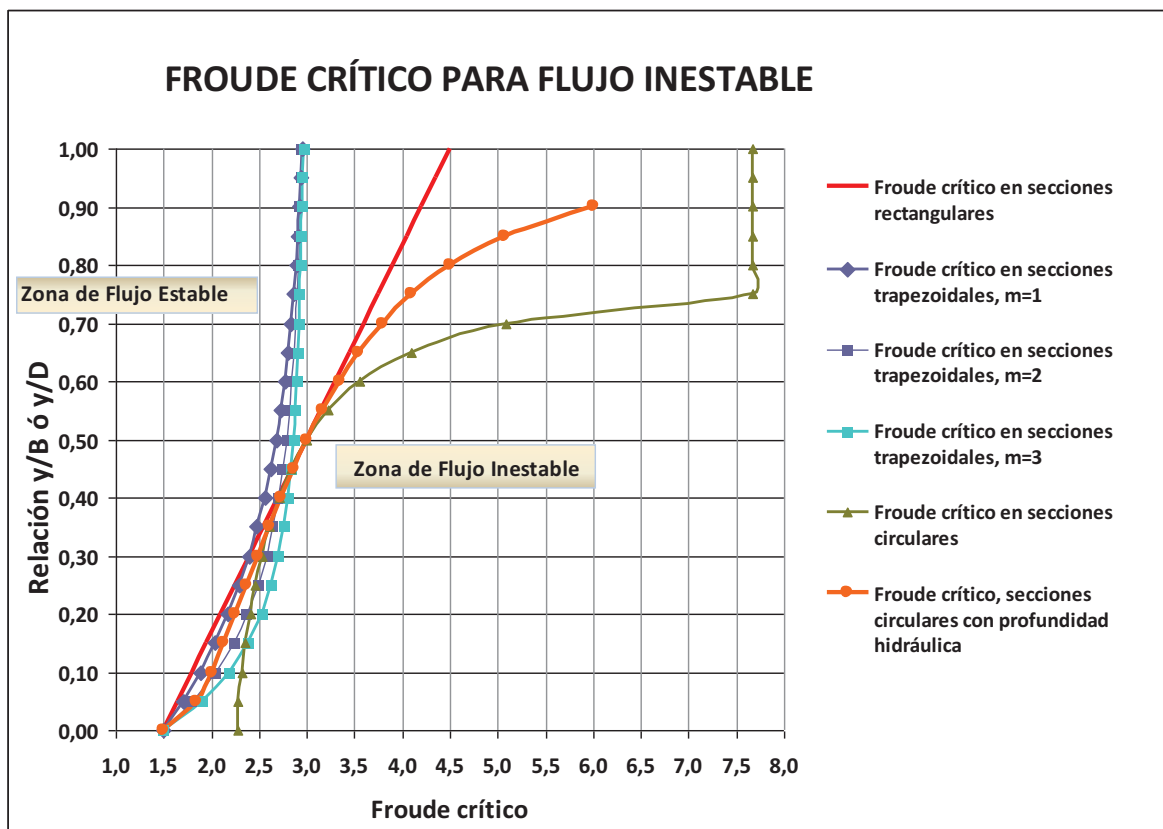
<i>Caudal</i> <i>m<sup>3</sup>/s</i>	$\lambda$	$n$	<i>Observaciones</i>
1.128,63	0,0160	0,0168	Mayor que el valor adoptado en diseño original
800,27	0,0163	0,0168	Mayor que el valor adoptado en diseño original
499,66	0,0170	0,0166	Mayor que el valor adoptado en diseño original
200,64	0,0186	0,0163	Mayor que el valor adoptado en diseño original
101,15	0,0195	0,0161	Mayor que el valor adoptado en diseño original

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

### 6.3.2.2 Análisis de la estabilidad del flujo en el Túnel de Desvío con la geometría definida para la Fase III.

En el siguiente cuadro se presentan los valores del parámetro adimensional Froude obtenido a base de las profundidades medidas en el modelo físico en el tramo con pendiente longitudinal igual al 2%. En el tramo inicial que presenta una pendiente del 18%, la relación de llenado será menor, por lo que la tendencia a la inestabilidad del flujo será más marcada, siempre que los valores del Froude superen 2,3.

Figura No. 37: Valores de Froude crítico para flujo inestable



Fuente: Informe de Fase I, Modelo Hidráulico del Túnel de Desvío de la Central Paute Molino.

**Cuadro No. 59:** Valores del parámetro Froude en el Túnel de Desvío.

<b>Caudal medido (<math>m^3/s</math>)</b>	<b>Rango de valores <math>y/D</math></b>	<b>Valores de Froude medidos</b>	<b>Valores de Froude crítico en sección</b>	<b>Calificación del flujo</b>
101,15	0,16	5,17	2,32	Inestable
	0,21	2,89	2,35	Inestable
	0,22	2,63	2,40	Inestable
	0,24	2,21	2,42	Estable
	0,23	2,36	2,45	Estable
	0,24	2,27	2,42	Estable
	0,15	2,32	2,30	Estable
200,64	0,19	7,18	2,34	Inestable
	0,26	3,69	2,47	Inestable
	0,27	3,57	2,48	Inestable
	0,31	2,73	2,54	Inestable
	0,30	2,81	2,52	Inestable
	0,33	2,41	2,55	Estable
	0,22	2,51	2,40	Inestable
499,66	0,35	5,27	2,60	Inestable
	0,43	3,60	2,80	Inestable
	0,46	3,14	2,85	Inestable
	0,45	3,20	2,84	Inestable
	0,48	2,92	2,88	Inestable
	0,48	2,83	2,88	Inestable
	0,40	2,56	2,75	Estable
800,27	0,50	4,30	3,00	Inestable
	0,55	3,62	3,22	Inestable
	0,59	3,13	3,50	Estable
	0,59	3,08	3,50	Estable
	0,65	2,56	4,10	Estable
	0,67	2,47	4,30	Estable
	0,55	2,56	3,22	Estable
1.128,63	0,67	3,48	4,30	Estable
	0,67	3,41	4,30	Estable
	0,77	2,60	7,70	Estable
	0,81	2,33	7,65	Estable
	0,85	2,08	7,65	Estable

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Para los caudales bajos prácticamente el flujo escurre con inestabilidad, en el tramo inicial con pendiente del 18%. Únicamente para los caudales más altos, cuando se tienen relaciones de llenado mayores a 0,6, se presenta un flujo estable dentro de la sección circular.

### **6.3.2.3 Análisis del flujo en las curvaturas en planta dentro del trazado del Túnel de Desvío con la geometría definida para la Fase III.**

Para el análisis sobre la generación de ondas cruzadas en las dos curvas en planta que presenta la alineación del Túnel de Desvío, se calcula a continuación el respectivo número de curva  $B_0$  definido como el producto  $Fr * (b/R)^{1/2}$ , donde  $b$  es el ancho de la superficie libre del agua en el túnel circular,  $Fr$  es el número de Froude y  $R$  el radio medio de curvatura.

Se analiza para el único valor de radio medio de curvatura  $R_1 = R_2 = 400$  m.

**Cuadro No. 60:** Valores del Número de Curva para el Túnel de Desvío.

<b>Caudal medido (<math>m^3/s</math>)</b>	<b>Ubicación de la sección</b>	<b>y/D en la curvatura en planta</b>	<b>Valores de Froude medidos</b>	<b>Ancho del espejo de aguas en la sección</b>	<b>Número de Curva <math>B_0</math>, <math>R = 400 m</math></b>
101,35	PRIMERA CURVA EN PLANTA, $R = 400 m$				
	TD – 3	0,22	2,63	7,46	0,36
	SEGUNDA CURVA EN PLANTA, $R = 400 m$				
	TD – 4	0,24	2,21	7,70	0,31
	TD – 5	0,23	2,36	7,61	0,33
200,64	PRIMERA CURVA EN PLANTA, $R = 400 m$				
	TD – 3	0,27	3,57	7,97	0,50
	SEGUNDA CURVA EN PLANTA, $R = 400 m$				
	TD – 4	0,31	2,72	8,31	0,39
	TD – 5	0,30	2,81	8,27	0,40
499,66	PRIMERA CURVA EN PLANTA, $R = 400 m$				
	TD – 3	0,46	3,14	8,97	0,47
	SEGUNDA CURVA EN PLANTA, $R = 400 m$				
	TD – 4	0,45	3,20	8,96	0,48
	TD – 5	0,48	2,92	8,99	0,44
800,27	PRIMERA CURVA EN PLANTA, $R = 400 m$				
	TD – 3	0,59	3,13	8,86	0,47
	SEGUNDA CURVA EN PLANTA, $R = 400 m$				
	TD – 4	0,59	3,08	8,84	0,46
	TD – 5	0,65	2,56	8,57	0,37
1.128,63	PRIMERA CURVA EN PLANTA, $R = 400 m$				
	TD – 3	0,77	2,60	7,58	0,36
	SEGUNDA CURVA EN PLANTA, $R = 400 m$				
	TD – 4	0,81	2,33	7,05	0,31
	TD – 5	0,85	2,08	6,39	0,26

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara



Los valores obtenidos para el número de curva  $B_0$ , en todos los casos, son menores a 1,5, por lo que las dos curvaturas son consideradas débiles y los efectos sobre la generación de ondas cruzadas en el flujo del Túnel de Desvío es relativamente menor. Las dos curvas en planta que describe la alineación del Túnel de Desvío, con un radio medio igual a 400 m, presentan una baja tendencia a la generación de ondas cruzadas, por lo que el flujo a lo largo de las curvaturas en planta es relativamente aceptable. Sin embargo, las observaciones en el modelo físico muestran que a pesar de los valores bajos del número de curva, se generan ondas cruzadas. Esta tendencia es similar en toda la gama de caudales ensayados.

La longitud del tramo recto que continúa aguas abajo de la segunda curva del Túnel de Desvío no tiene una longitud suficiente para disminuir el efecto ondulatorio del flujo.

#### **6.3.2.4 Análisis del índice de cavitación en el Túnel de Desvío con la geometría definida para la Fase III.**

**Cuadro No. 61:** Índices críticos de cavitación  $\sigma_i$  según el grado de tolerancia sin aireación para el Túnel de Desvío.

<b>Caudal medido (<math>m^3/s</math>)</b>	<b>y (m)</b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Tolerancia sin aireación</b>
101,15	1,405	15,95	0,68	T1
	1,890	10,42	1,68	T1
	1,985	9,71	1,95	T1
	2,168	8,57	2,55	T1
	2,098	8,98	2,31	T1
	2,138	8,74	2,45	T1
	1,338	8,40	2,43	T1
200,64	1,685	24,35	0,30	T3
	2,370	14,99	0,85	T1
	2,410	14,65	0,90	T1
	2,768	12,08	1,37	T1
	2,728	12,33	1,31	T1
	2,953	11,05	1,66	T1
	2,003	11,13	1,49	T1
499,66	3,155	25,13	0,33	T3
	3,850	19,23	0,60	T2
	4,130	17,45	0,73	T1
	4,090	17,77	0,71	T1
	4,290	16,70	0,82	T1
	4,360	16,36	0,86	T1
	3,633	15,28	0,93	T1
800,27	4,485	25,27	0,37	T3
	4,908	22,56	0,47	T2
	5,300	20,54	0,59	T2
	5,340	20,35	0,60	T2
	5,880	18,18	0,79	T1
	5,985	17,81	0,83	T1
	4,970	17,89	0,76	T1
1.128,63	5,990	25,10	0,42	T2
	6,055	24,79	0,43	T2
	6,930	21,47	0,61	T1
	7,295	20,43	0,69	T1
	7,665	19,55	0,77	T1

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Los resultados obtenidos muestran que la tolerancia sin aireación se califica como T2 o como T1 en todas las secciones, de acuerdo a los valores definidos por el U.S. Bureau of Reclamation.

Sin embargo las características de operación observadas con los máximos caudales en el Túnel de Desvío, permite concluir que existe una deficiencia de ventilación que favorece la presencia de presiones negativas. Sin embargo no existe tendencia a cavitación.

Para la operación totalmente ventilada, se logra un flujo libre de riesgo de cavitación, lo que puede comprobarse con el rango de presiones medidas a lo largo del túnel.

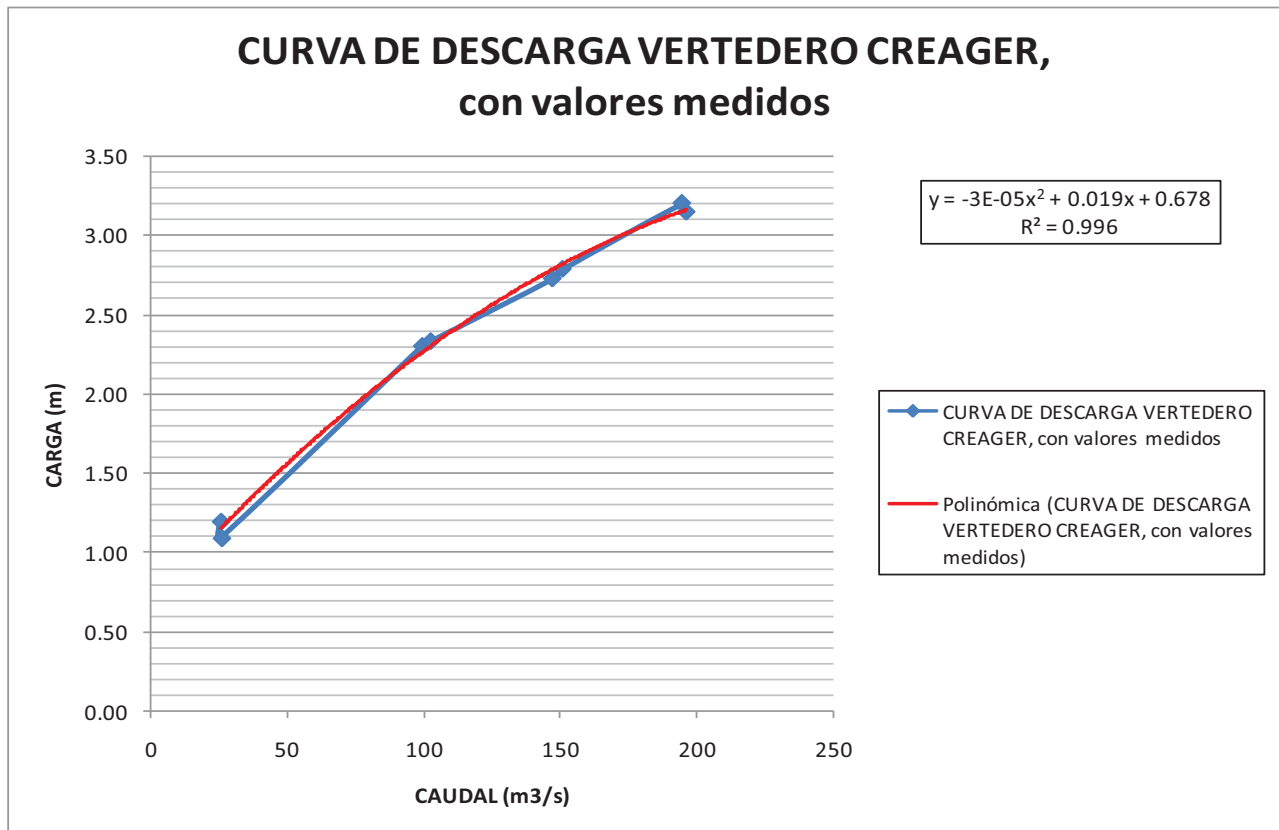
### **6.3.3 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS EN EL VERTEDERO TIPO CREAGER EN LA ENTRADA AL TÚNEL DE DESCARGA INTERMEDIA.**

#### **6.3.3.1 Curva de Descarga para el vertedero tipo Creager.**

Se realizaron las pruebas para la serie de los caudales: 25, 100, 150 y 200 m<sup>3</sup>/s, que son valores referenciales expresados para el prototipo.

La Figura No. 38 muestra la Curva de Descarga del Vertedero tipo Creager con la geometría modificada para la Fase III de la investigación.

**Figura No. 38:** Curva de Descarga: Caudal vs. Cota de la superficie libre del agua sobre el cimacio. Fase III (Valores medidos y curva calculada con ajuste de curva polinómica de segundo orden).



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Se pudo constatar que no existe variación significativa entre el funcionamiento del vertedero tipo Creager definido para la Fase I y el estudiado en la Fase III. Esto se refleja en la similitud de las curvas de descarga obtenidas para la operación de esta estructura con toda la gama de caudales de operación.

El coeficiente de descarga  $C_0$ , para un valor  $P/H_0 > 3$ , es igual a 3,95, en unidades inglesas. Este valor máximo del coeficiente  $C_0$ , en unidades del Sistema Internacional, es igual a 2,18 siendo el mismo valor que el obtenido en la Primera Fase.

En las siguientes fotografías se observa la calidad del flujo observado sobre el cimacio del vertedero tipo Creager con la geometría modificada para la Fase III. No se presentan ondulaciones importantes ni asimétricas en el cimacio.

**Fotografía No. 85:** Comportamiento del flujo sobre el perfil Creager para  $Q=25 \text{ m}^3/\text{s}$ , se observa la presencia de ondas cruzadas.



**Fotografía No. 86:** Comportamiento del flujo sobre el perfil Creager para  $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ , para caudales menores la presencia de ondas cruzadas.



**Fotografía No. 87:** Comportamiento del flujo sobre el perfil Creager para  $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Fotografía No. 88:** Comportamiento del flujo sobre el perfil Creager para  $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$  (máximo).





**Fotografía No. 89:** Vista en planta del comportamiento del flujo sobre el perfil Creager para  $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$  (máximo), se observa la presencia de ondas cruzadas.



#### **6.3.4 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES Y PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS EN EL TÚNEL DE DESCARGA INTERMEDIA.**

##### **6.3.4.1 Análisis de las profundidades a lo largo del Túnel de Descarga Intermedia.**

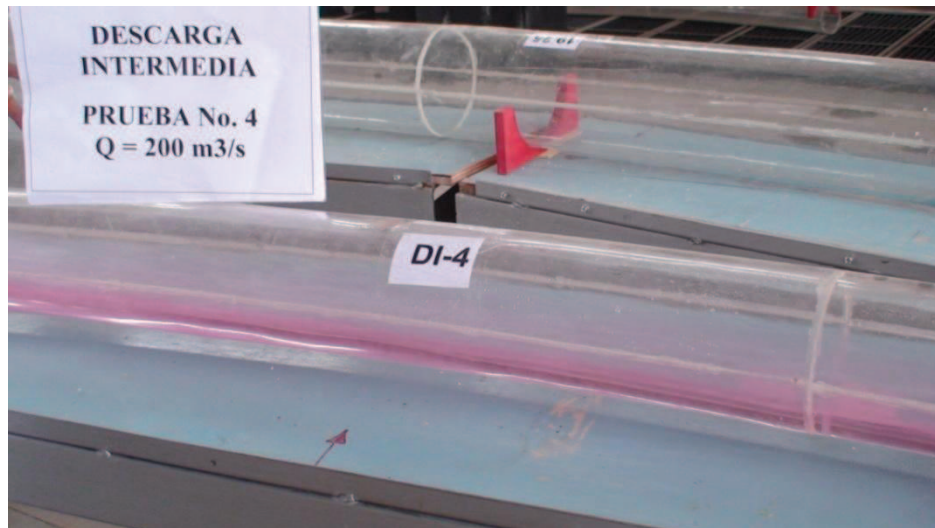
De conformidad con el Plan de Pruebas aprobado para la Fase III, se realizaron las pruebas para la serie de caudales: 25, 100, 150 y  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ , que son valores referenciales expresados para el prototipo.

En las siguientes fotografías y en la serie presentada en el Anexo No. 2C se observa el comportamiento aceptable y eficiente del flujo a lo largo del Túnel de Descarga Intermedia, para la gama de los caudales ensayados.

**Fotografía No. 90:** Flujo a superficie libre, a lo largo del túnel de Descarga Intermedia para  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se observa la formación de las ondas cruzadas en el tramo inicial.



**Fotografía No. 91:** Comportamiento del flujo a superficie libre en la curva en planta de la Descarga Intermedia para  $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ .





**Fotografía No.92:** Comportamiento del flujo a superficie libre en el Túnel de la Descarga Intermedia en el tramo próximo a la salida para  $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ .



El flujo observado para toda la gama de caudales ensayados en el túnel de Descarga Intermedia corresponde a un flujo supercrítico con los mayores valores de velocidad y del parámetro adimensional Froude en el tramo inicial del túnel, al pie del vertedero Creager, donde se tiene la pendiente del 16%. En los Cuadros No. 63 a 66 se muestran los resultados del procesamiento de los datos experimentales para las pruebas en el modelo.

La ubicación de los puntos de medición a lo largo del túnel de Descarga Intermedia se presentan en el plano No. 13-M del Anexo No.1 y se resumen en el siguiente cuadro, en donde se señalan las abscisas tanto para prototipo como para modelo.

**Cuadro No. 62:** Ubicación en prototipo y en modelo de los puntos de medición a lo largo del túnel de Descarga Intermedia.

<b>Punto de Medición</b>	<b>Abscisa Prototipo (m)</b>	<b>Abscisa Modelo (m)</b>	<b>Observaciones</b>
DI – 1	8,00	-0,16	Aguas arriba del Vertedero Creager
DI – 2	45,75	0,92	Fin de la 1era. Transición. $i_0 = 16 \%$
DI – 3	191,75	3,84	Inicio de la curva horizontal. $i_0 = 2 \%$
DI – 4	274,00	5,48	En la curva horizontal. $i_0 = 2 \%$
DI – 5	444,65	8,89	Fin de la curva horizontal. $i_0 = 2 \%$
DI – 6	481,00	9,62	En la transición a la salida. $i_0 = 2 \%$

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Cuadro No. 63:** Variables hidrodinámicas calculadas con el valor medido de la profundidad de agua en el túnel de la Descarga Intermedia,  $Q = 25,51 \text{ m}^3/\text{s}$ . Las mayores velocidades de flujo se presentan en el tramo de mayor pendiente. Los porcentajes de llenados son menores al 30%.

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 1: DESCARGA INTERMEDIA</b>									
Caudal DI ( $\text{m}^3/\text{s}$ )=	25,51								
Diámetro (m)=	6,00								
Ancho sección baúl=	6,00								
Rugosidad absoluta (mm)=	0,60								
<b>Pto. medida</b>	<b><math>y_{\text{medido}}</math> (m)</b>	<b><math>y/D</math></b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\lambda_{\text{prototipo}}</math></b>	<b><math>n_{\text{calculado}}</math></b>	<b><math>Fr_{\text{prototipo}}</math></b>	
DI-2	0,47	0,08	24,64	2,99E+07	4,94E-04	0,0277	0,0154	13,89	
DI-3	0,87	0,15	10,03	2,17E+07	2,77E-04	0,0236	0,0156	4,13	
DI-4	1,24	0,21	6,06	1,80E+07	2,01E-04	0,0217	0,0158	2,08	
DI-5	1,25	0,21	5,99	1,80E+07	2,00E-04	0,0217	0,0158	2,05	
DI-6	0,96	0,16	4,42	1,29E+07	2,05E-04	0,0218	0,0158	1,44	
n PROMEDIO EN TUNEL:							0,0157		

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Cuadro No. 64:** Variables hidrodinámicas calculadas con el valor medido de la profundidad de agua en el túnel de la Descarga Intermedia,  $Q = 99,40 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se observan velocidades de flujo relativamente altas, obteniéndose los mayores valores para el tramo de mayor pendiente. El valor del Froude a la salida del túnel es el menor registrado.

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 2: DESCARGA INTERMEDIA</b>									
Caudal DI ( $\text{m}^3/\text{s}$ )=		99,40							
Diámetro (m)=		6,00							
Ancho sección baúl=		6,00							
Rugosidad absoluta (mm)=		0,60							
<b>Pto. medida</b>	<b><math>y</math> medido (m)</b>	<b><math>y/D</math></b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\lambda</math> prototipo</b>	<b><math>n</math> calculado</b>	<b><math>Fr_{\text{prototipo}}</math></b>	
DI-2	1,25	0,21	23,43	7,01E+07	2,00E-04	0,0217	0,0158	8,00	
DI-3	1,49	0,25	18,24	6,36E+07	1,72E-04	0,0208	0,0159	5,68	
DI-4	1,81	0,30	13,80	5,69E+07	1,45E-04	0,0200	0,0160	3,85	
DI-5	1,73	0,29	14,72	5,85E+07	1,51E-04	0,0202	0,0160	4,22	
DI-6	1,43	0,24	11,63	4,49E+07	1,55E-04	0,0203	0,0160	3,11	
n PROMEDIO EN TUNEL:							0,0159		

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Cuadro No. 65:** Variables hidrodinámicas calculadas con el valor medido de la profundidad de agua en el túnel de la Descarga Intermedia,  $Q = 147,20 \text{ m}^3/\text{s}$ .

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 3: DESCARGA INTERMEDIA</b>									
Caudal DI ( $\text{m}^3/\text{s}$ )=	147,20								
Diámetro (m)=	6,00								
Ancho sección baúl=	6,00								
Rugosidad absoluta (mm)=	0,60								
<b>Pto. medida</b>	<b><math>y_{\text{medido}}</math> (m)</b>	<b><math>y/D</math></b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\lambda_{\text{prototipo}}</math></b>	<b><math>n_{\text{calculado}}</math></b>	<b><math>Fr_{\text{prototipo}}</math></b>	
DI-2	1,75	0,29	21,41	8,59E+07	1,50E-04	0,0201	0,0160	6,09	
DI-3	1,71	0,29	22,20	8,72E+07	1,52E-04	0,0202	0,0160	6,41	
DI-4	1,97	0,33	18,28	8,05E+07	1,36E-04	0,0197	0,0161	4,88	
DI-5	2,11	0,35	16,61	7,73E+07	1,29E-04	0,0194	0,0161	4,26	
DI-6	1,53	0,26	16,01	6,50E+00	1,48E-04	0,0201	0,0160	2,13	
n PROMEDIO EN TUNEL:							0,0160		

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

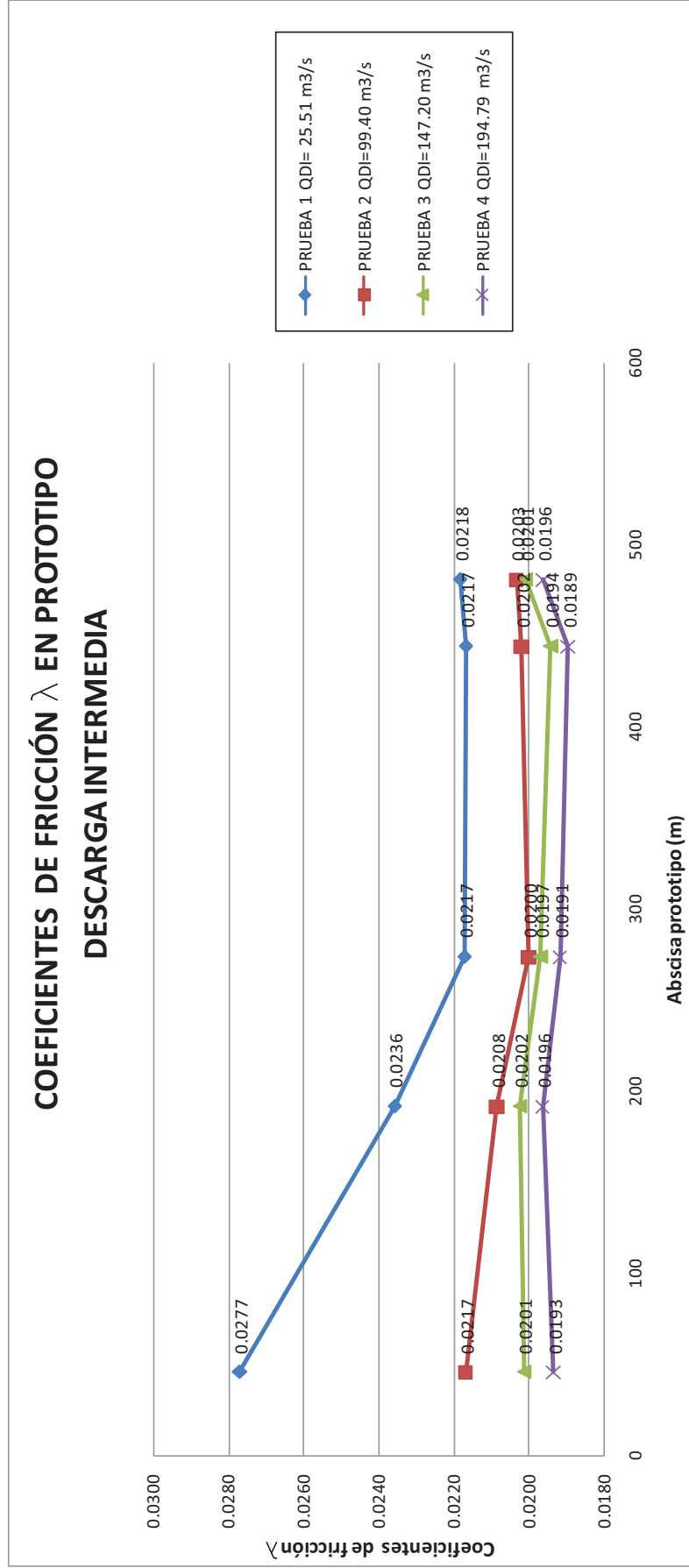
**Cuadro No. 66:** Variables hidrodinámicas calculadas con el valor medido de la profundidad de agua en el túnel de la Descarga Intermedia,  $Q = 194,79 \text{ m}^3/\text{s}$ . Los valores de velocidad superan el rango de 21 m/s en el tramo de mayor pendiente. Sin embargo en el tramo de pendiente 2% se alcanzan también velocidades del orden de 19 m/s.

<b>CALCULOS PARA DATOS EN PROTOTIPO</b>									
<b>PRUEBA No. 4: DESCARGA INTERMEDIA</b>									
Caudal DI ( $\text{m}^3/\text{s}$ )=		194,79							
Diámetro (m)=		6,00							
Ancho sección baúl=		6,00							
Rugosidad absoluta (mm)=		0,60							
<b>Pto. medida</b>	<b><math>Y_{\text{medido}}</math> (m)</b>	<b><math>y/D</math></b>	<b>Velocidad media de flujo (m/s)</b>	<b>Reynolds</b>	<b>Rugosidad relativa (-)</b>	<b><math>\lambda_{\text{prototipo}}</math></b>	<b><math>n_{\text{calculado}}</math></b>	<b><math>Fr_{\text{prototipo}}</math></b>	
DI-2	2,16	0,36	21,29	1,01E+08	1,26E-04	0,0193	0,0161	5,39	
DI-3	1,99	0,33	23,73	1,06E+08	1,34E-04	0,0196	0,0161	6,29	
DI-4	2,27	0,38	19,93	9,81E+07	1,21E-04	0,0191	0,0162	4,91	
DI-5	2,41	0,40	18,29	8,15E+07	1,16E-04	0,0189	0,0162	4,34	
DI-6	1,78	0,30	18,21	9,45E+07	1,34E-04	0,0196	0,0161	4,35	
n PROMEDIO EN TUNEL:						0,0161			

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

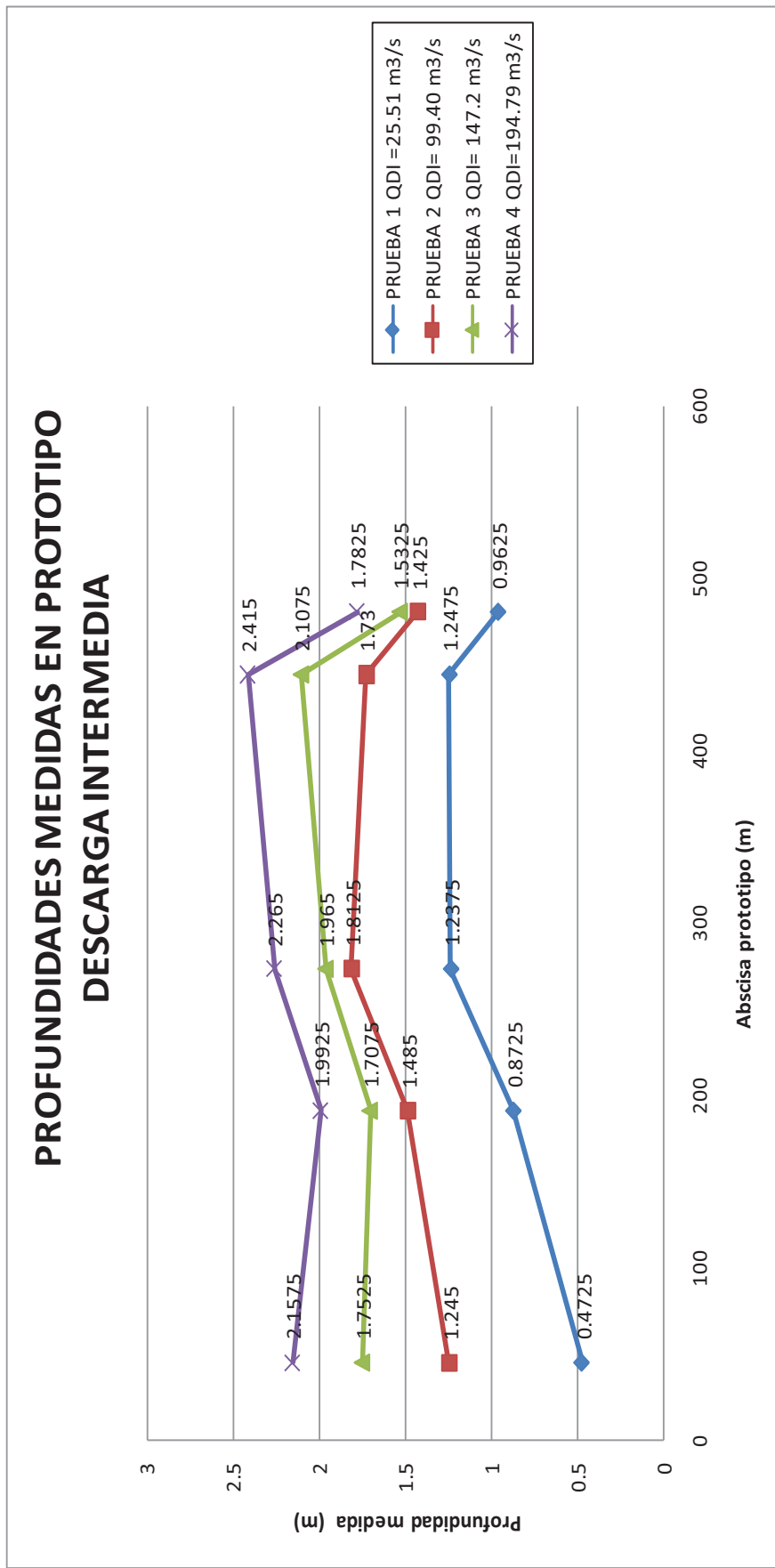
A continuación se presentan las figuras con el gráfico de las profundidades medidas a lo largo del eje del túnel de Descarga Intermedia.

**Figura No. 39:** Perfiles de Flujo medidos a lo largo del túnel de la Descarga Intermedia. Se observa que debido al cambio de la forma de la sección transversal en la salida del túnel de Descarga Intermedia se observa un decremento de la profundidad medida. El porcentaje de llenado para el tramo de Descarga Intermedia donde se han registrado los valores máximos de profundidades medidas no alcanza el 50% para el caudal de diseño de esta estructura.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Figura No. 40:** Valores del coeficiente de fricción  $\lambda$  calculado para el túnel de Descarga Intermedia. Se observa una tendencia creciente con la disminución del caudal.



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara



De acuerdo a los valores de profundidad de flujo registrados a lo largo del túnel de la Descarga Intermedia, que se presentan en la figura No. 39, se observa una disminución del calado en el último punto de medición, que corresponde al registrado en la sección final con geometría baúl. En la Primera Fase se obtuvo un perfil de flujo gradualmente variado hasta la estructura de unión, debido a que se mantenía la geometría de la sección transversal en toda esta longitud. Los mayores valores de profundidad registrados en toda la gama de caudales ensayados se alcanza en la sección de medida DI-4, que corresponde a un punto en el desarrollo de la curvatura en planta.

En todos los caudales ensayados a lo largo del túnel de la Descarga Intermedia se observa que éste trabaja con proporciones de llenados inferiores al 50% de su altura total. El flujo, aún para el caudal máximo, presenta una superficie libre cuya ubicación deja un bordo libre muy amplio. Por esta razón la presencia de las ondas cruzadas no incide en la capacidad hidráulica ni en la capacidad de ventilación del túnel.

Los valores de coeficientes de fricción calculados, a lo largo del túnel de Descarga Intermedia presentan una variación inversamente proporcional con el caudal. Considerando una rugosidad absoluta de 0,6 mm, para el terminado del hormigón en el prototipo, se considera que el comportamiento del túnel corresponderá al hidráulicamente rugoso. Los valores del coeficiente de rugosidad  $n$  en la ecuación de Manning, estimados a partir de los valores obtenidos del coeficiente de fricción  $\lambda$  sin embargo presentan una relación creciente con el caudal de circulación en el túnel debido a la influencia del valor registrado para el radio hidráulico, que también es creciente con el caudal.

**Cuadro No. 67:** Cuadro de resumen de valores promedio del coeficiente de fricción ( $\lambda$ ) y coeficiente de rugosidad ( $n$ ) a lo largo del túnel de Descarga Intermedia.

<b>Caudal</b> <i>m<sup>3</sup>/s</i>	$\lambda$	$n$	<b>Observaciones</b>
194.79	0.0193	0.0161	Mayor que el valor adoptado en diseño original
147.20	0.0199	0.0161	Mayor que el valor adoptado en diseño original
99.40	0.0206	0.0160	Mayor que el valor adoptado en diseño original
25.51	0.0233	0.0157	Mayor que el valor adoptado en diseño original

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

#### **6.3.4.2 Análisis de la estabilidad del flujo en el Túnel de Descarga Intermedia.**

Considerando los valores del Froude Crítico para secciones circulares se observa que, para la gama de caudales ensayados, el flujo en la Descarga Intermedia es en su mayoría inestable.

En el siguiente cuadro se presentan los valores del parámetro adimensional Froude obtenido a base de las profundidades medidas en el modelo físico en el tramo con pendiente longitudinal igual al 16%, que resultaría crítica para el criterio de estabilidad y también en el tramo con pendiente del 2%.

**Cuadro No. 68:** Valores del parámetro Froude en el túnel de Descarga Intermedia.

<b>Caudal medido (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Rango de valores y/D</b>	<b>Valores de Froude medidos</b>	<b>Valores de Froude críticos para la sección</b>	<b>Calificación del flujo</b>
25,51	0,08	13,90	2,28	Inestable
	0,15	4,13	2,30	Inestable
	0,21	2,08	2,35	Estable
	0,21	2,05	2,35	Estable
	0,16	1,44	2,32	Estable
99,40	0,21	8,01	2,35	Inestable
	0,25	5,68	2,45	Inestable
	0,30	3,85	2,52	Inestable
	0,29	4,22	2,50	Inestable
	0,24	3,11	2,42	Inestable
147,20	0,29	6,09	2,50	Inestable
	0,28	6,41	2,49	Inestable
	0,33	4,88	2,55	Inestable
	0,35	4,26	2,60	Inestable
	0,26	4,13	2,47	Inestable
194,79	0,36	5,39	2,65	Inestable
	0,33	6,29	2,55	Inestable
	0,38	4,91	2,70	Inestable
	0,40	4,34	2,75	Inestable
	0,30	4,36	2,52	Inestable

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

### 6.3.4.3 Análisis del flujo en las curvaturas en planta dentro del trazado del Túnel de Descarga Intermedia.

**Cuadro No. 69:** Valores del Número de Curva para el túnel de Descarga Intermedia.

<i>Caudal medido (m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>Ubicación de la sección</i>	<i>y/D en la curvatura en planta</i>	<i>Valores de Froude medidos</i>	<i>Ancho del espejo de aguas en la sección (m)</i>	<i>Número de Curva B<sub>0</sub>, R = 250 m</i>
25,51	CURVA EN PLANTA, R = 250 m				
	DI - 4	0,21	2,08	4,86	0,29
	DI - 5	0,21	2,05	4,87	0,29
99,40	CURVA EN PLANTA, R = 250 m				
	DI - 4	0,30	3,85	5,51	0,57
	DI - 5	0,29	4,22	5,44	0,62
147,20	CURVA EN PLANTA, R = 250 m				
	DI - 4	0,33	4,88	5,63	0,73
	DI - 5	0,35	4,26	5,73	0,65
194,79	CURVA EN PLANTA, R = 250 m				
	DI - 4	0,38	4,91	5,82	0,75
	DI - 5	0,40	4,34	5,88	0,67

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

El radio de curvatura en el cambio de alineación del túnel de Descarga Intermedia es igual a 250 m. Los valores obtenidos para el número de curva  $B_0$ , en todos los casos, son menores a 1,5, por lo que la curvatura puede considerarse débil y el efecto sobre la generación de ondas cruzadas en el flujo de la Descarga Intermedia es relativamente menor. Sin embargo, las observaciones en el modelo físico muestran que a pesar de los valores bajos del número de curva, se generan ondas cruzadas. Esta tendencia es similar en toda la gama de caudales ensayados. Para el caso de la Descarga Intermedia el efecto de las ondas cruzadas se considera de menor importancia por el sobredimensionamiento de la sección.

#### 6.3.4.4 Análisis del índice de cavitación en el Túnel de Descarga Intermedia.

**Cuadro No. 70:** Índices críticos de cavitación  $\sigma_i$  según el grado de tolerancia sin aireación para el túnel de Descarga Intermedia.

<i>Caudal medido (m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>y (m)</i>	<i>Velocidad media de flujo (m/s)</i>	$\sigma$	<i>Tolerancia sin aireación</i>
25,51	0,473	26,64	0,25	T3
	0,873	10,03	1,61	T1
	1,238	6,06	4,60	T1
	1,248	5,99	4,72	T1
	0,963	4,42	8,40	T1
99,40	1,250	23,43	0,31	T3
	1,490	18,24	0,52	T2
	1,810	13,80	0,95	T1
	1,730	14,72	0,83	T1
	1,430	11,63	1,28	T1
147,20	1,753	21,41	0,39	T3
	1,708	22,20	0,36	T3
	1,965	18,28	0,55	T2
	2,108	16,61	0,68	T1
	1,533	16,01	0,68	T1
194,79	2,158	3,01	0,41	T2
	1,993	3,36	0,33	T3
	2,265	2,82	0,48	T2
	2,415	2,59	0,58	T2
	1,783	2,58	0,54	T2

Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

Los resultados obtenidos muestran que existe eventualmente un bajo riesgo de cavitación en el tramo inicial de la Descarga Intermedia, al pie del vertedero Creager. A partir de esta sección la tolerancia sin aireación se califica como T2 o como T1, de acuerdo a los valores definidos por el U.S. Bureau of Reclamation.

## 6.4 CONCLUSIONES

- ❖ Para la gama de caudales ensayados los valores de  $n$  son mayores que los propuestos en el diseño original.
- ❖ El flujo observado para la gama de caudales ensayados en el Túnel de Desvío corresponde a un flujo supercrítico con los mayores valores de velocidad y del parámetro adimensional Froude en el tramo inicial donde se tiene la pendiente del 18%.
- ❖ Los valores promedio del coeficiente de fricción y del coeficiente de rugosidad  $n$  estimados a lo largo del Túnel de Desvío para el rango de caudales ensayados en la Fase III ratifican los obtenidos en la Fase II de la investigación.
- ❖ A lo largo del túnel de la Descarga Intermedia en todos los caudales ensayados se observa que éste trabaja con proporciones de llenados inferiores al 50% de su altura total. Para el caudal máximo el túnel de Descarga Intermedia presenta una superficie libre cuya ubicación deja un bordo libre muy amplio. Por esta razón la presencia de las ondas cruzadas no incide en la capacidad hidráulica ni en la capacidad de ventilación del túnel.
- ❖ Los resultados obtenidos en el túnel de Descarga Intermedia permiten concluir que el flujo se desarrolla con flujo inestable, por los bajos porcentajes de llenado. La mayor inestabilidad se presenta en el tramo con mayor pendiente, en donde los valores del parámetro adimensional Froude son también mayores.
- ❖ En el Túnel de Desvío mediante la calificación de la calidad de flujo se tiene que para los caudales bajos prácticamente el flujo escurre con inestabilidad, en el tramo inicial con pendiente del 18%. Únicamente para

los caudales más altos, cuando se tienen relaciones de llenado mayores a 0,6, se presenta un flujo estable dentro de la sección circular.

- ❖ Considerando los valores del Froude Crítico para secciones circulares se observa que, para la gama de caudales ensayados, el flujo en la Descarga Intermedia es en su mayoría inestable calificado así por la calidad del flujo mediante valores de Froude.
- ❖ Las dos curvas en planta del Túnel de Desvío presentan una baja tendencia a la generación de ondas cruzadas, por lo que el flujo a lo largo de las curvaturas en planta es relativamente aceptable. Sin embargo, las observaciones en el modelo físico muestran que a pesar de los valores bajos del número de curva, se generan ondas cruzadas. Esta tendencia es similar en toda la gama de caudales ensayados. Ocurre de forma similar para la Descarga Intermedia pero el efecto de las ondas cruzadas se considera de menor importancia por el sobredimensionamiento de la sección.
- ❖ Las características de operación observadas con los máximos caudales en el Túnel de Desvío, permite concluir que existe una deficiencia de ventilación que favorece la presencia de presiones negativas. Sin embargo no existe tendencia a cavitación.
- ❖ En el tramo inicial de la Descarga Intermedia, al pie del vertedero tipo Creager los resultados obtenidos muestran que existe eventualmente un bajo riesgo de cavitación en el tramo inicial.

## **CAPÍTULO 7**

### **SELECCIÓN Y ESTUDIO EXPERIMENTAL CON EL DISEÑO RECOMENDADO**

#### **7.1 DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS MODIFICADAS PARA COMPROBACIÓN**

Se analizó experimentalmente una modificación geométrica adicional del estribo derecho de la estructura de entrada al Túnel de Desvío, con el fin de optimizar el funcionamiento de la misma.

##### **7.1.1 MODIFICACIONES GEOMÉTRICAS DEL ESTRIBO DERECHO**

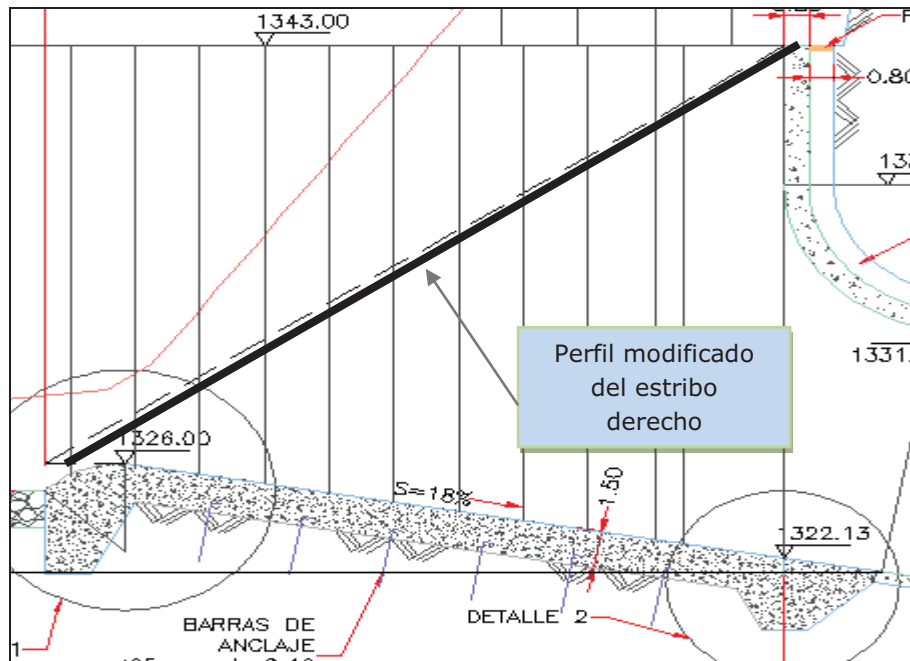
###### **7.1.1.1 Descripción de la geometría propuesta para la primera modificación del estribo derecho.**

La primera modificación consiste en cambiar gradualmente la altura del estribo. Esta nueva geometría mantiene la alineación y la longitud inferior del estribo igual a 24,90 m, en la base, junto a la plataforma de ingreso. La cota del estribo se inicia con la misma altura de la cresta del umbral, es decir 1.326,0 msnm y su altura crece gradualmente hasta la cota 1.343,0 msnm en la sección de entrada al Túnel de Desvío. El contorno superior del estribo presenta una geometría semicircular.

En la siguiente figura se presenta el corte del estribo derecho con sus características constructivas en el modelo y además se muestran en las fotografías Nos. 93 y 94.



**Figura No. 41:** Vista en perfil de Modificación MI-1



Elaborado: Jenny Carrera. Victoria Lara

**Fotografía No. 93:** Vista en planta de geometría propuesta en la primera modificación del estribo derecho de la Estructura de Entrada al Túnel de Desvío.



**Fotografía No. 94:** Perfil del estribo derecho. Se observa la variación gradual de su altura.



Para el análisis experimental del funcionamiento de la nueva geometría del estribo derecho se realizaron las pruebas que se presentan en el siguiente cuadro, cuyo objetivo principal es lograr la visualización del patrón de flujo de ingreso hacia el Túnel de Desvío.

**Cuadro No. 71:** Plan de Pruebas para análisis de la calidad del flujo de ingreso hacia el Túnel de Desvío con la primera modificación del estribo derecho.

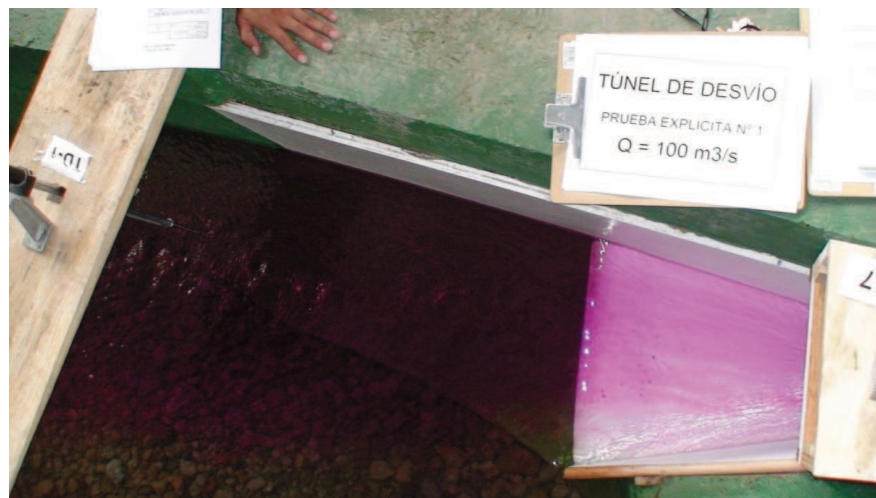
PRUEBA No.	TÚNEL DE DESVÍO		CAUDAL TOTAL		OBSERVACIONES
	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal modelo (l/s)	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal modelo (l/s)	
1	100	5,7	100	5,7	Visualización del patrón de flujo
2	200	11,3	200	11,3	
3	500	28,3	500	28,3	
4	800	45,3	800	45,3	
5	1.130	63,9	1.130	63,9	

Fuente: Informe de Fase III, Modelo Hidráulico del Túnel de Desvío de la Central Paute Molino.

### 7.1.1.2 Análisis del funcionamiento de la Primera Modificación geométrica del estribo derecho

En la siguiente serie de fotografías se presentan las características observadas en el patrón de flujo de ingreso hacia la sección inicial del Túnel de Desvío, con el estribo derecho de altura variable.

**Fotografía No. 95:** Funcionamiento de estructura de ingreso para  $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ , con diseño propuesto para la primera modificación del estribo derecho. Se observa una asimetría en el flujo junto al estribo derecho.

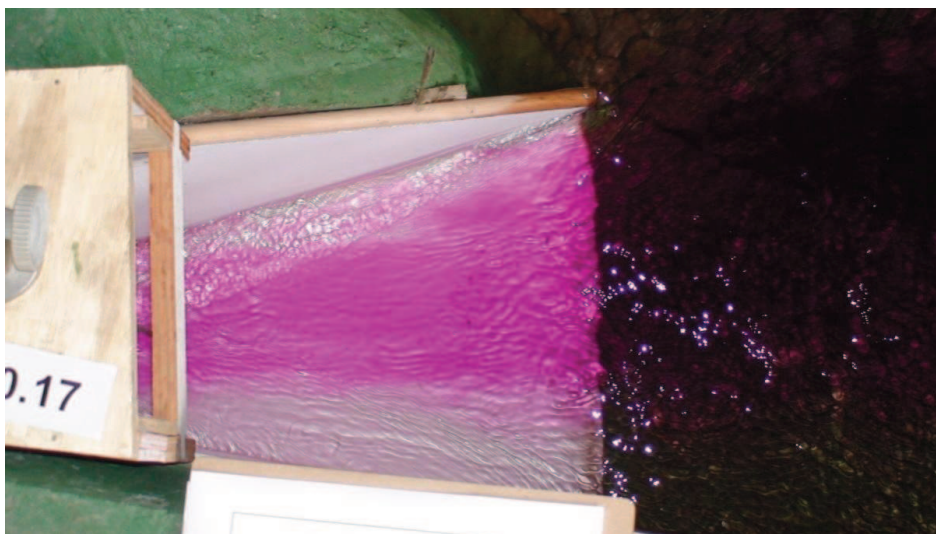


**Fotografía No.96:** Funcionamiento de estructura de ingreso para  $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ , con la primera modificación del estribo derecho. Se observa la formación de una onda que se inicia con el estribo.





**Fotografía No. 97:** Funcionamiento de estructura de ingreso para  $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Se observa la presencia de una onda asimétrica de mayor magnitud.



**Fotografía No. 98:** Se observa una aproximación asimétrica del flujo provocada por la onda que se inicia en el extremo del estribo derecho. ( $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$ ).



**Fotografía No. 99:** Funcionamiento de estructura de ingreso para  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ , con la primera modificación geométrica del estribo derecho. Se mantiene un flujo de aproximación asimétrico.



**Fotografía No. 100:** Se observa el vertido lateral sobre el estribo derecho que provoca un efecto de contracción seguido por la reflexión del flujo en la pared lateral derecha. Se mantiene la asimetría del flujo de aproximación hacia la boca del túnel. ( $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 101:** Vista en planta del funcionamiento de la estructura de ingreso para  $Q=800 \text{ m}^3/\text{s}$ , con la primera modificación del estribo derecho.



**Fotografía No. 102:** Se observa el vertido lateral a menor distancia de la sección inicial del túnel. El efecto de contracción y la formación de la onda de reflexión en la pared lateral son más notorios. La sobre-elevación producida inmediatamente aguas arriba de la sección de ingreso es mayor y produce asimetría en el flujo que ingresa. Esta asimetría es arrastrada hacia aguas abajo desmejorando también el flujo en el túnel propiamente dicho. ( $Q=800 \text{ m}^3/\text{s}$ ).





**Fotografía No.103:** Vista en planta del funcionamiento de la estructura de ingreso para caudal  $Q=1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ , con la modificación geométrica del estribo derecho.



**Fotografía No. 104:** La asimetría, contracción y formación de la onda lateral se produce en mayor magnitud y más cerca de la boca de entrada al túnel. El patrón del flujo de aproximación es asimétrico y desmejora la calidad del flujo dentro del túnel. ( $Q=1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ )



En la siguiente serie de fotografías se observa las características del flujo para caudales similares con la geometría inicial de Fase III y la primera modificación del estribo derecho.

**Fotografía No. 105:** Comparando las modificaciones realizadas en las paredes del estribo derecho se observa que el comportamiento del flujo mejora con la segunda modificación para  $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Fotografía No. 106:** Comparando las modificaciones en las paredes del estribo derecho, el flujo ingresa de manera uniforme con la segunda modificación para  $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$ .





**Fotografía No. 107:** Para  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$  observado en la segunda fotografía se presenta una disminución de ondas en el flujo en la bocatoma.



**Fotografía No. 108:** En las pruebas realizadas con caudal máximo  $1.130 \text{ m}^3/\text{s}$  se observa que el comportamiento del flujo a la entrada de la bocatoma mejora notablemente ingresando de forma casi uniforme.



Se observa que para todo el rango de caudales la primera modificación geométrica del estribo derecho provoca la formación de una onda junto a él, produciendo un flujo de aproximación asimétrico. Para los caudales medios y altos el vertido lateral cercano a la sección inicial del túnel provoca una mayor asimetría en el flujo de entrada. El análisis comparativo del funcionamiento de la geometría inicial de Fase III y su primera modificación permite recomendar que no es conveniente la presencia de un estribo derecho de altura variable.

### **7.1.2 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA PROPUESTA PARA LA SEGUNDA MODIFICACIÓN DEL ESTRIBO DERECHO DE LA ESTRUCTURA DE ENTRADA.**

Luego de realizadas las pruebas con la primera modificación geométrica del estribo derecho, es decir el cambio gradual de la altura del estribo, se realizó el análisis de una segunda modificación de este mismo elemento, la misma que se describe a continuación y se observa en la siguiente fotografía.

**Fotografía No.109:** Vista frontal de la segunda modificación del estribo derecho de la estructura de entrada al Túnel de Desvío.

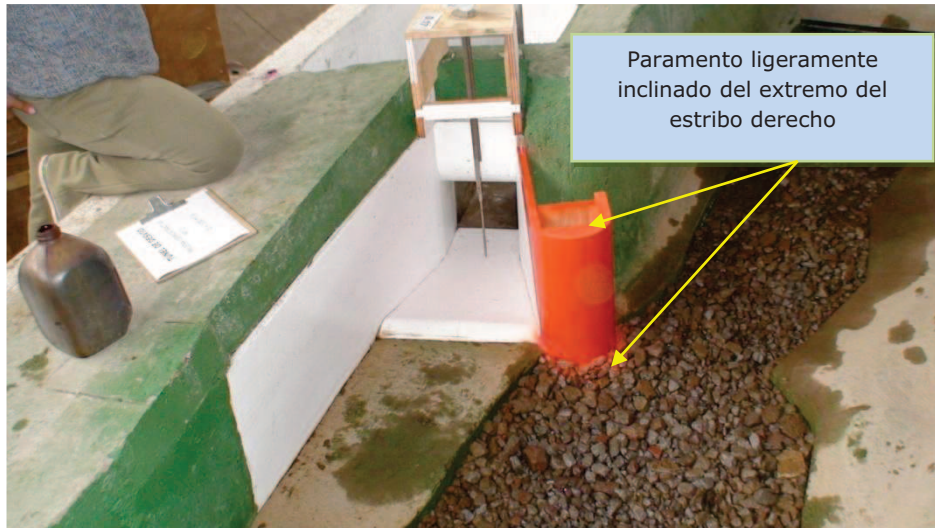


La segunda modificación geométrica del estribo derecho mantiene la implantación y la longitud de este elemento. El cambio se refiere a la configuración del extremo del estribo, el cual está formado por una pila circular cuyo radio de curvatura es igual a 4,5 m. La pila circular se desarrolla inmediatamente aguas arriba del umbral. La longitud del estribo en la base, junto a la plataforma de entrada, es igual a 24,90 m, y en su parte alta tiene una longitud ligeramente mayor, igual a 27,77 m. La base del extremo circular se ubica en la cota 1.324,89 msnm. La cota superior del extremo circular del estribo derecho se mantiene en 1.343,0 msnm. La geometría de la segunda modificación del estribo derecho se observa en las siguientes fotografías.

**Fotografía No. 110:** Vista frontal de la segunda modificación del estribo derecho de la estructura de entrada al Túnel de Desvío.



**Fotografía No. 111:** El extremo del estribo derecho en esta modificación mantiene la ligera inclinación ensayada con la geometría del estribo derecho propuesta al inicio de la Fase III de la investigación.



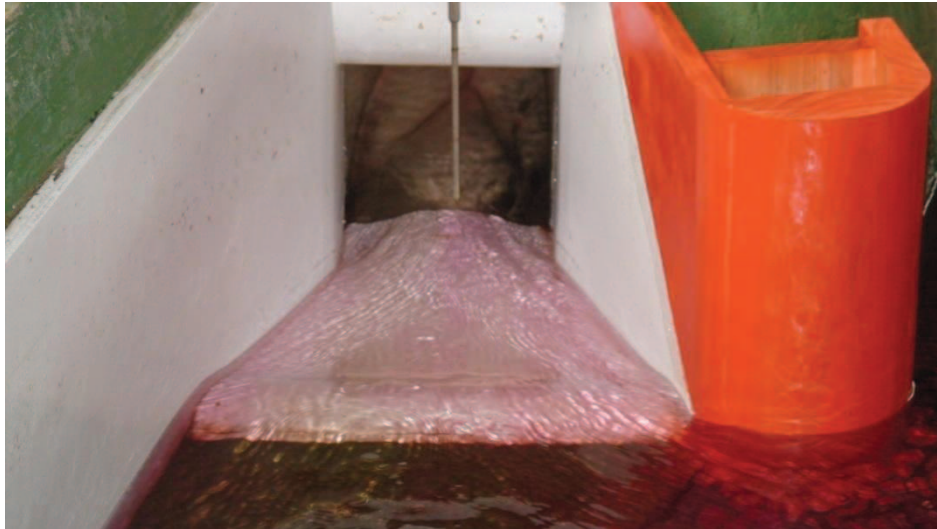
El análisis de las características del flujo de aproximación e ingreso hacia el Túnel de Desvío con la segunda modificación geométrica del estribo derecho se realizó con el mismo grupo de pruebas definidas para la primera modificación del estribo derecho.

#### **7.1.2.1 Análisis del funcionamiento de la segunda modificación geométrica del estribo derecho**

A continuación se presenta una serie de fotografías que permiten observar las características del patrón de flujo de aproximación e ingreso hacia el Túnel de Desvío con la modificación geométrica del estribo derecho.



**Fotografía No. 112:** Funcionamiento de la estructura de ingreso al Túnel de Desvío con  $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ , con la segunda modificación geométrica del estribo derecho. Se observa un patrón de flujo simétrico.



**Fotografía No. 113:** Desarrollo del flujo junto al estribo derecho. No se observa una formación de ondas mayor que en el estribo izquierdo. El efecto de contracción es reducido. ( $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 114:** Funcionamiento de la estructura de ingreso al Túnel de Desvío con  $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$ , con el extremo del estribo derecho circular.



**Fotografía No. 115:** Se observa una pequeña sobre-elevación del flujo junto a la pared lateral. No se observa un efecto de contracción en el extremo inicial del muro. ( $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$ ).





**Fotografía No. 116:** Funcionamiento de la estructura de ingreso para caudal  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ , con la segunda modificación geométrica del estribo derecho. Se observa un patrón de flujo prácticamente simétrico.



**Fotografía No. 117:** Funcionamiento de la estructura de ingreso para caudal  $Q=800 \text{ m}^3/\text{s}$ , con la segunda modificación del estribo derecho. Se observa la formación de una onda asimétrica junto a la pared lateral derecha que se inicia aguas abajo de la cabeza circular del estribo.





**Fotografía No. 118:** Se observa la onda que se inicia aguas abajo de la cabeza circular del estribo derecho. En el extremo de la pila se tiene una sobre-elevación seguida por una depresión luego de la cual se desarrolla la onda lateral.



**Fotografía No. 119:** En la estructura de ingreso para el caudal  $Q=1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ , se observa un flujo asimétrico debido a la formación de la onda junto al estribo derecho.



**Fotografía No. 120:** Se observa el desarrollo de la onda junto a la pared lateral derecha y su incremento de altura en la boca de entrada al túnel. El flujo de aproximación es asimétrico.  $Q=1.130 \text{ m}^3/\text{s}$



En la siguiente serie de fotografías se presenta el funcionamiento de las tres geometrías ensayadas para el estribo derecho de la estructura de entrada al Túnel de Desvío.

**Fotografía No. 121:** Comparación entre las diferentes modificaciones de la estructura de entrada, se observa el comportamiento de la misma para  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$





**Fotografía No. 122:** Comparación entre las diferentes modificaciones de la estructura de entrada, se observa el comportamiento de la misma para  $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 123:** Comparación entre las diferentes modificaciones de la estructura de entrada, se observa el comportamiento de la misma para  $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 124:** Comparación entre las diferentes modificaciones de la estructura de entrada, se observa el comportamiento de la misma para  $Q = 1.130 \text{ m}^3/\text{s}$





El análisis comparativo del funcionamiento hidráulico para las 3 diferentes geometrías del estribo derecho ensayadas con la gama de caudales entre 100 m<sup>3</sup>/s y 1.130 m<sup>3</sup>/s permite recomendar a la estructura que presenta la pila derecha de forma redondeada por su mejor comportamiento. La calidad del flujo de aproximación obtenida para esta geometría con el rango de caudales inferiores a los 500 m<sup>3</sup>/s es la mejor. Sin embargo las características de asimetría del patrón de flujo por la formación de ondas que se observan para la geometría inicial de Fase III y para la segunda modificación del estribo derecho son similares.

## **7.2 DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA PROPUESTA**

Luego del análisis realizado en la Fase III del Estudio se describe a continuación la geometría propuesta para los diferentes componentes del modelo:

- El funcionamiento de la estructura de entrada al Túnel de Desvío es adecuado, por lo que se recomienda mantener la geometría y el diseño de la misma. Sin embargo, luego del análisis de las modificaciones en la geometría del estribo derecho se recomienda mantener aquella que define una implantación recta con el extremo redondo cuyo radio de curvatura es igual a 4,5 m. Esta geometría permite obtener la mejor calidad de flujo de aproximación y de entrada hacia la boca del túnel.
- El Túnel de Desvío opera aceptablemente para toda la gama de caudales inferiores a los 950 m<sup>3</sup>/s, ratificándose su dimensionamiento. Para el caudal máximo de 1.130 m<sup>3</sup>/s, se observa insuficiencia del bordo libre, de manera especial en el tramo aguas abajo de la segunda curvatura en planta. La presencia de las ondas cruzadas reducen peligrosamente el bordo libre que debe garantizar adicionalmente la ventilación.
- El vertedero tipo Creager cumple con las funciones previstas en el diseño, por lo que se deberá mantener su geometría y su implantación.



- La conducción del caudal que vierte sobre el vertedero de cimacio tipo Creager a la salida de la cámara de interconexión debe mantenerse independiente del Túnel de Desvío. Se recomienda mantener el trazado en planta y en perfil así como la geometría y dimensionamiento de la sección transversal del túnel de Descarga Intermedia, pues su operación es aceptable para toda la gama de caudales analizados hasta el caudal máximo de 200 m<sup>3</sup>/s. Se debe mantener también la geometría y disposición de los tramos de transición al inicio y final del túnel.

## CAPÍTULO 8

### CONCLUSIONES

#### 8.1 CONCLUSIONES SOBRE LA METODOLOGÍA DE LA MODELACIÓN FÍSICA.

- ❖ El uso de la modelación hidráulica fusionado con el conocimiento teórico constituyen una herramienta indispensable para lograr un diseño exitoso de estructuras y obras hidráulicas frecuentemente utilizadas en Ingeniería Civil.
- ❖ En este modelo se satisface las exigencias de las similitudes geométrica, cinemática y dinámica, para este caso no es factible cumplir con los requerimientos de similitud dinámica completa por lo que científicamente se puede justificar la utilización de criterios de similitud dinámica restringida, seleccionando a las fuerzas predominantes en éste modelo hidráulico y garantizando que con el diseño y operación del modelo dichas fuerzas se encuentren simuladas en la escala apropiada.
- ❖ Se utilizó el criterio de similitud de Froude porque en el modelo existe superficie libre de agua y las fuerzas predominantes son las de gravedad y viscosidad lo que permite obtener una similitud aproximada para representar el patrón de flujo a lo largo de los Túneles de Desvío y Descarga Intermedia.
- ❖ La escala geométrica seleccionada es apropiada porque permite representar aproximadamente los fenómenos hidráulicos que van a ocurrir en prototipo.

- ❖ El modelo físico garantiza el correcto funcionamiento de los túneles porque se analiza el desarrollo del flujo a lo largo de los mismos y en la unión de las dos conducciones, el mismo que es supercrítico, inestable y altamente turbulento.

## **8.2 CONCLUSIONES SOBRE EL MODELO FÍSICO DEL TÚNEL DE DESVÍO Y DE LA DESCARGA INTERMEDIA.**

### **8.2.1 CONCLUSIONES SOBRE LA ESTRUCTURA DE ENTRADA**

- ❖ Los resultados obtenidos de las pruebas ensayadas en el modelo físico demuestran una eficiencia satisfactoria y adecuada de la estructura de entrada modificada, con la capacidad de conducir el caudal máximo de 1.130 m<sup>3</sup>/s con una cota de la superficie libre del agua igual a 1.339,39 msnm.
- ❖ El funcionamiento de la ranura de ventilación se muestra aceptable, eliminando toda tendencia a un flujo pulsatorio, de manera especial para el ingreso de los mayores caudales dentro del rango de operación definido para esta estructura.
- ❖ El flujo de aproximación alcanzado con la geometría definida en la segunda modificación experimental del estribo derecho es el que muestra mayor simetría, eliminando la formación de ondas de mayor amplitud.

### 8.2.2 CONCLUSIONES SOBRE EL TÚNEL DE DESVÍO

- ❖ En el Túnel de Desvío para el tránsito del caudal de diseño se observa que el bordo libre previsto se reduce por la presencia de las ondas, cuya amplitud se incrementa a lo largo de la segunda curvatura en planta del túnel y su tramo final, quedando en este tramo un espacio relativamente pequeño o insuficiente para garantizar la circulación del flujo con características estables y ventiladas.
- ❖ El flujo observado para toda la gama de caudales ensayados en el Túnel de Desvío corresponde a un flujo supercrítico con los mayores valores de velocidad y del parámetro adimensional Froude en el tramo inicial donde se tiene la pendiente del 18%.
- ❖ En el Túnel de Desvío se puede observar que el comportamiento del flujo en la transición final es favorable porque se conduce a superficie libre, aun para el tránsito del caudal de diseño.
- ❖ Para los caudales bajos prácticamente el flujo escurre con inestabilidad, en el tramo inicial con pendiente del 18%. Únicamente para los caudales más altos, cuando se tienen relaciones de llenado mayores a 0,6, se presenta un flujo estable dentro de la sección circular.
- ❖ Las observaciones en el modelo físico muestran que a pesar de los valores bajos del número de curva, se generan ondas cruzadas. Esta tendencia es similar en toda la gama de caudales ensayados.

- ❖ El dimensionamiento de la sección del túnel presenta un bordo libre suficiente para el rango de caudales ensayados hasta 950 m<sup>3</sup>/s. Para el caudal de diseño se observa que el diámetro de 9 m resulta insuficiente, debido a la presencia de ondas cruzadas que superan el porcentaje de llenado admisible.

### **8.2.3 CONCLUSIONES SOBRE ELVERTEDERO TIPO CREAGER**

- ❖ El coeficiente  $C_0$  de descarga, para un valor  $P/H_0 > 3$ , es igual a 3,95, en unidades inglesas. Este valor máximo del coeficiente  $C_0$ , en unidades del sistema internacional, es igual a 2,18 siendo el mismo valor que el obtenido en la Fase I.
- ❖ La calidad del flujo observado sobre el cimacio del vertedero tipo Creager con la geometría modificada para la Fase III es adecuada para el ingreso hacia el túnel de Descarga Intermedia. No se presentan ondulaciones importantes ni asimétricas en el cimacio.

### **8.2.4 CONCLUSIONES SOBRE EL TÚNEL DE DESCARGA INTERMEDIA**

- ❖ El flujo observado para toda la gama de caudales ensayados en el túnel de Descarga Intermedia corresponde a un flujo supercrítico con los mayores valores de velocidad y del parámetro adimensional Froude en el tramo inicial del túnel, al pie del vertedero tipo Creager, donde se tiene la pendiente del 16%.

- ❖ De acuerdo a los valores de profundidad de flujo registrados a lo largo del túnel de la Descarga Intermedia, se observa una disminución del calado en el último punto de medición, que corresponde al registrado en la sección final con geometría baúl. Los mayores valores de profundidad registrados en toda la gama de caudales ensayados se alcanza en la sección de medida DI-4, que corresponde a un punto en el desarrollo de la curvatura en planta.
  
- ❖ En todos los caudales ensayados a lo largo del túnel de la Descarga Intermedia se observa que éste trabaja con proporciones de llenados inferiores al 50% de su altura total. El flujo, aún para el caudal máximo, presenta una superficie libre cuya ubicación deja un bordo libre muy amplio. Por esta razón la presencia de las ondas cruzadas no incide en la capacidad hidráulica ni en la capacidad de ventilación del túnel.
  
- ❖ Los resultados obtenidos en el túnel de Descarga Intermedia permiten concluir que el flujo se desarrolla inestable, por los bajos porcentajes de llenado. La mayor inestabilidad se presenta en el tramo con mayor pendiente, en donde los valores del parámetro adimensional Froude son también mayores.
  
- ❖ Las observaciones en el modelo físico muestran que a pesar de los valores bajos del número de curva, se generan ondas cruzadas. Esta tendencia es similar en toda la gama de caudales ensayados. Para el caso de la Descarga Intermedia el efecto de las ondas cruzadas se considera de menor importancia por el sobredimensionamiento de la sección.

### 8.3 CONCLUSIONES GENERALES DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.

- ❖ Los modelos físicos constituyen un conjunto de herramientas a disposición del ingeniero para el diseño de obras hidráulicas cuya aplicación permite obtener una mejor solución a los distintos problemas que se presentan dentro del campo hidráulico.
- ❖ La simulación permite al ingeniero analizar detenidamente las cualidades de los diseños mediante la recolección de datos en modelos a escala, facilitando la comprobación de los cálculos teóricos y dándole la oportunidad de descubrir fallas por comportamientos inesperados.
- ❖ La experiencia adquirida con la modelación física nos ha permitido mejorar nuestros conocimientos teóricos dándonos la posibilidad de generar criterios y opiniones válidas y aceptables en el campo de la Ingeniería Hidráulica.
- ❖ Proyectos como este requieren de la modelación tanto física como numérica para verificar el comportamiento de las estructuras a construirse y comprobar lo obtenido con la teoría, sin embargo estamos sujetos a cierto grado de incertidumbre sobre los fenómenos que van a presentarse a escala real.
- ❖ El manejo adecuado de los instrumentos y equipos utilizados en el modelo, requiere de precisión para evitar errores y alteración de resultados y por ende una interpretación equivocada de los fenómenos.



## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Naudascher, E., Castro, M. (2000). Hidráulica de Canales. México. Limusa-Noriega.
- Chow, V.T. (1959). Hidráulica de los Canales Abiertos. New York-Bogotá. McGraw Hill.
- Hidalgo, Marcelo. Introducción a la Teoría de Modelos Hidráulicos y Aplicaciones Básicas. Ecuador. E.P.N. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
- Castro, Marco. Análisis Dimensional y Modelación Física en Hidráulica. Ecuador. E.P.N. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
- Castro, Marco. SEPARATAS. Sobre el uso de las diferentes fórmulas para coeficientes de descarga de vertederos de medida. Ecuador. E.P.N. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
- U.S.B.R. Bureau of Reclamation. Diseño de Presas Pequeñas. Department of the Interior, Traducción Cia. Editorial Continental, S.A., México, 1982.
- Castro, M., Hidalgo X., Poveda R. Sobre la Modelación Hidráulica. Departamento de Ciencias del Agua. Escuela Politécnica Nacional.
- Páginas de Internet.

## **ANEXOS**

**ANEXO 1**

**PLANOS**

**MODELO Y PROTOTIPO**

**ANEXO 1A**

**FASE I**

**PLANOS**

**MODELO Y PROTOTIPO**

**ANEXO 1B**

**FASE II**

**PLANOS**

**MODELO Y PROTOTIPO**

**ANEXO 1C**

**FASE III**

**PLANOS**

**MODELO Y PROTOTIPO**

**ANEXO 2**

**REGISTRO FOTOGRÁFICO**



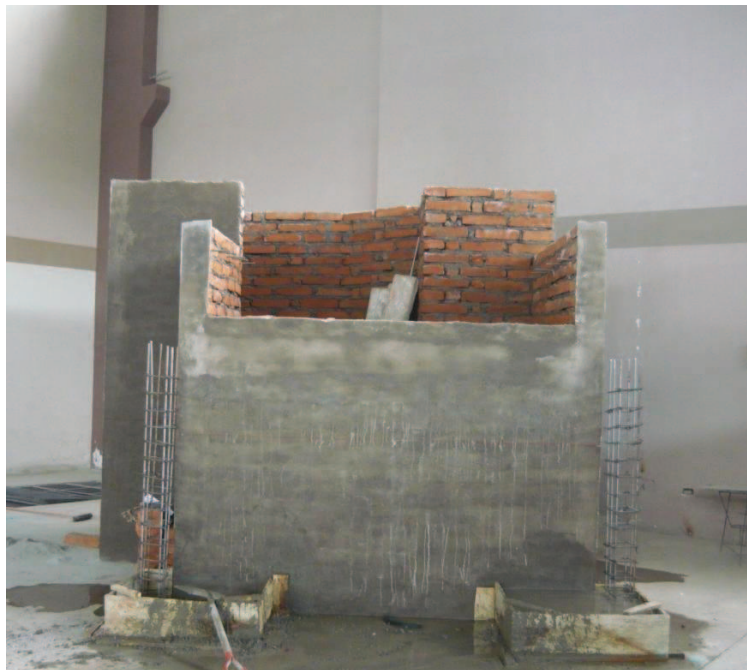
**ANEXO 2A**

**FASE I**

**REGISTRO FOTOGRÁFICO**

## CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

**Fotografía No. 1:** Tanque de entrada (almacenamiento de agua)



**Fotografía No. 2:** Vista Superior del Tanque de Descarga Intermedia.



**Fotografía No. 3:** Vista superior de Tanque de Salida.



**Fotografía No. 4:** Ubicación de tubería en acrílico.



**Fotografía No. 5:** Montaje de piezas en acrílico.



**Fotografía No. 6:** Colocación de estructura de entrada.





## FLUJO EN BOCATOMA

**Fotografía No. 7:** Flujo en estructura de entrada.  $Q= 100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Formación de ondas.



**Fotografía No. 8:** Flujo en estructura de entrada.  $Q= 500 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 9:** Flujo en estructura de entrada.  $Q= 940 \text{ m}^3/\text{s}$  (máximo). Falta de capacidad de la estructura.

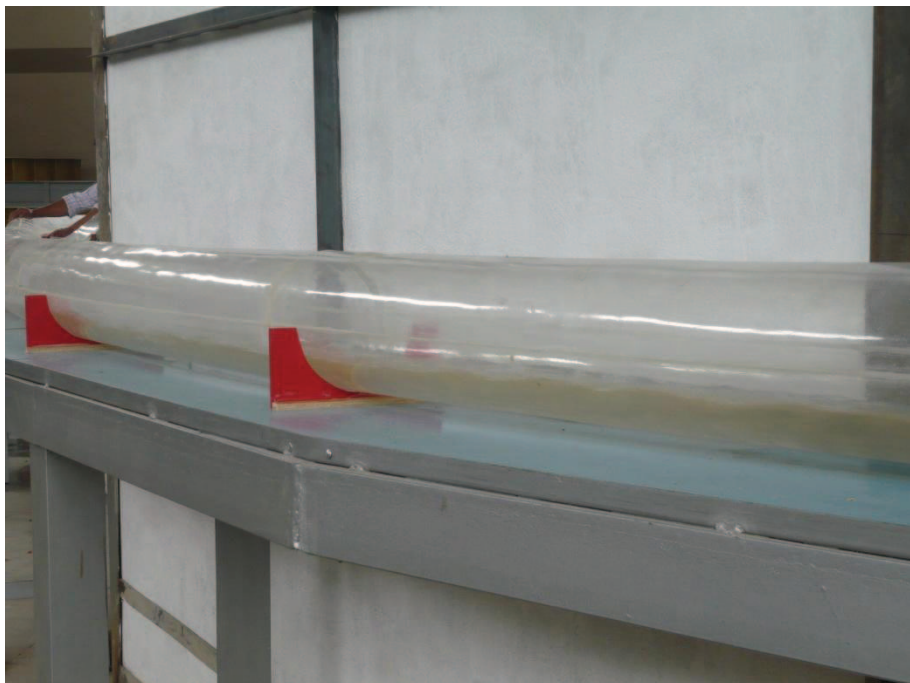


**Fotografía No. 10:** Problema en la pila derecha de la estructura de entrada.



## FLUJO A LO LARGO DEL TÚNEL DE DESVÍO

**Fotografía No. 11:** Funcionamiento del modelo en Túnel de Desvío.



**Fotografía No. 12:** Funcionamiento del Túnel de Desvío  $Q=972,10 \text{ m}^3/\text{s}$ .



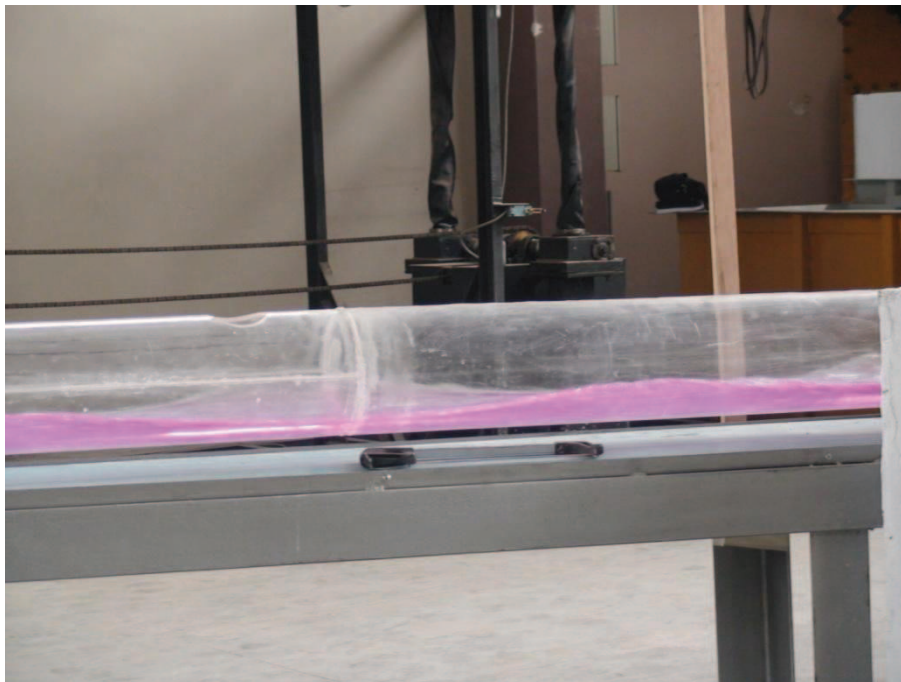


**FLUJO EN DESCARGA INTERMEDIA****Fotografía No. 13:** Flujo sobre vertedero tipo Creager  $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ **Fotografía No. 14:** Formación de ondas aguas abajo del vertedero.

Para  $Q_{TD} = 994,1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Di} = 26,5 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 15:** Flujo sinuoso con  $Q_{DI}$  aguas debajo de la unión.



**Fotografía No. 16:** Flujo a la salida del Túnel de Desvío para  $Q_{DI} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**FLUJO COMBINADO: TÚNEL DE DESVÍO + DESCARGA INTERMEDIA**

**Fotografía No. 17:** Vista Superior de la unión Tipo “Y”.

Para  $Q_{TD} = 200 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{Di} = 25 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 18:** Flujo en el canal Descarga Intermedia.

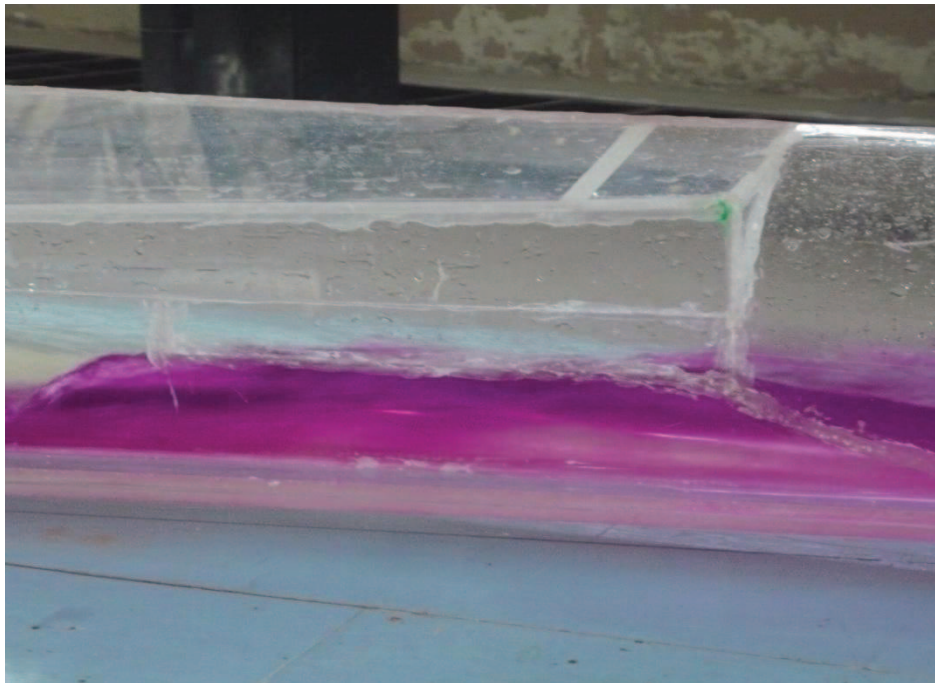
Para  $Q_{TD} = 994,1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Di} = 26,5 \text{ m}^3/\text{s}$





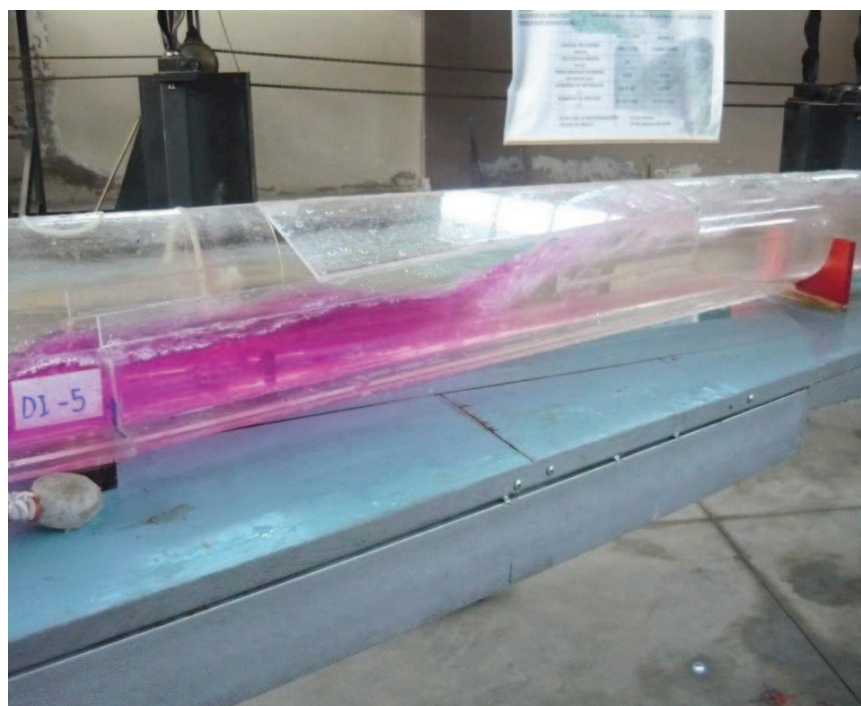
**Fotografía No. 19:** Sobre-elevación del calado en la unión.

Para  $Q_{TD} = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Di} = 25 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 20:** Flujo serpenteante aguas arriba de la unión.

$Q_{TD} = 994,1 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{Di} = 26,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**ANEXO 2B**

**FASE II**

**REGISTRO FOTOGRÁFICO**

## DISEÑO PROPUESTO EN EL INICIO DE FASE II

**Fotografía No. 21:** Esquema del funcionamiento de la estructura de entrada al Túnel de Desvío, con geometría inicial Fase II.



**Fotografía No. 22:** Esquema del funcionamiento de la estructura de entrada al Túnel de Desvío, con geometría inicial de Fase II.



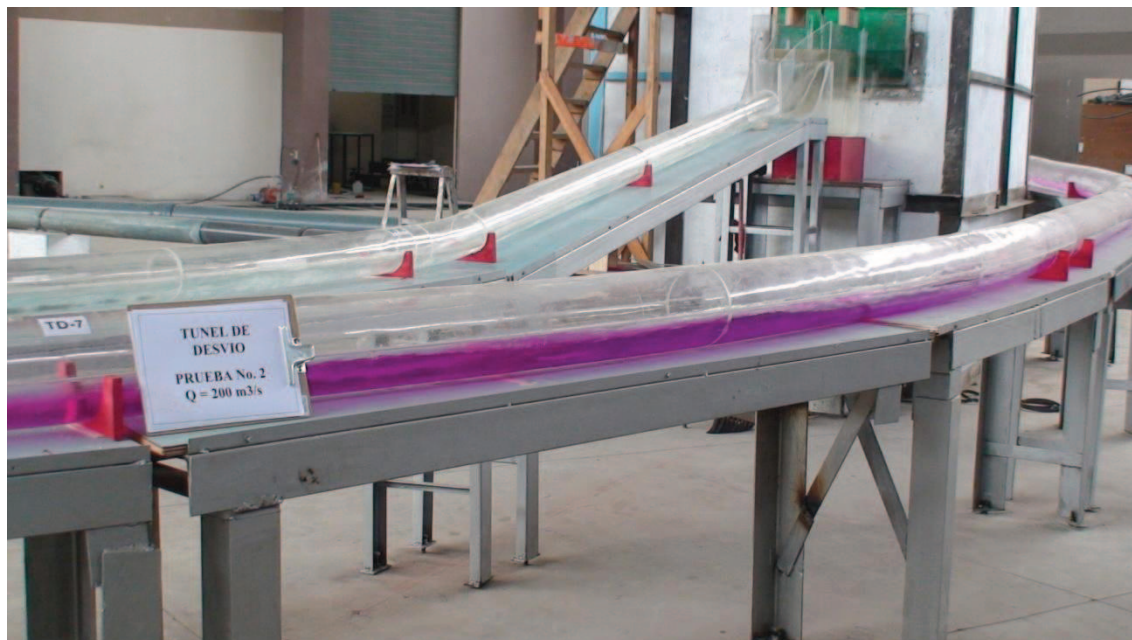
**Fotografía No. 23:** Geometría inicial de Fase II, se puede observar la estructura de unión entre Túnel de Desvío y Descarga Intermedia.



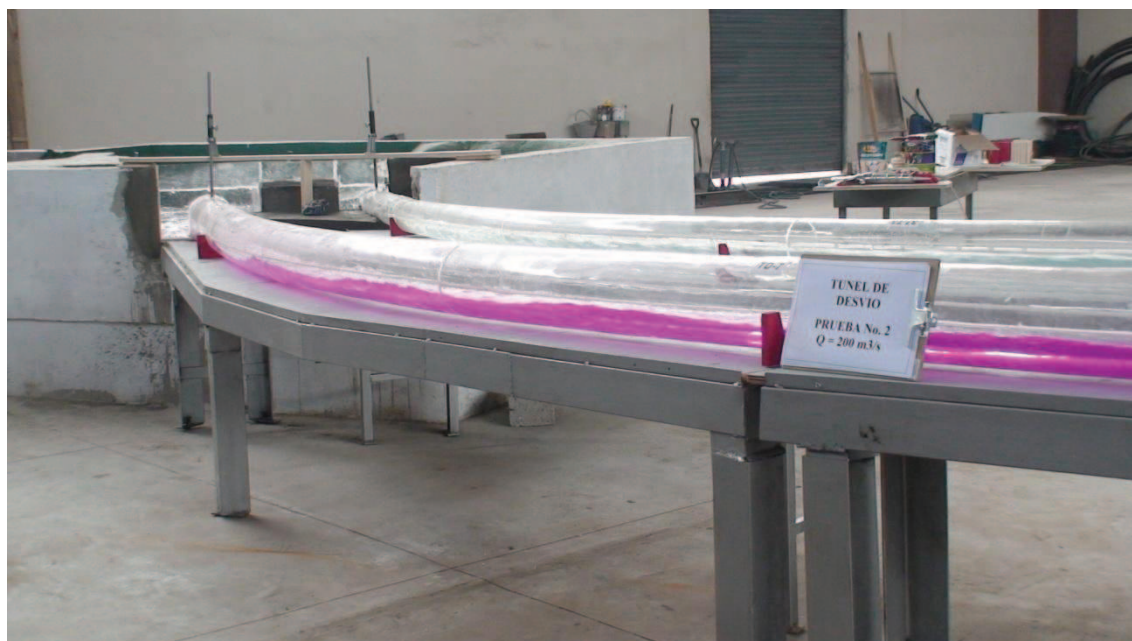


## GEOMETRÍA MODIFICADA EN TÚNEL DE DESVÍO.

**Fotografía No. 24:** Se puede observar la separación de los dos túneles, y la eliminación de la estructura de unión.



**Fotografía No. 25:** Vista de los túneles trabajando de manera independiente.



## GEOMETRÍA MODIFICADA PARA TRAMO INICIAL DEL TÚNEL DE DESVÍO

**Fotografía No. 26:** Vista en planta del tramo inicial del Túnel de Desvío, incorporación de una transición.



**Fotografía No. 27:** Vista en planta del tramo inicial del Túnel de Desvío, incorporación de transición.





## GEOMETRÍA MODIFICADA PARA LA ESTRUCTURA DE ENTRADA

**Fotografía No. 28:** Vista en planta de la estructura de entrada, se muestra incluida la ampliación del diámetro, y del ancho de la estructura.

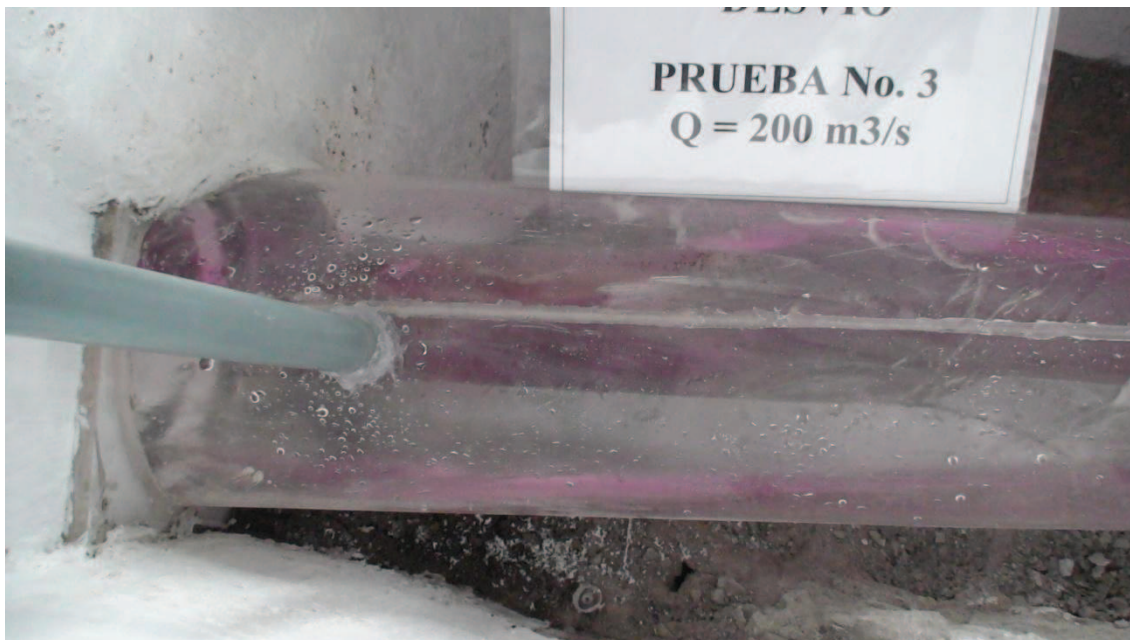


**Fotografía No. 29:** Vista frontal de la estructura de entrada, ampliación de diámetro, ancho de la estructura y la eliminación de las aristas en la boca de entrada.



## INCLUSIÓN DE INGRESO DE AIRE AL TÚNEL DE DESVÍO

**Fotografía No. 30:** Vista en planta de la inclusión de estructura aireación en el inicio del Túnel de Desvío.



**Fotografía No. 31:** Instalación de una tubería de PVC en el tramo inicial del Túnel de Desvío,





## MODIFICACIÓN DEL ESTRIBO DERECHO EN ESTRUCTURA DE ENTRADA

**Fotografía No. 32:** Vista en planta de la modificación en la geometría de estribo derecho.



**Fotografía No. 33:** Vista de perfil de la modificación en la geometría de estribo derecho.



**FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE INGRESO CON LAS MODIFICACIONES EN EL DIAMETRO DE LA BOCA DE ENTRADA**

**Fotografía No. 34:** Funcionamiento de la estructura de entrada con las modificaciones realizadas en Fase II.



**Fotografía No. 35:** Comportamiento del flujo en la estructura de entrada modificada.



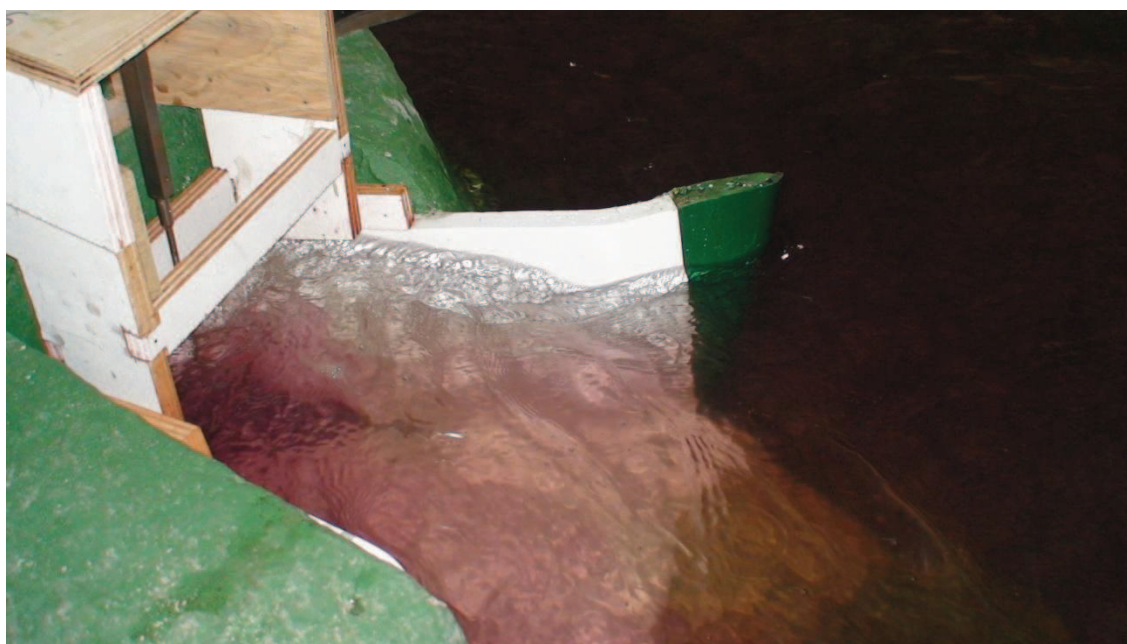


**FUNCIONAMIENTO DE ESTRUCTURA DE INGRESO CON LAS  
MODIFICACIONES EN EL ESTRIBO DERECHO.**

**Fotografía No. 36:** Funcionamiento de la estructura de entrada con las modificaciones realizadas en la boca de ingreso al Túnel de Desvío y la nueva geometría del estribo derecho.  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Fotografía No. 37:** Funcionamiento de la estructura de entrada modificada para  $Q=1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ .





## FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE ENTRADA CON DIFERENTES PROPUESTAS

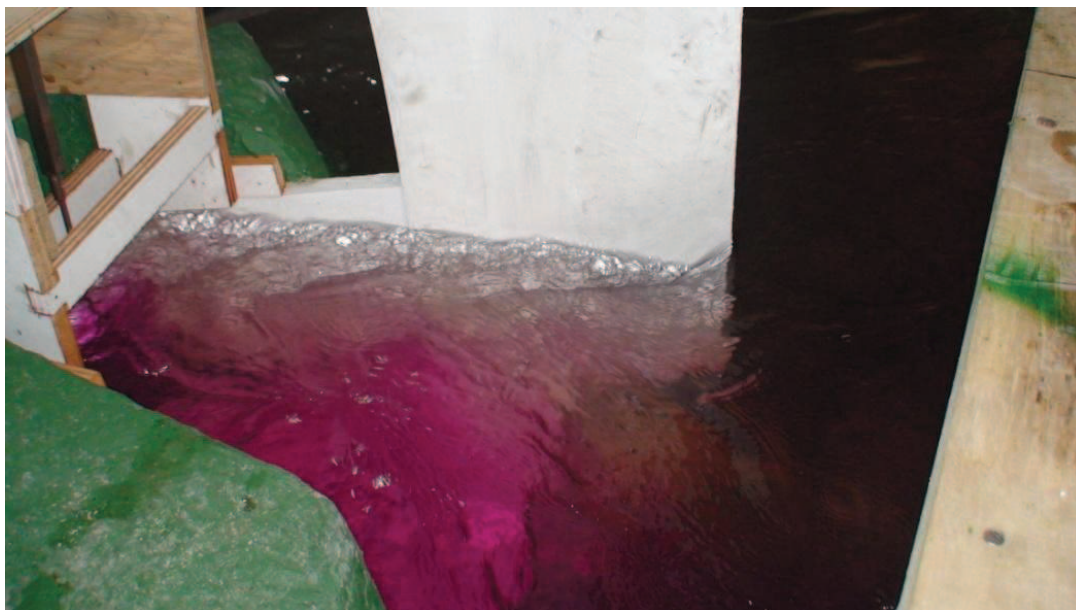
**Fotografía No. 38:** Comportamiento del flujo con modificación del estribo derecho.  $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Fotografía No. 39:** Funcionamiento de la estructura con alargamiento del estribo.  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Fotografía No. 40:** Funcionamiento de la estructura de ingreso con el estribo del lado derecho alargado,  $Q=1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Fotografía No. 41:** Funcionamiento de la estructura de ingreso con el estribo izquierdo alargado.





## FUNCIONAMIENTO DEL TRAMO INICIAL DEL TÚNEL SIN AIREACIÓN

**Fotografía No. 42:** Funcionamiento del tramo inicial del Túnel de Desvío sin aireación.



**Fotografía No. 43:** Aireación previa a la instalación de estructura de ingreso de aire.



**Fotografía No. 44:** Vista lateral de la prueba de aireación previa la instalación de estructura de ingreso de aire en la entrada al Túnel de Desvío ( $Q_{TD} \approx 1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 45:** Vista superior del funcionamiento de la estructura de ingreso de aire en el tramo inicial del Túnel de Desvío,  $Q_{TD} \approx 1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ .





**Fotografía No. 46:** Funcionamiento del tramo inicial del Túnel de Desvío, luego de la instalación de la estructura de ingreso de aire,  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Fotografía No. 47:** Funcionamiento del tramo inicial del Túnel de Desvío, luego de la instalación de la estructura de ingreso de aire,  $Q=1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Fotografía No. 48:** Flujo a lo largo del Túnel de Desvío durante prueba de aireación. ( $Q_{TD} \approx 1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ ).



**Fotografía No. 49:** Flujo a lo largo del Túnel de Desvío durante la prueba de aireación. ( $Q_{TD} \approx 1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ ).





**ANEXO 2C**

**FASE III**

**REGISTRO FOTOGRÁFICO**

### RECONSTRUCCIÓN DEL MODELO CON MODIFICACIONES FASE III

**Fotografía No. 50:** Instalación y armado de los túneles de Desvío y Descarga Intermedia.



**Fotografía No. 51:** Instalación de la estructura de salida en el Túnel de Desvío.



**Fotografía No. 52:** Instalación de la estructura de salida en la Descarga Intermedia.

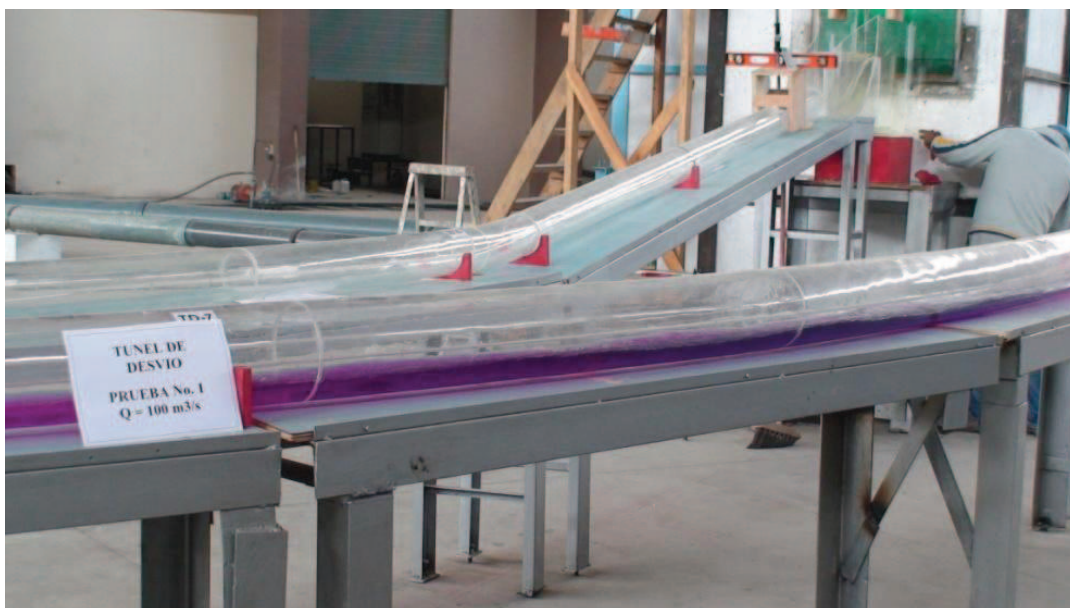


## FUNCIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS MODIFICADAS EN TÚNEL DE DESVÍO

**Fotografía No. 53:** Vista lateral del ingreso de flujo a la bocatoma, ( $Q_{TD}=100 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 54:** Vista del flujo en la curva horizontal del Túnel de Desvío, ( $Q_{TD}=100 \text{ m}^3/\text{s}$ )





**Fotografía No. 55:** Vista del flujo en la transición de salida del Túnel de Desvío,  
( $Q_{TD}=100 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 56:** Vista frontal del flujo de entrada al Túnel de Desvío,  
( $Q_{TD}=200 \text{ m}^3/\text{s}$ ).



**Fotografía No. 57:** Vista de la curva horizontal del Túnel de Desvío,  
( $Q_{TD}=200 \text{ m}^3/\text{s}$ ).



**Fotografía No. 58:** Vista del flujo en la transición de salida del Túnel de Desvío,  
( $Q_{TD}=200 \text{ m}^3/\text{s}$ ).





**Fotografía No. 59:** Vista frontal del flujo de entrada al Túnel de Desvío,

( $Q_{TD}=500 \text{ m}^3/\text{s}$ )

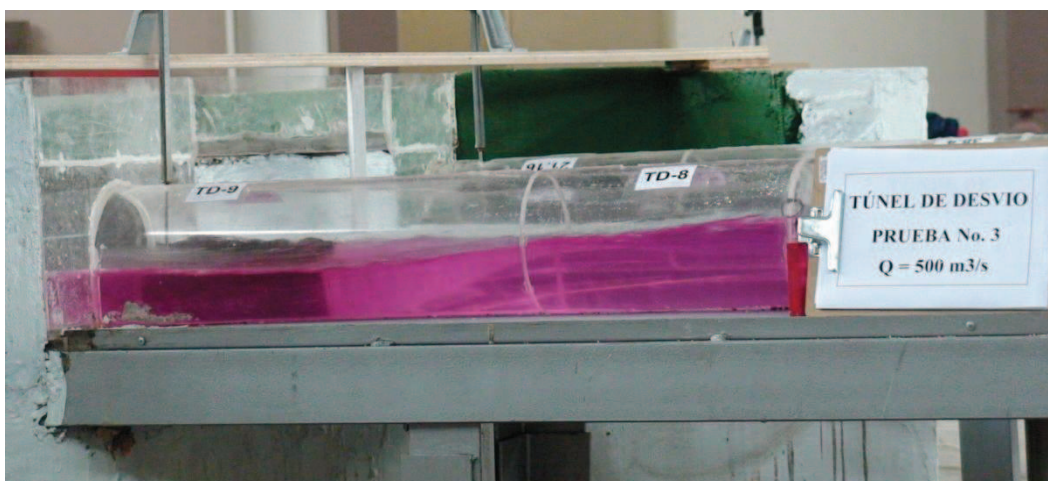


**Fotografía No. 60:** Vista lateral del flujo en la entrada del Túnel de Desvío,

( $Q_{TD}=500 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 61:** Vista del flujo en la transición final del Túnel de Desvío,  
( $Q_{TD}=500 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 62:** Vista frontal del flujo en la entrada del Túnel de Desvío,  
( $Q_{TD}=800 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 63:** Flujo en la curva horizontal del Túnel de Desvío,

( $Q_{TD}=800 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 64:** Vista frontal del flujo en el ingreso del Túnel de Desvío,

( $Q_{TD}=1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ ).





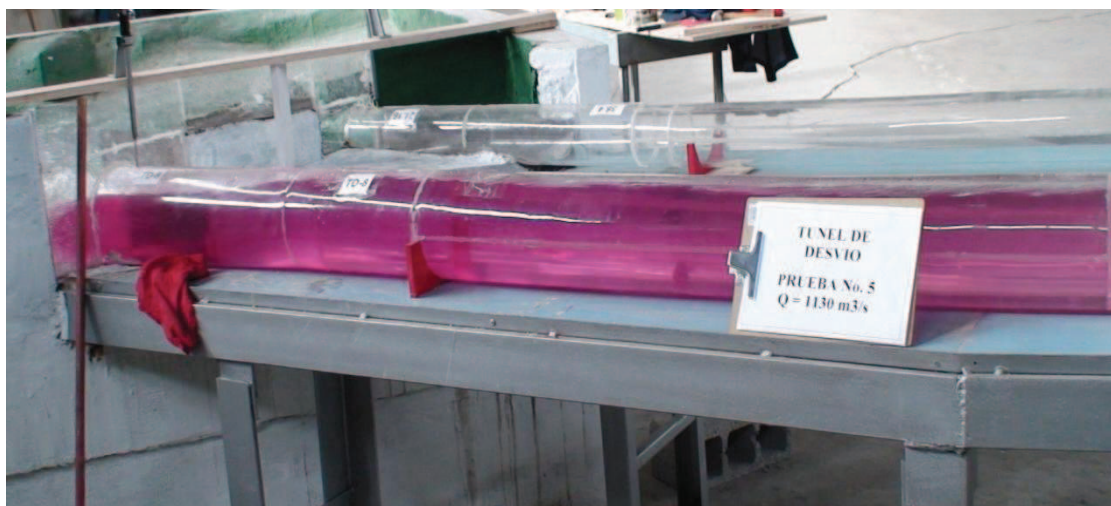
**Fotografía No. 65:** Flujo en la curva vertical del Túnel de Desvío,

( $Q_{TD}=1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 66:** Flujo en la curva horizontal y transición final del Túnel de

Desvío, ( $Q_{TD}=1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 67:** Vista lateral del flujo de entrada al Túnel de Desvío,  
( $Q_{TD}=1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ )



## FUNCIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS MODIFICADAS EN TÚNEL DESCARGA INTERMEDIA

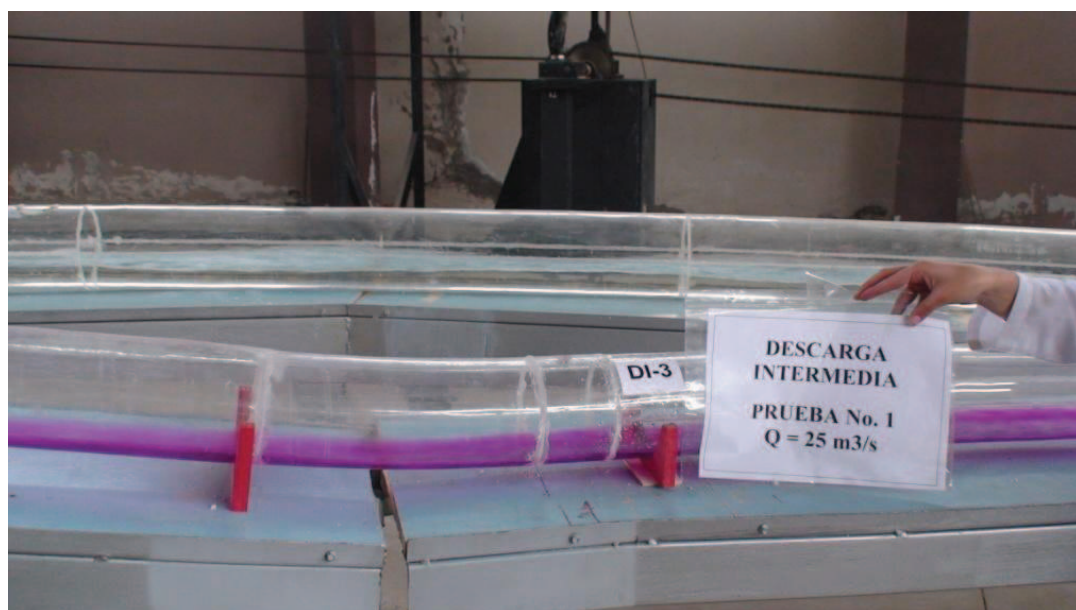
**Fotografía No. 68:** Vista lateral del flujo en el vertedero tipo Creager.

$$(Q_{DI}=25 \text{ m}^3/\text{s})$$



**Fotografía No. 69:** Vista del flujo en la curva vertical de la Descarga Intermedia.

$$(Q_{DI}=25 \text{ m}^3/\text{s})$$

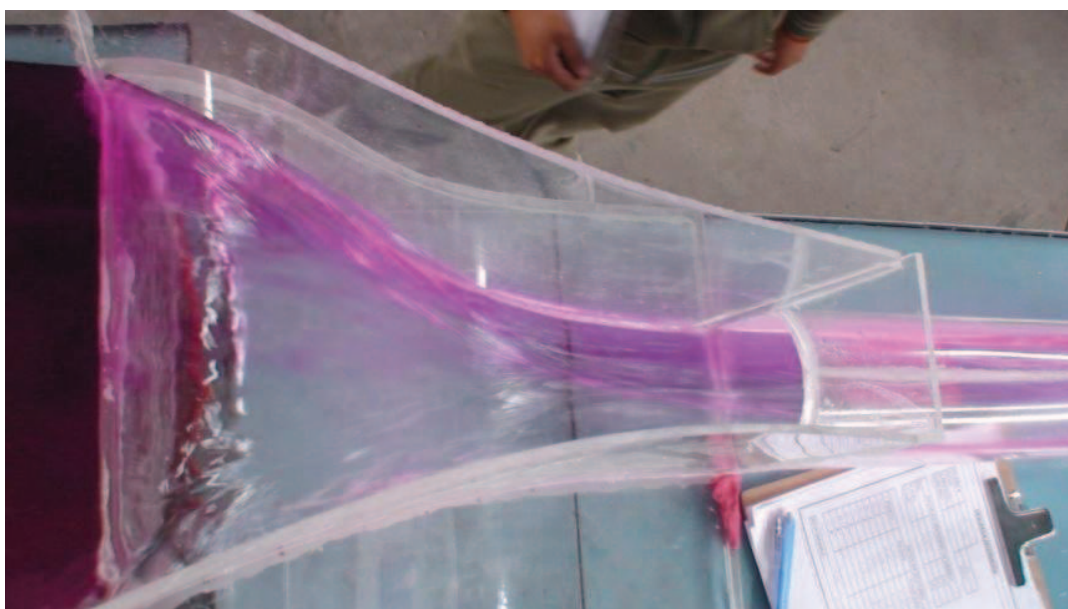




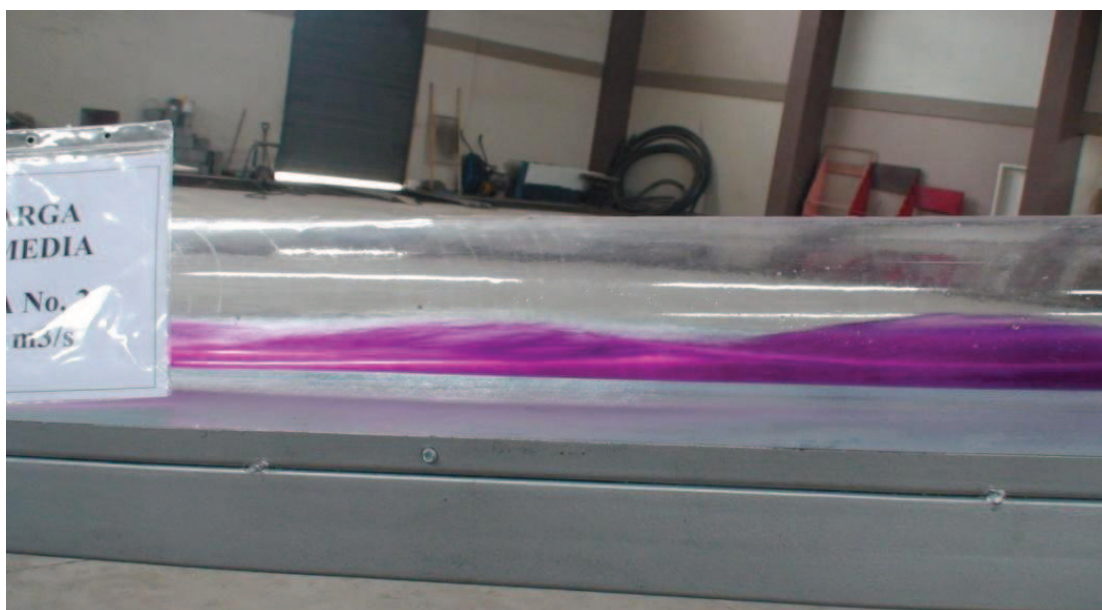
**Fotografía No. 70:** Vista del flujo en el vertedero tipo Creager. ( $Q_{DI}=100 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 71:** Vista del flujo en el vertedero al inicio de la transición de la Descarga Intermedia, ( $Q_{DI}=100 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 72:** Vista del flujo en el tramo vertical de la Descarga Intermedia,  
( $Q_{DI}=100 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 73:** Vista del flujo en el vertedero de la Descarga Intermedia,  
( $Q_{DI}=150 \text{ m}^3/\text{s}$ )





**Fotografía No. 74:** Vista superior del flujo en el vertedero. ( $Q_{DI}=150 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 75:** Vista lateral del flujo en el vertedero y la transición inicial de la Descarga Intermedia, ( $Q_{DI}=150 \text{ m}^3/\text{s}$ )



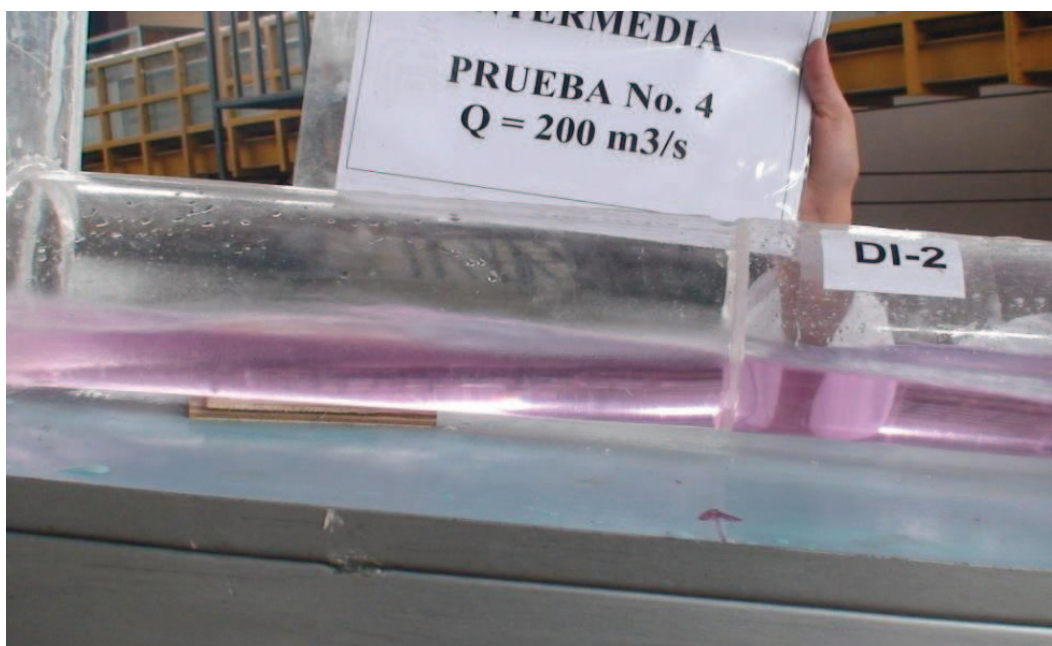
**Fotografía No. 76:** Flujo de entrada del vertedero en la Descarga Intermedia,  
( $Q_{DI}=200 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 77:** Flujo de entrada del vertedero en la Descarga Intermedia,  
( $Q_{DI}=200 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 78:** Flujo de entrada en la transición inicial de la Descarga Intermedia, ( $Q_{DI}=200 \text{ m}^3/\text{s}$ ).



**Fotografía No. 79:** Vista superior del flujo de la salida en la curva horizontal en la Descarga Intermedia, ( $Q_{DI}=200 \text{ m}^3/\text{s}$ )





## FUNCIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS EN PRUEBAS DEMOSTRATIVAS

**Fotografía No. 80:** Vista frontal de la estructura de entrada con la primera modificación.



**Fotografía No. 81:** Comportamiento del flujo al ingreso de la estructura de entrada. ( $Q_{TD} = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ )





**Fotografía No. 82:** Vista superior del flujo en la entrada modificada

( $Q_{TD} = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 83:** Vista frontal del flujo en la entrada modificada del Túnel de

Desvío. ( $Q_{TD} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 84:** Vista lateral en la entrada modificada del Túnel de Desvío  
( $Q_{TD} = 800 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 85:** Comportamiento del flujo en la entrada modificada del Túnel de Desvío. ( $Q_{TD} = 1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ )



## MODIFICACION DEL ESTRIBO DERECHO EN LA ESTRUCTURA DE ENTRADA

**Fotografía No. 86:** Vista frontal de la estructura de entrada con la segunda modificación.



**Fotografía No. 87:** Vista frontal del flujo en la entrada del Túnel de Desvío

$$(Q_{TD} = 100 \text{ m}^3/\text{s})$$





**Fotografía No. 88:** Vista lateral del flujo en la entrada modificada del Túnel de Desvío. ( $Q_{TD} = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 89:** Vista frontal del flujo en la entrada del Túnel de Desvío ( $Q_{TD} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 90:** Vista lateral del flujo en la entrada modificada del Túnel de Desvío. ( $Q_{TD} = 800 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 91:** Vista frontal del flujo en la entrada modificada del Túnel de Desvío. ( $Q_{TD} = 1.130 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**ANEXO 3**

**REGISTRO DE DATOS TOMADOS**



**ANEXO 3 A**

**FASE I**

**REGISTRO DE DATOS TOMADOS**

## PRUEBAS DE CALIBRACIÓN

### DESCARGA INTERMEDIA

<b>PRUEBA:</b>	1
<b>FECHA:</b>	08-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	0,9	l/s
<b>Qprototipo:</b>	15,7	m3/s

<b>Hv:</b>	5,55	cm
<b>~Hv:</b>	5,65	cm

PUNTO	Ho (cm)	Hmedido (cm)	Calado (cm)
1	47,34	48,74	1,40
2	39,41	39,85	0,44
3	39,37	39,91	0,54
4	39,10	39,71	0,61
5	39,25	39,88	0,63
7	19,17	20,75	1,58
8	19,01	20,64	1,63
9	19,10	20,62	1,52

<b>PRUEBA:</b>	1
<b>FECHA:</b>	08-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	0,9	l/s
<b>Qprototipo:</b>	15,7	m3/s

<b>Hv:</b>	5,55	cm
<b>~Hv:</b>	5,65	cm

PUNTO	Ho (cm)	Hmedido (cm)	Calado (cm)
1	47,34	48,78	1,44
2	39,41	39,65	0,24
3	39,37	39,82	0,45
4	39,10	39,77	0,67
5	39,25	39,90	0,65
7	19,17	20,85	1,68
8	19,01	20,67	1,66
9	19,10	20,60	1,50

**DESCARGA INTERMEDIA**

<b>PRUEBA:</b>	2
<b>FECHA:</b>	08-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	5,8	l/s
<b>Qprototipo:</b>	102	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	11,05	cm
<b>~Hv:</b>	10,77	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1	47,34	51,65	4,31
2	39,41	40,89	1,48
3	39,37	40,84	1,47
4	39,10	40,60	1,50
5	39,25	40,75	1,50
7	19,17	20,47	1,30
8	19,01	21,82	2,81
9	19,10	22,38	3,28

<b>PRUEBA:</b>	2
<b>FECHA:</b>	08-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	5,8	l/s
<b>Qprototipo:</b>	102	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	11,05	cm
<b>~Hv:</b>	10,77	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1	47,34	51,68	4,34
2	39,41	41,50	2,09
3	39,37	40,95	1,58
4	39,10	40,88	1,78
5	39,25	41,04	1,79
7	19,17	20,94	1,77
8	19,01	21,99	2,98
9	19,10	22,66	3,56

**DESCARGA INTERMEDIA**

<b>PRUEBA:</b>	3
<b>FECHA:</b>	08-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	11,4	l/s
<b>Qprototipo:</b>	201,8	m3/s

<b>Hv:</b>	14,05	cm
<b>~Hv:</b>	14,10	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1	47,34	53,96	6,62
2	39,41	42,74	3,33
3	39,37	42,03	2,66
4	39,10	42,35	3,25
5	39,25	42,11	2,86
7	19,17	21,44	2,27
8	19,01	23,44	4,43
9	19,10	23,75	4,65

<b>PRUEBA:</b>	3
<b>FECHA:</b>	08-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	11,4	l/s
<b>Qprototipo:</b>	201,8	m3/s

<b>Hv:</b>	14,05	cm
<b>~Hv:</b>	14,10	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1	47,34	54,10	6,76
2	39,41	43,26	3,85
3	39,37	42,32	2,95
4	39,10	42,60	3,50
5	39,25	42,90	3,65
7	19,17	21,89	2,72
8	19,01	23,74	4,73
9	19,10	23,81	4,71

**TUNEL DE DESVIO**

<b>PRUEBA:</b>	1
<b>FECHA:</b>	08-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	44,5	l/s
<b>Qprototipo:</b>	802,41	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	12,21	cm
<b>~Hv:</b>		cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1	18,69	27,38	8,69
2	19,13	28,63	9,50
3	19,08	29,04	9,96
4	19,04	29,51	10,47
5	19,20	29,69	10,49
6	19,10	29,81	10,71
7	19,17	33,16	13,99
8	19,01	31,84	12,83
9	19,10	31,46	12,36

<b>PRUEBA:</b>	1
<b>FECHA:</b>	08-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	44,5	l/s
<b>Qprototipo:</b>	802,41	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	12,21	cm
<b>~Hv:</b>		cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1	18,69	27,37	8,68
2	19,13	28,62	9,49
3	19,08	29,05	9,97
4	19,04	29,59	10,55
5	19,20	29,69	10,49
6	19,10	29,82	10,72
7	19,17	33,15	13,98
8	19,01	31,85	12,84
9	19,10	31,97	12,87

**TUNEL DE DESVIO**

<b>PRUEBA:</b>	2
<b>FECHA:</b>	08-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	28,2	l/s
<b>Qprototipo:</b>	498,7	m3/s

<b>Hv:</b>	9,16	cm
<b>~Hv:</b>	9,32	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1	18,69	25,76	7,07
2	19,13	26,36	7,23
3	19,08	26,60	7,52
4	19,04	27,04	8,00
5	19,20	27,16	7,96
6	19,10	27,34	8,24
7	19,17	28,45	9,28
8	19,01	28,56	9,55
9	19,10	28,44	9,34

<b>PRUEBA:</b>	2
<b>FECHA:</b>	08-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	28,2	l/s
<b>Qprototipo:</b>	498,7	m3/s

<b>Hv:</b>	9,16	cm
<b>~Hv:</b>	9,32	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1	18,69	25,26	6,57
2	19,13	26,48	7,35
3	19,08	26,68	7,60
4	19,04	27,03	7,99
5	19,20	27,16	7,96
6	19,10	27,85	8,75
7	19,17	28,46	9,29
8	19,01	28,56	9,55
9	19,10	28,44	9,34



**TUNEL DE DESVIO**

<b>PRUEBA:</b>	3
<b>FECHA:</b>	08-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	13,8	l/s
<b>Qprototipo:</b>	244,5	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	6,06	cm
<b>~Hv:</b>	6,09	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1	18,69	23,06	4,37
2	19,13	23,80	4,67
3	19,08	24,08	5,00
4	19,04	24,23	5,19
5	19,20	24,54	5,34
6	19,10	24,81	5,71
7	19,17	24,58	5,41
8	19,01	24,95	5,94
9	19,10	24,87	5,77

<b>PRUEBA:</b>	3
<b>FECHA:</b>	08-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	13,8	l/s
<b>Qprototipo:</b>	244,5	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	6,06	cm
<b>~Hv:</b>	6,09	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1	18,69	23,05	4,36
2	19,13	23,90	4,77
3	19,08	24,07	4,99
4	19,04	24,23	5,19
5	19,20	24,54	5,34
6	19,10	24,82	5,72
7	19,17	24,58	5,41
8	19,01	24,95	5,94
9	19,10	24,87	5,77

**TUNEL DE DESVIO**

<b>PRUEBA:</b>	4
<b>FECHA:</b>	08-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	3,7	l/s
<b>Qprototipo:</b>	64,8	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	3,06	cm
<b>~Hv:</b>	3,00	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1	18,69	20,24	1,55
2	19,13	21,43	2,30
3	19,08	21,66	2,58
4	19,04	21,98	2,94
5	19,20	22,13	2,93
6	19,10	22,09	2,99
7	19,17	22,17	3,00
8	19,01	22,02	3,01
9	19,10	22,12	3,02

<b>PRUEBA:</b>	4
<b>FECHA:</b>	08-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	3,7	l/s
<b>Qprototipo:</b>	64,8	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	3,06	cm
<b>~Hv:</b>	3,00	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1	18,69	20,22	1,53
2	19,13	21,42	2,29
3	19,08	21,66	2,58
4	19,04	21,96	2,92
5	19,20	22,13	2,93
6	19,10	22,18	3,08
7	19,17	22,18	3,01
8	19,01	22,03	3,02
9	19,10	22,13	3,03

## PRUEBAS CON DISEÑO ORIGINAL

## DESCARGA INTERMEDIA

<b>PRUEBA:</b>	1
<b>FECHA:</b>	21-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	1,41	l/s
<b>Qprototipo:</b>	25	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	6,51	cm
<b>~Hv:</b>	5,96	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1 (Creager)	19,22	21,15	1,93

<b>PRUEBA:</b>	1
<b>FECHA:</b>	21-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	1,41	l/s
<b>Qprototipo:</b>	25	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	6,5	cm
<b>~Hv:</b>	5,95	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1 (Creager)	19,22	21,16	1,94

**DESCARGA INTERMEDIA**

<b>PRUEBA:</b>	2
<b>FECHA:</b>	22-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	5,66	l/s
<b>Qprototipo:</b>	100	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	10,98	cm
<b>~Hv:</b>	10,43	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1 (Creager)	19,22	23,80	4,58

<b>PRUEBA:</b>	2
<b>FECHA:</b>	22-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	5,66	l/s
<b>Qprototipo:</b>	100	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	10,98	cm
<b>~Hv:</b>	10,43	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1 (Creager)	19,22	23,80	4,58

**DESCARGA INTERMEDIA**

<b>PRUEBA:</b>	3
<b>FECHA:</b>	22-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	11,31	l/s
<b>Qprototipo:</b>	200	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	14,01	cm
<b>~Hv:</b>	14,00	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1 (Creager)	19,22	25,61	6,39

<b>PRUEBA:</b>	3
<b>FECHA:</b>	22-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	11,31	l/s
<b>Qprototipo:</b>	200	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	14,01	cm
<b>~Hv:</b>	13,46	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
1 (Creager)	19,22	25,60	6,38

**TUNEL DE DESVIO**

<b>PRUEBA:</b>	1
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	2,83	l/s
<b>Qprototipo:</b>	50	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	2,73	cm
<b>~Hv:</b>	2,7	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61	23,83	1,22
E2	0,36	1,39	1,03

<b>PRUEBA:</b>	1
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	2,83	l/s
<b>Qprototipo:</b>	50	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	2,73	cm
<b>~Hv:</b>	2,7	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61	23,83	1,22
E2	0,36	1,40	1,04



**TUNEL DE DESVIO**

<b>PRUEBA:</b>	2
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	5,66	l/s
<b>Qprototipo:</b>	100	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	3,77	cm
<b>~Hv:</b>	3,82	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61	23,10	0,49
E2	0,36	2,88	2,52
TD-1	18,69	20,85	2,16
TD-2	19,13	21,37	2,24
TD-3	19,08	22,26	3,18
TD-4	19,04	22,64	3,60
TD-5	19,20	22,72	3,52
TD-6	19,10	22,65	3,55
TD-7	19,17	22,94	3,77
TD-8	19,01	23,24	4,23
TD-9	19,10	23,14	4,04

<b>PRUEBA:</b>	2
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	5,66	l/s
<b>Qprototipo:</b>	100	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	3,77	cm
<b>~Hv:</b>	3,82	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61	23,12	0,51
E2	0,36	3,02	2,66
TD-1	18,69	20,85	2,16
TD-2	19,13	21,39	2,26
TD-3	19,08	22,27	3,19
TD-4	19,04	22,64	3,60
TD-5	19,20	22,73	3,53
TD-6	19,10	22,65	3,55
TD-7	19,17	22,96	3,79
TD-8	19,01	23,25	4,24
TD-9	19,10	23,14	4,04

**TUNEL DE DESVIO**

<b>PRUEBA:</b>	3
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	11,31	l/s
<b>Qprototipo:</b>	200	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	5,42	cm
<b>~Hv:</b>	5,41	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61	24,42	1,81
E2	0,36	5,51	5,15

<b>PRUEBA:</b>	3
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	11,31	l/s
<b>Qprototipo:</b>	200	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	5,42	cm
<b>~Hv:</b>	5,41	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61	24,42	1,81
E2	0,36	5,50	5,14

**TUNEL DE DESVIO**

<b>PRUEBA:</b>	4
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	28,28	l/s
<b>Qprototipo:</b>	500	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	9,17	cm
<b>~Hv:</b>	9,16	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61	31,98	9,37
E2	0,36	16,80	16,44
TD-1	18,69	25,14	6,45
TD-2	19,13	25,86	6,73
TD-3	19,08	26,18	7,10
TD-4	19,04	26,66	7,62
TD-5	19,20	26,88	7,68
TD-6	19,10	27,10	8,00
TD-7	19,17	27,42	8,25
TD-8	19,01	28,09	9,08
TD-9	19,10	27,67	8,57

<b>PRUEBA:</b>	4
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	28,28	l/s
<b>Qprototipo:</b>	500	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	9,17	cm
<b>~Hv:</b>	9,16	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61	31,96	9,35
E2	0,36	16,80	16,44
TD-1	18,69	25,14	6,45
TD-2	19,13	25,88	6,75
TD-3	19,08	26,19	7,11
TD-4	19,04	26,65	7,61
TD-5	19,20	26,88	7,68
TD-6	19,10	27,10	8,00
TD-7	19,17	27,40	8,23
TD-8	19,01	28,00	8,99
TD-9	19,10	27,68	8,58

**TUNEL DE DESVIO**

<b>PRUEBA:</b>	5
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>		l/s
<b>Qprototipo:</b>		m3/s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>	13,46	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61	51,27	28,66
E2	0,36	38,92	38,56
TD-1	18,69	28,30	9,61
TD-2	19,13	28,89	9,76
TD-3	19,08	29,54	10,46
TD-4	19,04	29,95	10,91
TD-5	19,20	30,30	11,10
TD-6	19,10	30,76	11,66
TD-7	19,17	-	-
TD-8	19,01	32,95	13,94
TD-9	19,10	32,52	13,42

<b>PRUEBA:</b>	5
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>		l/s
<b>Qprototipo:</b>		m3/s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>	13,46	cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61	51,37	28,76
E2	0,36	38,90	38,54
TD-1	18,69	28,30	9,61
TD-2	19,13	28,88	9,75
TD-3	19,08	29,55	10,47
TD-4	19,04	29,93	10,89
TD-5	19,20	30,30	11,10
TD-6	19,10	30,78	11,68
TD-7	19,17	-	-
TD-8	19,01	32,95	13,94
TD-9	19,10	32,63	13,53

- Turbulencia

**FLUJO COMBINADO: TUNEL DE DESVÍO + DESCARGA INTERMEDIA**

<b>PRUEBA:</b>	1
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	11,31	l/s
<b>Qprototipo:</b>	200	m3/s

<b>Hv:</b>	5,42	cm
<b>~Hv:</b>	5,41	cm

<b>TUNEL DE DESVÍO</b>			
<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61	24,49	1,88
E2	0,36	5,46	5,10
TD-1	18,69	22,66	3,97
TD-2	19,13	23,00	3,87
TD-3	19,08	23,30	4,22
TD-4	19,04	23,73	4,69
TD-5	19,20	23,99	4,79
TD-6	19,10	24,14	5,04
TD-7	19,17	25,27	6,10
TD-8	19,01	25,23	6,22
TD-9	19,10	25,33	6,23

<b>Qmodelo:</b>	1,41	l/s
<b>Qprototipo:</b>	25	m3/s

<b>Hv:</b>	6,59	cm
<b>~Hv:</b>	6,57	cm

<b>DESCARGA INTERMEDIA</b>			
<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
DI-1	19,22	21,17	1,95
DI-2	39,41	41,30	1,89
DI-3	39,37	39,95	0,58
DI-4	39,10	39,92	0,82
DI-5	39,25	39,97	0,72

<b>PRUEBA:</b>	1
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	11,31	l/s
<b>Qprototipo:</b>	200	m3/s

<b>Hv:</b>	5,42	cm
<b>~Hv:</b>	5,41	cm

<b>TUNEL DE DESVÍO</b>			
<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61	24,48	1,87
E2	0,36	5,48	5,12
TD-1	18,69	22,65	3,96
TD-2	19,13	23,01	3,88
TD-3	19,08	23,30	4,22
TD-4	19,04	23,75	4,71
TD-5	19,20	23,97	4,77
TD-6	19,10	24,15	5,05
TD-7	19,17	25,27	6,10
TD-8	19,01	25,23	6,22
TD-9	19,10	25,35	6,25

<b>Qmodelo:</b>	1,41	l/s
<b>Qprototipo:</b>	25	m3/s

<b>Hv:</b>	6,59	cm
<b>~Hv:</b>	6,57	cm

<b>DESCARGA INTERMEDIA</b>			
<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
DI-1	19,22	21,17	1,95
DI-2	39,41	41,30	1,89
DI-3	39,37	39,95	0,58
DI-4	39,10	39,92	0,82
DI-5	39,25	39,97	0,72

**FLUJO COMBINADO: TUNEL DE DESVIO + DESCARGA INTERMEDIA**

<b>PRUEBA:</b>	2
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	11,31	l/s
<b>Qprototipo:</b>	200	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	5,42	cm
<b>~Hv:</b>	5,41	cm

<b>TUNEL DE DESVIO</b>			
<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61	24,41	1,80
E2	0,36	5,33	4,97
TD-1	18,69	22,55	3,86
TD-2	19,13	23,00	3,87
TD-3	19,08	23,36	4,28
TD-4	19,04	23,60	4,56
TD-5	19,20	23,83	4,63
TD-6	19,10	24,15	5,05
TD-7	19,17	27,05	7,88
TD-8	19,01	26,05	7,04
TD-9	19,10	26,45	7,35

<b>Qmodelo:</b>	11,31	l/s
<b>Qprototipo:</b>	200	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	14,01	cm
<b>~Hv:</b>	14,00	cm

<b>DESCARGA INTERMEDIA</b>			
<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
DI-1	19,22	25,47	6,25
DI-2	39,41	42,95	3,54
DI-3	39,37	41,86	2,49
DI-4	39,10	42,15	3,05
DI-5	39,25	42,32	3,07

<b>PRUEBA:</b>	2
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	11,31	l/s
<b>Qprototipo:</b>	200	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	5,42	cm
<b>~Hv:</b>	5,41	cm

<b>TUNEL DE DESVIO</b>			
<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61	24,39	1,78
E2	0,36	5,31	4,95
TD-1	18,69	22,55	3,86
TD-2	19,13	23,00	3,87
TD-3	19,08	23,36	4,28
TD-4	19,04	23,60	4,56
TD-5	19,20	23,82	4,62
TD-6	19,10	24,12	5,02
TD-7	19,17	27,04	7,87
TD-8	19,01	26,03	7,02
TD-9	19,10	26,46	7,36

<b>Qmodelo:</b>	11,31	l/s
<b>Qprototipo:</b>	200	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>	14,01	cm
<b>~Hv:</b>	14,00	cm

<b>DESCARGA INTERMEDIA</b>			
<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
DI-1	19,22	25,40	6,18
DI-2	39,41	42,93	3,52
DI-3	39,37	41,87	2,50
DI-4	39,10	42,14	3,04
DI-5	39,25	42,32	3,07



**FLUJO COMBINADO: TUNEL DE DESVIO + DESCARGA INTERMEDIA**

<b>PRUEBA:</b>	3
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	56,2	l/s
<b>Qprototipo</b>	994,09	m3/s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>	13,93	cm

<b>TUNEL DE DESVIO</b>			
<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61		
E2	0,36		
TD-1	18,69		
TD-2	19,13		
TD-3	19,08		
TD-4	19,04		
TD-5	19,20		
TD-6	19,10		
TD-7	19,17		
TD-8	19,01	32,89	13,88
TD-9	19,10	32,87	13,77

<b>Qmodelo:</b>	1,5	l/s
<b>Qprototipo</b>	26,5	m3/s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>	6,74	cm

<b>DESCARGA INTERMEDIA</b>			
<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
DI-1	19,22		
DI-2	39,41		
DI-3	39,37		
DI-4	39,10		
DI-5	39,25		

<b>PRUEBA:</b>	3
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	56,2	l/s
<b>Qprototipo</b>	994,09	m3/s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>	13,93	cm

<b>TUNEL DE DESVIO</b>			
<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61		
E2	0,36		
TD-1	18,69		
TD-2	19,13		
TD-3	19,08		
TD-4	19,04		
TD-5	19,20		
TD-6	19,10		
TD-7	19,17		
TD-8	19,01	32,90	13,89
TD-9	19,10	32,87	13,77

<b>Qmodelo:</b>	1,5	l/s
<b>Qprototipo</b>	26,5	m3/s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>	6,74	cm

<b>DESCARGA INTERMEDIA</b>			
<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
DI-1	19,22		
DI-2	39,41		
DI-3	39,37		
DI-4	39,10		
DI-5	39,25		

**FLUJO COMBINADO: TUNEL DE DESVIO + DESCARGA INTERMEDIA**

<b>PRUEBA:</b>	4
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	50,7	l/s
<b>Qprototipo</b>	895,39	m3/s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>	13,06	cm

<b>TUNEL DE DESVIO</b>			
<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61	49,94	27,33
E2	0,36	37,52	37,16
TD-1	18,69	27,75	9,06
TD-2	19,13	28,79	9,66
TD-3	19,08	28,24	9,16
TD-4	19,04	29,92	10,88
TD-5	19,20	29,25	10,05
TD-6	19,10	30,00	10,90
TD-7	19,17	-	-
TD-8	19,01	33,36	14,35
TD-9	19,10	33,85	14,75

<b>Qmodelo:</b>	5,7	l/s
<b>Qprototipo</b>	101,5	m3/s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>	11,03	cm

<b>DESCARGA INTERMEDIA</b>			
<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
DI-1	19,22	23,78	4,56
DI-2	39,41	41,70	2,29
DI-3	39,37	41,86	2,49
DI-4	39,10	41,00	1,90
DI-5	39,25	40,90	1,65

<b>PRUEBA:</b>	4
<b>FECHA:</b>	23-Oct-09

<b>Qmodelo:</b>	50,7	l/s
<b>Qprototipo</b>	895,39	m3/s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>	13,06	cm

<b>TUNEL DE DESVIO</b>			
<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
E1	22,61	49,93	27,32
E2	0,36	37,52	37,16
TD-1	18,69	27,74	9,05
TD-2	19,13	28,80	9,67
TD-3	19,08	28,23	9,15
TD-4	19,04	29,42	10,38
TD-5	19,20	29,27	10,07
TD-6	19,10	29,98	10,88
TD-7	19,17	-	-
TD-8	19,01	33,37	14,36
TD-9	19,10	33,86	14,76

<b>Qmodelo:</b>	5,7	l/s
<b>Qprototipo</b>	101,5	m3/s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>	11,03	cm

<b>DESCARGA INTERMEDIA</b>			
<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
DI-1	19,22	23,66	4,44
DI-2	39,41	41,73	2,32
DI-3	39,37	40,87	1,50
DI-4	39,10	41,00	1,90
DI-5	39,25	40,90	1,65

**ANEXO 3 B**

**FASE II**

**REGISTRO DE DATOS TOMADOS**

## TUNEL DE DESVIO

<b>PRUEBA:</b>	1
<b>FECHA:</b>	17/Dic./2009

<b>Qmodelo:</b>	2.83	l/s
<b>Qprototipo:</b>	50	m3/s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>		cm

PUNTO	Ho (cm)	Hmedido (cm)	Calado (cm)
E1	17.24	30.08	12.84
E2	0.21	1.31	1.10
TD - 1	18.69	20.41	1.72
TD - 2	19.13	21.25	2.12
TD - 3	19.08	21.63	2.55
TD - 4	19.04	21.69	2.65
TD - 5	19.20	21.85	2.65
TD - 6	19.10	21.72	2.62
TD - 7	19.17	*	*
TD - 8	19.01	21.79	2.78
TD - 9	19.10	21.82	2.72

<b>PRUEBA:</b>	1
<b>FECHA:</b>	17/Dic./2009

<b>Qmodelo:</b>	2.83	l/s
<b>Qprototipo:</b>	50	m3/s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>		cm

PUNTO	Ho (cm)	Hmedido (cm)	Calado (cm)
E1	17.24	30.12	12.88
E2	0.21	1.31	1.10
TD - 1	18.69	20.46	1.77
TD - 2	19.13	21.31	2.18
TD - 3	19.08	21.66	2.58
TD - 4	19.04	21.75	2.71
TD - 5	19.20	21.90	2.70
TD - 6	19.10	21.84	2.74
TD - 7	19.17	*	*
TD - 8	19.01	21.73	2.72
TD - 9	19.10	21.81	2.71

<b>PRUEBA:</b>	2
<b>FECHA:</b>	17/Dic./2009

<b>Qmodelo:</b>	5.66	l/s
<b>Qprototipo:</b>	100	m3/s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>		cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
<b>E1</b>	17.24	31.67	14.43
<b>E2</b>	0.21	3.04	2.83
TD - 1	18.69	21.09	2.40
TD - 2	19.13	22.21	3.08
TD - 3	19.08	22.43	3.35
TD - 4	19.04	22.73	3.69
TD - 5	19.20	22.99	3.79
TD - 6	19.10	22.96	3.86
TD - 7	19.17	*	*
TD - 8	19.01	23.16	4.15
TD - 9	19.10	23.12	4.02

<b>PRUEBA:</b>	2
<b>FECHA:</b>	17/Dic./2009

<b>Qmodelo:</b>	5.66	l/s
<b>Qprototipo:</b>	100	m3/s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>		cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
<b>E1</b>	17.24	31.74	14.50
<b>E2</b>	0.21	3.05	2.84
TD - 1	18.69	21.28	2.59
TD - 2	19.13	22.50	3.37
TD - 3	19.08	22.68	3.60
TD - 4	19.04	22.42	3.38
TD - 5	19.20	23.02	3.82
TD - 6	19.10	22.95	3.85
TD - 7	19.17	*	*
TD - 8	19.01	23.15	4.14
TD - 9	19.10	23.11	4.01

<b>PRUEBA:</b>	3
<b>FECHA:</b>	18/Dic./2009

<b>Qmodelo:</b>	11.31	l/s
<b>Qprototipo:</b>	200	m3/s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>		cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
<b>E1</b>	17.24	33.48	16.24
<b>E2</b>	0.21	4.67	4.46
TD - 1	18.69	22.25	3.56
TD - 2	19.13	22.71	3.58
TD - 3	19.08	23.37	4.29
TD - 4	19.04	23.71	4.67
TD - 5	19.20	23.86	4.66
TD - 6	19.10	23.91	4.81
TD - 7	19.17	*	*
TD - 8	19.01	24.00	4.99
TD - 9	19.10	24.25	5.15

<b>PRUEBA:</b>	3
<b>FECHA:</b>	18/Dic./2009

<b>Qmodelo:</b>	11.31	l/s
<b>Qprototipo:</b>	200	m3/s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>		cm

<b>PUNTO</b>	<b>Ho (cm)</b>	<b>Hmedido (cm)</b>	<b>Calado (cm)</b>
<b>E1</b>	17.24	33.36	16.12
<b>E2</b>	0.21	4.64	4.43
TD - 1	18.69	22.25	3.56
TD - 2	19.13	23.16	4.03
TD - 3	19.08	23.67	4.59
TD - 4	19.04	23.72	4.68
TD - 5	19.20	23.93	4.73
TD - 6	19.10	24.01	4.91
TD - 7	19.17	*	*
TD - 8	19.01	24.10	5.09
TD - 9	19.10	24.15	5.05



<b>PRUEBA:</b>	4
<b>FECHA:</b>	18/Dic./2009

<b>Qmodelo:</b>	22.28	l/s
<b>Qprototipo:</b>	393.86	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>		cm

PUNTO	Ho (cm)	Hmedido (cm)	Calado (cm)
E1	17.24	39.57	22.33
E2	0.21	14.67	14.46
TD - 1	18.69	25.24	6.55
TD - 2	19.13	26.07	6.94
TD - 3	19.08	26.24	7.16
TD - 4	19.04	26.60	7.56
TD - 5	19.20	27.07	7.87
TD - 6	19.10	26.95	7.85
TD - 7	19.17	*	*
TD - 8	19.01	27.67	8.66
TD - 9	19.10	27.88	8.78

<b>PRUEBA:</b>	4
<b>FECHA:</b>	18/Dic./2009

<b>Qmodelo:</b>	22.28	l/s
<b>Qprototipo:</b>	393.86	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>		cm

PUNTO	Ho (cm)	Hmedido (cm)	Calado (cm)
E1	17.24	39.57	22.33
E2	0.21	14.46	14.25
TD - 1	18.69	25.17	6.48
TD - 2	19.13	26.23	7.10
TD - 3	19.08	26.22	7.14
TD - 4	19.04	26.74	7.70
TD - 5	19.20	27.05	7.85
TD - 6	19.10	27.07	7.97
TD - 7	19.17	*	*
TD - 8	19.01	27.97	8.96
TD - 9	19.10	27.89	8.79

<b>PRUEBA:</b>	5
<b>FECHA:</b>	18/Dic./2009

<b>Qmodelo:</b>		l/s
<b>Qprototipo:</b>	951.69	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>		cm

PUNTO	Ho (cm)	Hmedido (cm)	Calado (cm)
E1	17.24	52.99	35.75
E2	0.21	33.15	32.94
TD - 1	18.69	28.43	9.74
TD - 2	19.13	29.98	10.85
TD - 3	19.08	30.16	11.08
TD - 4	19.04	30.55	11.51
TD - 5	19.20	31.16	11.96
TD - 6	19.10	31.32	12.22
TD - 7	19.17	*	*
TD - 8	19.01	31.86	12.85
TD - 9	19.10	32.47	13.37

<b>PRUEBA:</b>	5
<b>FECHA:</b>	18/Dic./2009

<b>Qmodelo:</b>		l/s
<b>Qprototipo:</b>	951.69	m <sup>3</sup> /s

<b>Hv:</b>		cm
<b>~Hv:</b>		cm

PUNTO	Ho (cm)	Hmedido (cm)	Calado (cm)
E1	17.24	54.93	37.69
E2	0.21	33.79	33.58
TD - 1	18.69	29.73	11.04
TD - 2	19.13	29.66	10.53
TD - 3	19.08	30.09	11.01
TD - 4	19.04	30.52	11.48
TD - 5	19.20	31.46	12.26
TD - 6	19.10	31.27	12.17
TD - 7	19.17	*	*
TD - 8	19.01	32.07	13.06
TD - 9	19.10	32.64	13.54

**ANEXO 3 C**

**FASE III**

**REGISTRO DE DATOS TOMADOS**

## DESCARGA INTERMEDIA

PRUEBA #:	1	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	25	m <sup>3</sup> /s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	0.33	cm
H real =	6.46	cm
Q real =	25.8	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	22.38	2.18
DI - 2	38.45	39.33	0.88
DI -3	38.08	39.93	1.85
DI -4	37.73	40.02	2.29
DI -5	38.4	40.78	2.38
DI -6	21.16	22.47	1.31
DI -7			

## DESCARGA INTERMEDIA

PRUEBA #:	1	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	25	m <sup>3</sup> /s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	0.33	cm
H real =	6.46	cm
Q real =	25.8	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	22.38	2.18
DI - 2	38.45	39.32	0.87
DI -3	38.08	39.85	1.77
DI -4	37.73	40.05	2.32
DI -5	38.4	40.78	2.38
DI -6	21.16	22.55	1.39
DI -7			

## DESCARGA INTERMEDIA

PRUEBA #:	2	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	200	m <sup>3</sup> /s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	0.33	cm
H real =	13.66	cm
Q real =	194.8	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	26.59	6.39
DI -2	38.45	42.81	4.36
DI -3	38.08	42.1	4.02
DI -4	37.73	42.28	4.55
DI -5	38.4	43.28	4.88
DI -6	21.16	24.75	3.59
DI -7			

## DESCARGA INTERMEDIA

PRUEBA #:	2	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	200	m <sup>3</sup> /s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	0.33	cm
H real =	13.7	cm
Q real =	196.4	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	26.51	6.31
DI -2	38.45	42.85	4.40
DI -3	38.08	42.14	4.06
DI -4	37.73	42.4	4.67
DI -5	38.4	43.3	4.90
DI -6	21.16	24.9	3.74
DI -7			

## DESCARGA INTERMEDIA

PRUEBA #:	3	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	150	m <sup>3</sup> /s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	0.33	cm
H real =	12.48	cm
Q real =	147.2	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	25.7	5.50
DI - 2	38.45	41.96	3.51
DI -3	38.08	41.52	3.44
DI -4	37.73	41.8	4.07
DI -5	38.4	42.68	4.28
DI -6	21.16	24.22	3.06
DI -7			

## DESCARGA INTERMEDIA

PRUEBA #:	3	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	150	m <sup>3</sup> /s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	0.33	cm
H real =	12.48	cm
Q real =	150.9	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	25.77	5.57
DI - 2	38.45	42.01	3.56
DI -3	38.08	41.56	3.48
DI -4	37.73	41.7	3.97
DI -5	38.4	42.43	4.03
DI -6	21.16	24.09	2.93
DI -7			



## DESCARGA INTERMEDIA

PRUEBA #:	3	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	150	m <sup>3</sup> /s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	0.33	cm
H real =	12.48	cm
Q real =	150.9	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	25.77	5.57
DI - 2	38.45	42.02	3.57
DI -3	38.08	41.59	3.51
DI -4	37.73	41.86	4.13
DI -5	38.4	42.73	4.33
DI -6	21.16	24.14	2.98
DI -7			

## DESCARGA INTERMEDIA

PRUEBA #:	4	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	200	m <sup>3</sup> /s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	0.33	cm
H real =	13.66	cm
Q real =	194.8	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	26.6	6.40
DI - 2	38.45	42.72	4.27
DI -3	38.08	42.03	3.95
DI -4	37.73	42.24	4.51
DI -5	38.4	43.18	4.78
DI -6	21.16	24.7	3.54
DI -7			

## DESCARGA INTERMEDIA

PRUEBA #:	4	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	200	m <sup>3</sup> /s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	0.33	cm
H real =	13.7	cm
Q real =	196.4	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	26.47	6.27
DI - 2	38.45	42.84	4.39
DI -3	38.08	42.04	3.96
DI -4	37.73	42.9	5.17
DI -5	38.4	43.23	4.83
DI -6	21.16	24.67	3.51
DI -7			

## DESCARGA INTERMEDIA

PRUEBA #:	2	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	100	m <sup>3</sup> /s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	0.33	cm
H real =	10.85	cm
Q real =	102.5	m <sup>3</sup> /s

PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	24.86	4.66
DI - 2	38.45	40.9	2.45
DI -3	38.08	41.06	2.98
DI -4	37.73	41.46	3.73
DI -5	38.4	42.03	3.63
DI -6	21.16	23.56	2.40
DI -7			

## DESCARGA INTERMEDIA

PRUEBA #:	2	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	100	m <sup>3</sup> /s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	0.33	cm
H real =	10.85	cm
Q real =	102.5	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	24.85	4.65
DI - 2	38.45	40.89	2.44
DI -3	38.08	41.12	3.04
DI -4	37.73	41.4	3.67
DI -5	38.4	42.03	3.63
DI -6	21.16	23.58	2.42
DI -7			

## TÚNEL DE DESVÍO

PRUEBA #:	1	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	100	m <sup>3</sup> /s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	4.09	cm
Q real =	101.15	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	0.80	5.6	4.80
TD - 2	0.17	3.04	2.87
TD -3	18.95	21.66	2.71
TD -4	19.18	22.85	3.67
TD -5	19.07	22.95	3.88
TD -6	19.17	23.39	4.22
TD -7	19.27	23.4	4.13
TD -8	19.24	23.19	3.95
TD -9	14.2	16.87	2.67

### TÚNEL DE DESVÍO

PRUEBA #:	1	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	100	m3/s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	4	cm
Q real =	96.38	m3/s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	0.80	5.01	4.21
TD -2	0.17	2.92	2.75
TD -3	18.95	21.86	2.91
TD -4	19.18	23.07	3.89
TD -5	19.07	23.13	4.06
TD -6	19.17	23.62	4.45
TD -7	19.27	23.53	4.26
TD -8	19.24	23.84	4.60
TD -9	14.2	16.88	2.68

### TÚNEL DE DESVÍO

PRUEBA #:	1	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	100	m3/s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	4.04	cm
Q real =	98.49	m3/s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	1.88	6.72	4.84
TD -2	0.17	3.19	3.02
TD -3	18.95	21.76	2.81
TD -4	19.18	22.85	3.67
TD -5	19.07	22.9	3.83
TD -6	19.17	23.41	4.24
TD -7	19.27	23.46	4.19
TD -8	19.24	23.71	4.47
TD -9	14.2	16.71	2.51

### TÚNEL DE DESVÍO

PRUEBA #:	1	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	100	m3/s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	4.04	cm
Q real =	98.49	m3/s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	1.88	6.69	4.81
TD -2	0.17	3.29	3.12
TD -3	18.95	21.88	2.93
TD -4	19.18	22.9	3.72
TD -5	19.07	23.02	3.95
TD -6	19.17	23.51	4.34
TD -7	19.27	23.54	4.27
TD -8	19.24	23.8	4.56
TD -9	14.2	16.8	2.60

### TÚNEL DE DESVÍO

PRUEBA #:	2	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	200	m3/s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	5.76	cm
Q real =	202.62	m3/s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	0.80	7.93	7.13
TD -2	0.17	5.09	4.92
TD -3	18.95	22.34	3.39
TD -4	19.18	23.8	4.62
TD -5	19.07	23.89	4.82
TD -6	19.17	24.71	5.54
TD -7	19.27	24.75	5.48
TD -8	19.24	25.16	5.92
TD -9	14.2	18.14	3.94

### TÚNEL DE DESVÍO

PRUEBA #:	2	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	100	m <sup>3</sup> /s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	5.73	cm
Q real =	200.6	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	0.80	7.94	7.14
TD -2	0.17	5.15	4.98
TD -3	18.95	22.3	3.35
TD -4	19.18	24.04	4.86
TD -5	19.07	23.89	4.82
TD -6	19.17	24.7	5.53
TD -7	19.27	24.7	5.43
TD -8	19.24	25.13	5.89
TD -9	14.2	18.27	4.07

### TÚNEL DE DESVÍO

PRUEBA #:	2	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	200	m <sup>3</sup> /s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	5.76	cm
Q real =	202.62	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	1.88	8.68	6.80
TD -2	0.17	5.23	5.06
TD -3	18.95	22.23	3.28
TD -4	19.18	23.87	4.69
TD -5	19.07	23.93	4.86
TD -6	19.17	24.57	5.40
TD -7	19.27	27.74	8.47
TD -8	19.24	25.11	5.87
TD -9	14.2	17.74	3.54



**TÚNEL DE DESVÍO**

PRUEBA #:	2	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	200	m3/s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	1.36	cm
H real =	5.76	cm
Q real =	202.62	m3/s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	1.88	8.68	6.80
TD -2	0.17	5.15	4.98
TD -3	18.95	22.35	3.40
TD -4	19.18	23.67	4.49
TD -5	19.07	23.85	4.78
TD -6	19.17	24.65	5.48
TD -7	19.27	24.76	5.49
TD -8	19.24	25.1	5.86
TD -9	14.2	17.75	3.55

**TÚNEL DE DESVÍO**

PRUEBA #:	3	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	500	m3/s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	1.36	cm
H real =	9.47	cm
Q real =	499.62	m3/s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	0.80	13.53	12.73
TD -2	0.17	10.42	10.25
TD -3	18.95	25.23	6.28
TD -4	19.18	27.02	7.84
TD -5	19.07	27.21	8.14
TD -6	19.17	27.32	8.15
TD -7	19.27	27.93	8.66
TD -8	19.24	28.01	8.77
TD -9	14.2	21.45	7.25

### TÚNEL DE DESVÍO

PRUEBA #:	3	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	500	m3/s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	9.47	cm
Q real =	499.62	m3/s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	0.80	13.54	12.74
TD -2	0.17	10.5	10.33
TD -3	18.95	25.29	6.34
TD -4	19.18	26.74	7.56
TD -5	19.07	27.45	8.38
TD -6	19.17	27.38	8.21
TD -7	19.27	27.77	8.5
TD -8	19.24	27.91	8.67
TD -9	14.2	21.48	7.28

### TÚNEL DE DESVÍO

PRUEBA #:	3	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	500	m3/s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	9.51	cm
Q real =	503.29	m3/s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	1.88	14.37	12.49
TD -2	0.17	10.62	10.45
TD -3	18.95	25.47	6.52
TD -4	19.18	26.68	7.50
TD -5	19.07	27.51	8.44
TD -6	19.17	27.24	8.07
TD -7	19.27	27.81	8.54
TD -8	19.24	28	8.76
TD -9	14.2	21.36	7.16

### TÚNEL DE DESVÍO

PRUEBA #:	3	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	500	m3/s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	9.51	cm
Q real =	503.29	m3/s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	1.88	14.35	12.47
TD -2	0.17	10.86	10.69
TD -3	18.95	25.32	6.37
TD -4	19.18	26.73	7.55
TD -5	19.07	27.94	8.87
TD -6	19.17	27.35	8.18
TD -7	19.27	28.01	8.74
TD -8	19.24	28.06	8.82
TD -9	14.2	21.56	7.36

### TÚNEL DE DESVÍO

PRUEBA #:	4	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	800	m3/s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	12.39	cm
Q real =	789.56	m3/s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	1.88	12.32	10.44
TD -2	0.17	16.15	15.98
TD -3	18.95	27.93	8.98
TD -4	19.18	28.79	9.61
TD -5	19.07	29.33	10.26
TD -6	19.17	29.73	10.56
TD -7	19.27	31.02	11.75
TD -8	19.24	30.68	11.44
TD -9	14.2	23.95	9.75

**TÚNEL DE DESVÍO**

PRUEBA #:	4	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	800	m3/s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	1.36	cm
H real =	12.44	cm
Q real =	794.91	m3/s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	1.88	19.48	17.60
TD -2	0.17	16.24	16.07
TD -3	18.95	27.83	8.88
TD -4	19.18	28.83	9.65
TD -5	19.07	29.65	10.58
TD -6	19.17	29.83	10.66
TD -7	19.27	31	11.73
TD -8	19.24	30.71	11.47
TD -9	14.2	24.17	9.97

**TÚNEL DE DESVÍO**

PRUEBA #:	4	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	800	m3/s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	1.36	cm
H real =	12.49	cm
Q real =	800.26	m3/s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	0.80	18.73	17.93
TD -2	0.17	16.08	15.91
TD -3	18.95	27.89	8.94
TD -4	19.18	28.92	9.74
TD -5	19.07	29.74	10.67
TD -6	19.17	29.91	10.74
TD -7	19.27	31.05	11.78
TD -8	19.24	31.79	12.55
TD -9	14.2	24.14	9.94

### TÚNEL DE DESVÍO

PRUEBA #:	4	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	800	m3/s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	12.44	cm
Q real =	794.91	m3/s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	0.80	18.63	17.83
TD -2	0.17	16.54	16.37
TD -3	18.95	27.95	9.00
TD -4	19.18	29.07	9.89
TD -5	19.07	29.6	10.53
TD -6	19.17	29.79	10.62
TD -7	19.27	31.01	11.74
TD -8	19.24	30.63	11.39
TD -9	14.2	24.14	9.94

### TÚNEL DE DESVÍO

PRUEBA #:	5	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	1130	m3/s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	15.37	cm
Q real =	1128.62	m3/s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	0.80	27.53	26.73
TD -2	0.17	32.51	32.34
TD -3	18.95	30.93	11.98
TD -4	19.18	31.29	12.11
TD -5	19.07	32.93	13.86
TD -6	19.17	33.76	14.59
TD -7	19.27	34.6	15.33
TD -8	19.24	36.41	17.17
TD -9	14.2	27.5	13.3

### TÚNEL DE DESVÍO

PRUEBA #:	5	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	1130	m3/s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	15.14	cm
Q real =	1101.01	m3/s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	1.88	28.63	26.75
TD -2	0.17	33.7	33.53
TD -3	18.95	30.96	12.01
TD -4	19.18	31.74	12.56
TD -5	19.07	32.83	13.76
TD -6	19.17	33.67	14.50
TD -7	19.27	34.64	15.37
TD -8	19.24	36.14	16.9
TD -9	14.2	27.32	13.12

### TÚNEL DE DESVÍO

PRUEBA #:	5	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	1130	m3/s

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =		cm
H real =	15.34	cm
Q real =	1125	m3/s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD -1	1.88	28.77	26.89
TD -2	0.17	33.46	33.29
TD -3	18.95	30.75	11.80
TD -4	19.18	31.74	12.56
TD -5	19.07	32.73	13.66
TD -6	19.17	33.79	14.62
TD -7	19.27	34.88	15.61
TD -8	19.24	36.14	16.90
TD -9	14.2	27.39	13.19



**DESCARGA INTERMEDIA**

PRUEBA #:	1	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	25	m <sup>3</sup> /s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	6.43	cm
Q real =	25.5	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	22.556	2.36
DI - 2	38.45	39.39	0.94
DI -3	38.08	39.83	1.75
DI -4	37.73	40.21	2.48
DI -5	38.4	40.89	2.49
DI -6	21.16	23.05	1.89

**DESCARGA INTERMEDIA**

PRUEBA #:	1	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	25	m <sup>3</sup> /s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	6.43	cm
Q real =	25.5	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	22.62	2.42
DI - 2	38.45	39.4	0.95
DI -3	38.08	39.82	1.74
DI -4	37.73	40.2	2.47
DI -5	38.4	40.9	2.50
DI -6	21.16	23.12	1.96

**DESCARGA INTERMEDIA**

PRUEBA #:	1	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	25	m <sup>3</sup> /s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	6.46	cm
Q real =	25.8	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	22.38	2.18
DI - 2	38.45	39.32	0.87
DI -3	38.08	39.85	1.77
DI -4	37.73	40.05	2.32
DI -5	38.4	40.78	2.38
DI -6	21.16	22.55	1.39

**DESCARGA INTERMEDIA**

PRUEBA #:	2	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	100	m <sup>3</sup> /s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	10.73	cm
Q real =	99.4	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	24.8	4.60
DI - 2	38.45	40.99	2.54
DI -3	38.08	41.05	2.97
DI -4	37.73	41.29	3.56
DI -5	38.4	41.82	3.42
DI -6	21.16	24.01	2.85

**DESCARGA INTERMEDIA**

PRUEBA #:	2	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	100	m <sup>3</sup> /s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	10.73	cm
Q real =	99.4	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	24.8	4.60
DI - 2	38.45	40.89	2.44
DI -3	38.08	41.05	2.97
DI -4	37.73	41.42	3.69
DI -5	38.4	41.9	3.50
DI -6	21.16	24.01	2.85

**DESCARGA INTERMEDIA**

PRUEBA #:	2	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	100	m <sup>3</sup> /s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	10.85	cm
Q real =	102.5	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	24.85	4.65
DI - 2	38.45	40.89	2.44
DI -3	38.08	41.12	3.04
DI -4	37.73	41.4	3.67
DI -5	38.4	42.03	3.63
DI -6	21.16	23.58	2.42

**DESCARGA INTERMEDIA**

PRUEBA #:	3	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	150	m <sup>3</sup> /s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	12.37	cm
Q real =	147.2	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	25.6	5.40
DI - 2	38.45	41.95	3.50
DI -3	38.08	41.47	3.39
DI -4	37.73	41.52	3.79
DI -5	38.4	42.55	4.15
DI -6	21.16	24.23	3.07

**DESCARGA INTERMEDIA**

PRUEBA #:	3	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	150	m <sup>3</sup> /s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	12.48	cm
Q real =	147.2	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	25.7	5.50
DI - 2	38.45	41.96	3.51
DI -3	38.08	41.52	3.44
DI -4	37.73	41.8	4.07
DI -5	38.4	42.68	4.28
DI -6	21.16	24.22	3.06

**DESCARGA INTERMEDIA**

PRUEBA #:	3	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	150	m <sup>3</sup> /s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	12.48	cm
Q real =	150.9	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	25.77	5.57
DI - 2	38.45	42.01	3.56
DI -3	38.08	41.56	3.48
DI -4	37.73	41.7	3.97
DI -5	38.4	42.43	4.03
DI -6	21.16	24.09	2.93

**DESCARGA INTERMEDIA**

PRUEBA #:	3	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	150	m <sup>3</sup> /s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	12.48	cm
Q real =	150.9	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	25.77	5.57
DI - 2	38.45	42.02	3.57
DI -3	38.08	41.59	3.51
DI -4	37.73	41.86	4.13
DI -5	38.4	42.73	4.33
DI -6	21.16	24.14	2.98

**DESCARGA INTERMEDIA**

PRUEBA #:	4	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	200	m <sup>3</sup> /s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	13.66	cm
Q real =	194.8	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	26.6	6.40
DI - 2	38.45	42.72	4.27
DI -3	38.08	42.03	3.95
DI -4	37.73	42.24	4.51
DI -5	38.4	43.18	4.78
DI -6	21.16	24.7	3.54

**DESCARGA INTERMEDIA**

PRUEBA #:	4	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	200	m <sup>3</sup> /s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	13.66	cm
Q real =	194.8	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	26.59	6.39
DI - 2	38.45	42.81	4.36
DI -3	38.08	42.1	4.02
DI -4	37.73	42.28	4.55
DI -5	38.4	43.28	4.88
DI -6	21.16	24.75	3.59



**DESCARGA INTERMEDIA**

PRUEBA #:	4	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	200	m <sup>3</sup> /s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	13.7	cm
Q real =	196.4	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	26.47	6.27
DI - 2	38.45	42.84	4.39
DI -3	38.08	42.04	3.96
DI -4	37.73	42.9	5.17
DI -5	38.4	43.23	4.83
DI -6	21.16	24.67	3.51

**DESCARGA INTERMEDIA**

PRUEBA #:	4	
FECHA:		
Q modelo =		l/s
Q proto =	200	m <sup>3</sup> /s

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	13.7	cm
Q real =	196.4	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -1	20.20	26.51	6.31
DI - 2	38.45	42.85	4.40
DI -3	38.08	42.14	4.06
DI -4	37.73	42.4	4.67
DI -5	38.4	43.3	4.90
DI -6	21.16	24.9	3.74