

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ESTUDIO EXPERIMENTAL EN MODELO FÍSICO SOBRE EL
DESARROLLO DEL CUENCO DE SOCAVACIÓN AL PIE DE LA
PRESA TOACHI**

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

DANIEL HERNÁN HERMOSA HIDALGO
daniel_21h@hotmail.com

DIRECTOR: DR.- ING. MARCO ANTONIO CASTRO DELGADO
marco.castro@epn.edu.ec

Quito, Diciembre 2013

DECLARACIÓN

Yo, Daniel Hernán Hermosa Hidalgo, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y; que he 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 en la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

DANIEL HERNÁN HERMOSA HIDALGO

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Daniel Hernán Hermosa Hidalgo, bajo mi supervisión.

PROF. DR.- ING. MARCO CASTRO DELGADO
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A mis padres Liliana y Hernán por ser ejemplo a seguir, por su amor y paciencia, a mi hermana Paola a quien admiro por su inteligencia y coraje, a Jacky por su cariño y apoyo incondicional.

Agradezco de manera especial a la Ing. Ximena Hidalgo, por su guía y apoyo a lo largo de toda la carrera, al Dr. Marco Castro, por su asesoramiento en este proyecto de titulación y a todos mis amigos y compañeros.

Daniel Hermosa Hidalgo

DEDICATORIA

A toda mi familia, sustento y fortaleza de siempre.

Daniel Hermosa Hidalgo

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
CONTENIDO.....	VI
RESUMEN	XVIII
ABSTRACT	XIX
PRESENTACIÓN	XX
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO TOACHI – PILATÓN	1
1.1.1 APROVECHAMIENTO TOACHI-ALLURIQUÍN.....	4
1.2 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL E INFORMACIÓN DE BASE	9
1.3 PLAN DE OPERACIÓN DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS Y DEL CUENCO PREEXCAVADO COMO ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	11
1.4 OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN DEL MODELO	11
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN DEL MODELO.....	11
CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO FÍSICO Y ANÁLISIS TEÓRICO SOBRE EL PROCESO DE SOCAVACIÓN DE UN CUENCO AL PIE DE UN CHORRO	13
2.1 ANÁLISIS TEÓRICO BÁSICO SOBRE EL CHORRO DE SALIDA DESDE EL SALTO EN EL ESQUÍ	13
2.1.1 PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DEL SALTO EN ESQUÍ.....	14
2.1.2 DESARROLLO DEL FLUJO DE SALIDA DESDE EL SALTO EN ESQUÍ (AIREACIÓN, RESISTENCIA DEL AIRE).....	16
2.1.3 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS: ALCANCE Y ALTURA MÁXIMA DEL CHORRO	16
2.2 DESARROLLO, PROFUNDIDAD Y UBICACIÓN DEL CUENCO SOCAVADO AL PIE DE LA PRESA.....	20
2.2.1 DESARROLLO DEL CUENCO SOCAVADO	20
2.2.2 PROFUNDIDAD MÁXIMA DEL CUENCO SOCAVADO	21
2.2.3 UBICACIÓN DEL CUENCO DE SOCAVACIÓN	25
2.2.4 LONGITUD DEL CUENCO	27
2.2.5 ANCHO DEL CUENCO	27
2.3 CONCLUSIONES	27
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL FENÓMENO DE SOCAVACIÓN POR IMPACTO DEL CHORRO DE AGUA EN UN CUENCO DE MATERIAL SUELTO.....	29

3.1 BASES DE LA SIMILITUD GEOMÉTRICA.....	29
3.2 BASES DE LA SIMILITUD CINEMÁTICA.....	30
3.3 SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA.....	30
3.3.1 SIMILITUD DE FROUDE.....	31
3.3.2 ANÁLISIS DIMENSIONAL.....	33
3.4 SIMILITUD DINÁMICA EXACTA.....	37
3.4.1 EFECTOS DE ESCALA.....	37
3.5 JUSTIFICACIÓN DE LA ESCALA LONGITUDINAL DEL MODELO EXISTENTE.....	38
3.6 CONCLUSIONES.....	39
CAPÍTULO 4: DESCRIPCIÓN Y OPERACIÓN DEL MODELO FÍSICO.....	41
4.1 GENERALIDADES.....	41
4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO FÍSICO EXISTENTE.....	41
4.2.1 COMPONENTES DE LA ZONA DE INGRESO.....	42
4.2.2 MODELO FÍSICO DE LA PRESA TOACHI.....	44
4.3 INSTRUMENTACIÓN PARA LAS PRUEBAS.....	52
4.3.1 VERTEDERO TRIANGULAR DE 90°, PARED DELGADA.....	52
4.3.2 LIMNÍMETROS, CINTA MÉTRICA.....	53
4.3.3 NIVEL Y ESTACIÓN TOTAL.....	54
4.4 PLAN DE PRUEBAS.....	55
4.5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	58
4.6 CONCLUSIONES.....	62
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE LA SOCAVACIÓN EN EL CUENCO AMORTIGUADOR AL PIE DE LA PRESA TOACHI PROVOCADO POR LOS VERTEDEROS DE EXCESOS.....	64
5.1 SOCAVACIÓN EN EL CUENCO DE MATERIAL SUELTO DISPUESTO COMO ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR EFECTO DE LA DESCARGA DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS DE LA PRESA TOACHI.....	64
5.1.1 CUENCO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON EL MATERIAL PÉTREO DEL DISEÑO ORIGINAL DE DIÁMETRO NOMINAL 2,0 CM.....	65
5.1.2 CUENCO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON EL MATERIAL PÉTREO ALTERNATIVO DE DIÁMETRO NOMINAL 1,5 CM ...	66
5.1.3 CUENCO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON EL MATERIAL PÉTREO ALTERNATIVO DE DIÁMETRO NOMINAL 1.0 CM ...	68
5.2 ANÁLISIS CUALITATIVO DE LAS DIFERENCIAS EN LA GEOMETRÍA DEL CUENCO SOCAVADO SEGÚN LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS ..	69
5.3 DETERMINACIÓN TEÓRICA DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN Y COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	74
5.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD (TEORÍA DE ERRORES).....	78

5.5 CONCLUSIONES	84
5.6 RECOMENDACIONES.....	85
CAPÍTULO 6: ELABORACIÓN DE UNA HOJA DE CÁLCULO PARA LA EVALUACIÓN DE LA PROFUNDIDAD MÁXIMA DE SOCAVACIÓN	86
CAPÍTULO 7: RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
7.1 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN	90
7.2 CONCLUSIONES SOBRE EL ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	96
7.3 CONCLUSIONES SOBRE EL PROYECTO DE TITULACIÓN.....	98
7.4 RECOMENDACIONES.....	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXOS	102
ANEXO No. 1: FOSOS SOCAVADOS.....	102
ANEXO No. 2: RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS.....	102
ANEXO No. 3: REGISTRO DE DATOS EXPERIMENTALES.....	102
ANEXO No. 4: HOJA DE CÁLCULO PARA LA EVALUACIÓN DE LA PROFUNDIDAD MÁXIMA DE SOCAVACIÓN.....	102

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1: Curvas granulométricas de los materiales pétreos utilizados	57
Gráfico 5.1: Relación entre parámetros adimensionales, Escenario N°1	66
Gráfico 5.2: Relación entre parámetros adimensionales, Escenario N°2	67
Gráfico 5.3: Relación entre parámetros adimensionales, Escenario N°3	69
Gráfico 5.4: Profundidades del foso derecho	70
Gráfico 5.5: Profundidades del foso izquierdo	70
Gráfico 5.6: Distancias desde la presa hasta el foso derecho	71
Gráfico 5.7: Distancias desde la presa hasta el foso izquierdo	72
Gráfico 5.8: Anchos de los fosos	73
Gráfico 5.9: Longitudes de los fosos	73
Gráfico 5.10: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Schoklitsch, Escenario N°1	75
Gráfico 5.11: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Machado, Escenario N°1	75
Gráfico 5.12: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Schoklitsch, Escenario N°2	76
Gráfico 5.13: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Machado, Escenario N°2	76
Gráfico 5.14: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Schoklitsch, Escenario N°3	77
Gráfico 5.15: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Machado, Escenario N°3	77
Gráfico 5.16: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Schoklitsch utilizando el caudal corregido, Escenario N°1	81
Gráfico 5.17: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Machado utilizando el caudal corregido, Escenario N°1	81
Gráfico 5.18: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Schoklitsch utilizando el caudal corregido, Escenario N°2	82
Gráfico 5.19: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Machado utilizando el caudal corregido, Escenario N°2	82

Gráfico 5.20: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Schoklitsch utilizando el caudal corregido, Escenario N°3	83
Gráfico 5.21: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Machado utilizando el caudal corregido, Escenario N°3.....	83
Gráfico 7.1: Comparación adimensional entre profundidades de socavación y caudales	93
Gráfico 7.2: Comparación adimensional entre profundidad de socavación y energía disponible	94
Gráfico 7.3: Curvas extrapoladas para diseño de cuencos de disipación de energía	95

LISTA DE CUADROS

Cuadro 3.1: Parámetros adimensionales	31
Cuadro 3.2: Escala de magnitudes según el criterio de Froude	32
Cuadro 3.3: Matriz característica.....	35
Cuadro 3.4: Determinación de π_1	35
Cuadro 3.5: Determinación de π_2 :	35
Cuadro 3.6: Determinación de π_3 :	36
Cuadro 3.7: Determinación de π_4 :	36
Cuadro 3.8: Determinación de π_5 :	36
Cuadro 3.9: Selección de la escala del modelo.....	39
Cuadro 4.1: Datos del embalse y ataguía	46
Cuadro 4.2: Dimensiones del canal de toma.....	47
Cuadro 4.3: Dimensiones de los vertederos de excesos y sus componentes.....	48
Cuadro 4.4: Dimensiones del vertedero Sarapullo	49
Cuadro 4.5: Dimensiones relevantes de los desagües de fondo.....	50
Cuadro 4.6: Dimensiones principales del cuenco de disipación de energía.....	51
Cuadro 4.7: Dimensiones de la transición hacia el río	52
Cuadro 4.8: Serie de caudales propuestos para cada escenario.....	55
Cuadro 4.9: Diámetro nominal del material pétreo	56
Cuadro 4.10: Características de los materiales pétreos.....	58
Cuadro 4.11: Comparación de caudales propuestos vs. Ensayados, Escenario N°1	58
Cuadro 4.12: Comparación de caudales propuestos vs. Ensayados, Escenario N°2	59
Cuadro 4.13: Comparación de caudales propuestos vs. Ensayados, Escenario N°3	59
Cuadro 4.14: Resultados experimentales Escenario N°1.....	60
Cuadro 4.15: Resultados experimentales Escenario N°2.....	61
Cuadro 4.16: Resultados experimentales Escenario N°3.....	62
Cuadro 5.1: Datos experimentales y parámetros adimensionales, Escenario N°1...	66

Cuadro 5.2: Datos experimentales y parámetros adimensionales, Escenario N°2...	67
Cuadro 5.3: Datos experimentales y parámetros adimensionales, Escenario N°3...	68
Cuadro 6.1: Parámetros utilizados en las ecuaciones empíricas	86
Cuadro 6.2: Ecuaciones empíricas.....	87
Cuadro 6.3: Ingreso de los valores correspondientes a los datos geométricos ...	88
Cuadro 6.4: Ingreso de los datos del material pétreo	88
Cuadro 6.5: Ingreso de los datos obtenidos en los ensayos	89
Cuadro 6.6: Profundidades de socavación máxima, obtenidas mediante la aplicación de las ecuaciones empíricas	89
Cuadro 7.1: Características de los fosos socavados con $Q_{\text{PROPUESTO}} = 56,57$ l/s, en los tres escenarios	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Ubicación del Proyecto Toachi – Pilatón	3
Figura 1.2: Obras complementarias de la presa Toachi.....	4
Figura 2.1: Definición de los símbolos en un salto en esquí	14
Figura 2.2: Definición de la trayectoria del chorro en una dirección	17
Figura 2.3: Trayectoria del chorro según Elevatorski	19
Figura 2.4: Parámetros para determinar la profundidad de socavación	22
Figura 2.5: Esquema general de la ubicación del cuenco de socavación	26
Figura 4.1: Componentes del modelo físico de la presa Toachi.....	42
Figura 7.1: Foso socavado, $Q = 56,51$ l/s, Escenario N°1	91
Figura 7.2: Perfil longitudinal, $Q = 56,51$ l/s, Escenario N°1	91
Figura 7.3: Foso socavado, $Q = 57,02$ l/s, Escenario N°2.....	91
Figura 7.4: Perfil longitudinal, $Q = 57,02$ l/s, Escenario N°2.....	91
Figura 7.5: Foso socavado, $Q = 57,28$ l/s, Escenario N°3.....	91
Figura 7.6: Perfil longitudinal, $Q = 57,28$ l/s, Escenario N°3.....	91

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 4.1: Sistema de tuberías y tanque de abastecimiento.....	43
Fotografía 4.2: Vertedero triangular de aforo	44
Fotografía 4.3: Modelo de la presa Toachi.....	45
Fotografía 4.4: Modelo del embalse	46
Fotografía 4.5: Vista posterior de la presa Toachi.....	47
Fotografía 4.6: Modelo de las estructuras de descarga de la presa Toachi (a). Vertedero de excesos derecho (b).	49
Fotografía 4.7: Zona de salida del modelo de la presa Toachi.....	51
Fotografía 4.8: Vertedero triangular de ingreso en funcionamiento.....	53
Fotografía 4.9: Limnímetros (a). Cinta métrica (b).....	54
Fotografía 4.10: Estación total marca Leica (a). Nivel topográfico marca Wild Heerbrugg Switzerland (b).	55
Fotografía 7.1: Foso socavado, $Q=56,51$ l/s, Escenario N°1.....	91
Fotografía 7.2: Foso socavado, $Q=57,02$ l/s, Escenario N°2.....	91
Fotografía 7.3: Foso socavado, $Q=57,28$ l/s, Escenario N°3.....	91

SIMBOLOGÍA

$r_{\text{mín}}$	radio mínimo.
ρ	densidad del agua.
h_1	profundidad del flujo.
P_T	unidad de carga específica en la solera del esquí.
$h_{\text{mín}}$	altura mínima.
r	radio de la cubeta.
s	pendiente de la rápida.
α	ángulo de salida del chorro.
θ	ángulo de salida del chorro cuando la cuerda del arco (cucharón o esquí) sea horizontal.
t_{ch}	trayectoria del chorro.
x	distancia desde el pie del esquí.
g	aceleración de la gravedad.
V	velocidad de salida del chorro.
z_M	altura máxima del chorro.
H_j	carga de velocidad, $\frac{V^2}{2g}$
x_M	altura máxima del chorro.
α_t	ángulo de trayectoria local.
L_t	distancia horizontal desde el pie del esquí hasta el lugar donde el chorro entra a la superficie del agua.
z_i	altura de impacto.

H_e	máximo nivel del embalse.
h	diferencia entre el máximo nivel en el embalse y el punto más bajo en la cubeta.
Y_s	profundidad del foso.
Y_o	calado en el cuenco.
q	caudal unitario o específico.
H	diferencia entre superficie libre en el embalse y superficie libre en el cuenco amortiguador.
d_m	diámetro medio de material suelto en el cuenco amortiguador.
d_{85}	tamaño de las partículas de las cuales el 85% del material es más fino.
d_{90}	tamaño de las partículas de las cuales el 90% del material es más fino.
z	diferencia entre el nivel del embalse y el labio del esquí.
L_T	distancia horizontal desde el pie del esquí hasta el lugar donde se produce la mayor profundidad del cuenco de socavación.
L_t	distancia horizontal desde el pie del esquí hasta el lugar donde el chorro entra a la superficie del agua.
α'	ángulo de entrada del chorro a la superficie del agua.
w	diferencia entre el nivel del embalse y el labio del esquí.
L_c	longitud del cuenco.
b_o	espesor del chorro de agua.
A_c	ancho del cuenco.
e_L	escala de longitud.
L_P	longitud en prototipo.

L_M	longitud en modelo.
e_v	escala de velocidad.
e_T	escala de tiempo.
e_a	escala de aceleración.
Fr	número de Froude.
L	longitud característica.
e_g	escala de aceleración de la gravedad.
ϕ	diámetro nominal del material pétreo.
γ_s	peso específico del material pétreo.
γ	peso específico del agua.
π	parámetro adimensional.
Q	caudal que ingresa al embalse.
h_v	carga sobre el vértice del vertedero.
ΔQ	error efectivo del caudal.
\bar{Q}	valor medio del caudal.
n	coeficiente adimensional.
Δh_v	error efectivo de la carga sobre el vertedero.
\bar{h}_v	valor medio de la carga sobre el vertedero.

RESUMEN

El proyecto de titulación presenta el análisis realizado en el modelo físico, escala 1:50, de la Presa Toachi y sus obras anexas, para obtener experimentalmente la ubicación, forma, tamaño y profundidad máxima de los fosos de socavación que se conforman en el cuenco de disipación de energía al pie de la presa, como resultado del impacto de los chorros lanzados desde los saltos en esquí que se ubican al final de la rápida de descarga de los vertederos de excesos. La investigación experimental se realiza para tres tamaños representativos de material pétreo que conforman el cuenco amortiguador.

El modelo de la presa Toachi reproduce la descarga de los dos vertederos de excesos que se ubican en su tramo central. Los saltos en esquí disponen de dos deflectores que proyectan los chorros hacia la zona central del cuenco, en donde la inestabilidad de las márgenes obliga a centrar las fosas de socavación alejadas de los contornos laterales.

En el presente estudio se determinan experimentalmente las máximas profundidades de socavación para cada tamaño de material y se los compara con valores calculados con once ecuaciones empíricas que la literatura técnica especializada reporta como las más exitosas.

Los resultados obtenidos permiten identificar criterios de diseño y obtener curvas experimentales de fácil aplicación que definen las características geométricas de las fosas de socavación en función de dos parámetros adimensionales, carga total vs diámetro representativo del material en el cuenco H/ϕ , y, caudal adimensional de descarga, $(Y_s+Y_o)/\phi$ para un amplio rango de variación que incluye las condiciones más frecuentes de operación en este tipo de estructuras.

ABSTRACT

This research shows an analysis of the physical model, at 1:50 scale, of Toachi dam and its related works, to obtain experimentally the positioning, form, size and maximum depth of the scour pits that make up the energy stilling pool at the base of the dam, as a result of the impact of the ski-jump jets situated at the end of the outlet spillways. The experimental investigation is for three representative sizes of rocky materials that make up the stilling basin.

The Toachi Dam model reproduces the discharge from two outlet spillways situated on its middle section. The ski jump is made up of two flip buckets that deflect the stream flows towards the center of the stilling basin, where the inestability of the banks forces to position the scour pits in the center, removed from the lateral edges.

This study determines experimentally the maximum depth of the scour pits for each material size and compares them with the calculated values of eleven empirical equations that specialized technical literature reports as being the most successful.

The obtained results allow to identify design criteria and to obtain experimental curves, easily applied, that define the geometric characteristics of the scour pits based on two dimensionless parameters, total head vs. representative diameter of the material H/ϕ , and, the dimensionless discharge flow, $(Y_s+Y_o)/\phi$ for a wide range of variation that includes the most common operating conditions occurring in these type of structures.

PRESENTACIÓN

Los resultados de la presente investigación experimental demuestran una vez más que la modelación física de fenómenos complejos, como son los procesos de socavación en cuencos de disipación de energía conformados con material suelto, es la única herramienta útil para garantizar el diseño de estas estructuras que son muy importantes para la seguridad del proyecto.

El modelo físico de la presa Toachi opera bajo el criterio de similitud de Froude y el material pétreo utilizado en el cuenco de disipación ha sido representado en forma y tamaño, de acuerdo a la escala geométrica seleccionada. La comparación de los resultados experimentales obtenidos para la ubicación y geometría de los fosos de socavación con el rango ensayado de caudales de operación, así como con los diferentes tamaños de material grueso en el cuenco permiten obtener criterios de diseño válidos, que garantizan el adecuado comportamiento de la estructura durante todo el período de vida útil del proyecto. De manera particular, en el proyecto Toachi Pilatón, la ayuda del análisis experimental, ha permitido optimizar los diseños definitivos y asegurar la disipación de energía protegiendo al mismo tiempo las márgenes laterales del cuenco amortiguador.

En la investigación se determinaron tendencias con respecto a la profundidad de socavación en función del caudal descargado, considerando al mismo tiempo las condiciones de flujo en el tramo de aguas abajo de la presa, impuestas por la geometría particular de las obras de restitución. Se reconoce que la calidad y características de los flujos de recirculación en el cuenco tienen una influencia importante en la conformación y profundidades máximas de las fosas de socavación, obteniéndose finalmente curvas adimensionales que relacionan la profundidad de socavación con la energía disponible, el tamaño del material pétreo y el caudal de descarga.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO TOACHI – PILATÓN ¹

El Proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón se encuentra ubicado al sur-oeste de la ciudad de Quito, muy cerca de la importante vía Quito-Alóag-Santo Domingo de los Tsáchilas-Guayaquil. El proyecto se desarrolla en los límites de las provincias de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y Cotopaxi, en sus cantones Mejía, Santo Domingo y Sigchos, respectivamente, y sus parroquias Manuel Cornejo Astorga, Alluriquín y Palo Quemado. Las poblaciones: La Esperie, Mirabad, Pampas Argentinas, Palo Quemado, Praderas del Toachi, Alluriquín y Unión del Toachi se encuentran en la zona de desarrollo del proyecto.

El Proyecto se desarrolla en las cuencas de los ríos Pilatón y Toachi, que nacen en la cordillera occidental de los Andes y forman parte de la hoya del río Esmeraldas, que desemboca en el Océano Pacífico, en la costa norte del país.

La cuenca superior del río Pilatón, antes de su confluencia con el río Toachi, tiene una longitud de 40 km aproximadamente y un ancho medio de 20 km. El área de drenaje hasta el sitio de captación, en la cota 1099 msnm, es 521 km². La dirección general de la cuenca es Este a Oeste. Está delimitada al Este por la Cordillera Occidental de los Andes, al Sur por una cresta que baja desde el Corazón (4788 m), al Norte por la cresta que baja desde el Atacazo (4750 m), al Oeste el valle se abre hacia la planicie de Santo Domingo de los Tsáchilas.

La cuenca del río Toachi hasta el sitio de la presa (cota 914 msnm), que es inmediatamente aguas abajo de recibir a su río afluente Sarapullo, se extiende sobre una longitud de 85 km y un ancho medio de 20 km, con una superficie de drenaje de 1476 km². La dirección general del valle es Sur a Norte y abarca alturas comprendidas entre 4500 y 910 msnm. La cuenca está flanqueada al Este

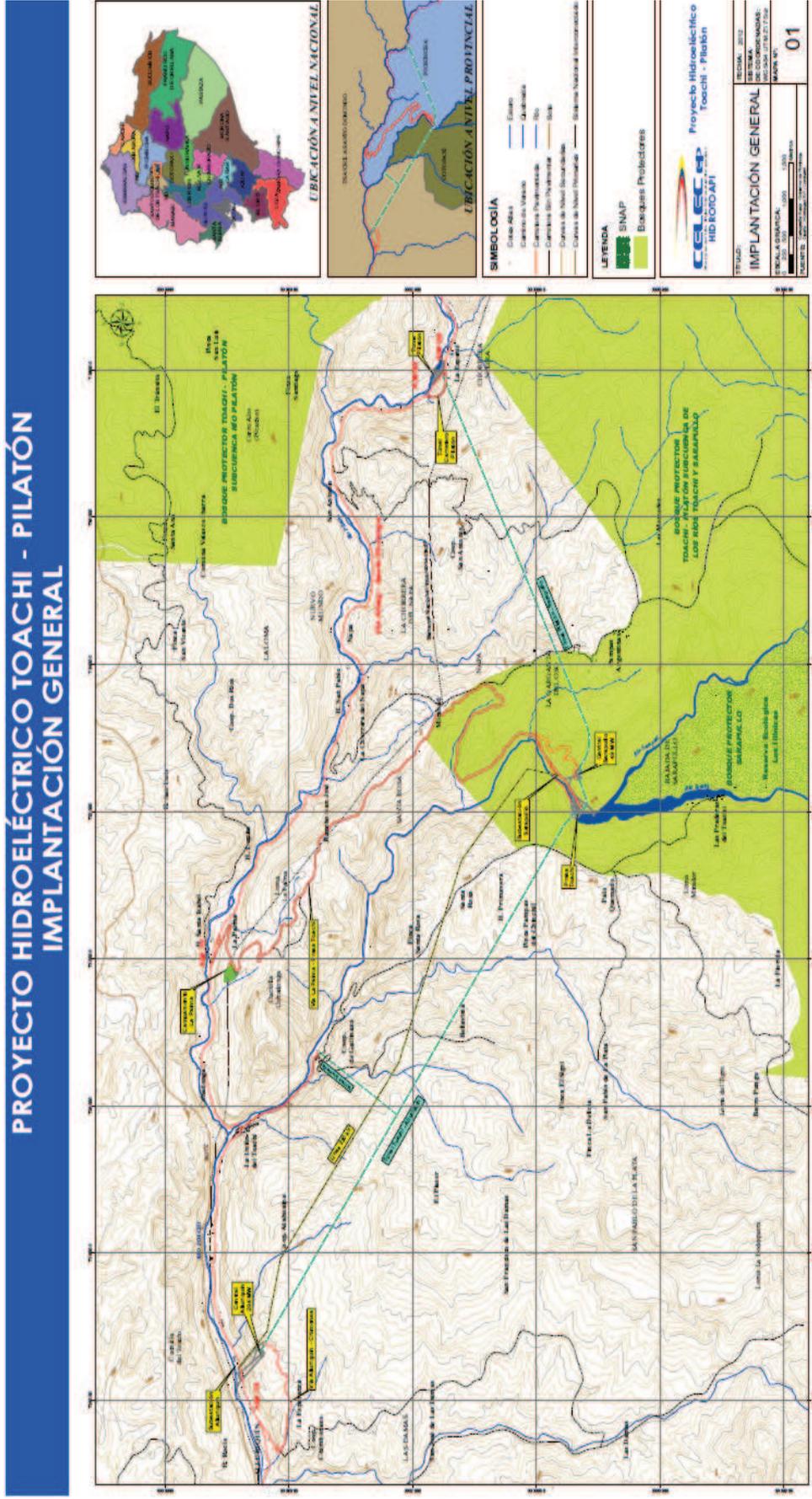
¹ CELEC E.P. HIDROTOAPI, "Documentos de licitación. Información técnica general. Proyecto Hidroeléctrico Toachi- Pilatón". 2010.

por el Corazón y los Ilinizas (5250 m), al Sur por el Era Urcu (4473 m), que forma parte de la cordillera de Angamarca, y al Oeste por la Cordillera de Chugchilán (3663 m). Hacia el Oeste la cuenca se abre sobre el valle del río Pilatón.

El Proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón ha sido considerado como parte del desarrollo energético del país, en razón de sus características energéticas, sus parámetros económicos y por estar ubicado en la vertiente de drenaje del Pacífico.

Como resultado de estos estudios y diseños definitivos, el proyecto comprende dos aprovechamientos en cascada, llamados Pilatón-Sarapullo y Toachi-Alluriquín. La potencia instalada en las tres turbinas Francis de la casa de máquinas de Sarapullo es 49 MW, para un caudal máximo de 40 m³/s y una altura bruta de 135 m; y, la potencia instalada en las tres turbinas Francis de la casa de máquinas de Alluriquín es 204 MW, para un caudal de 100 m³/s y una altura bruta de 232 m. Adicionalmente, se dispondrá de una mini central al pie de la presa del Toachi, de 1,4 MW, que turbinará en forma constante el caudal ecológico de 4,14 m³/s.

Figura 1.1: Ubicación del Proyecto Toachi – Pilatón



Fuente: HIDROTOAPI E.P. “Descripción del proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón”. Quito. 2011.

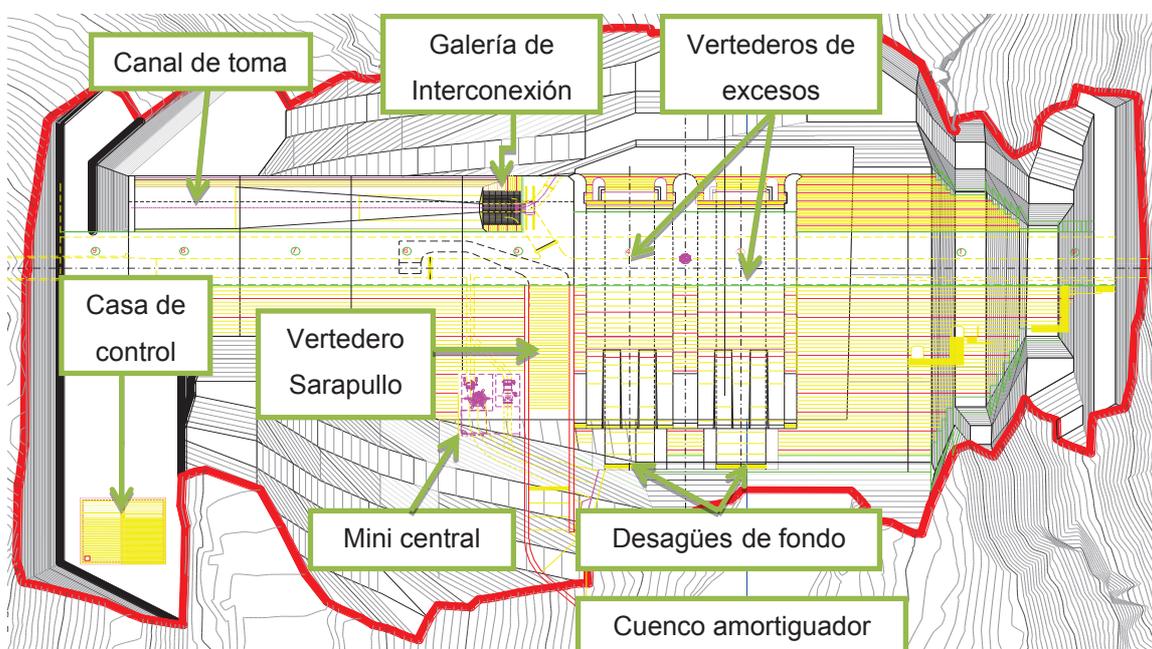
1.1.1 APROVECHAMIENTO TOACHI-ALLURIQUÍN

1.1.2.1 La Presa del Toachi

La presa Toachi, que recoge las aguas de las cuencas de los ríos Toachi y Sarapullo, es de hormigón a gravedad, tiene una altura máxima desde la cota de fundación de 59 m, una longitud de la corona de 170,5 m en la cota 973 msnm y un ancho de 10 m; sus paramentos aguas arriba y aguas abajo son inclinados V:H= 1:0,3 y 1:0,7, respectivamente. La presa crea un embalse de un volumen total de unos 8 Hm³, a la cota máxima de regulación (970 msnm), en su nivel máximo se extiende por 1,3 y 3,2 km en los ríos Sarapullo y Toachi, respectivamente.

Las aguas embalsadas son derivadas por una obra de toma con canal de alimentación ubicado en la margen derecha. Aguas abajo de la toma, las aguas derivadas del embalse Toachi, se unen a los caudales descargados por el aprovechamiento Pilatón-Sarapullo.

Figura 1.2: Obras complementarias de la presa Toachi



Fuente: Hidrotoapi E.P., Lombardi S.A. "Proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón. Diseño actualizado de la presa Toachi y obras anexas. Planta general". Quito. 2012.

1.1.1.1.1 Mini central a pie de presa

La casa de máquinas de la mini central se encuentra ubicada al pie de la presa, turbina el caudal ecológico del río Toachi, $4,14 \text{ m}^3/\text{s}$, en una turbina tipo Francis de eje vertical, utilizando la altura bruta de 42 m que provee el embalse, generando 1,4 MW. Esta mini central está provista de una tubería bypass, dotada de una válvula reductora de energía, que sirve en caso de mantenimiento de la turbina o del generador. El acceso a la mini central se realiza desde la galería inferior de la presa.

1.1.1.1.2 Vertederos de excesos

La presa cuenta con dos vertederos de excesos, cada uno de 14 m de ancho, con cresta a la cota 962,50 msnm. Están controlados por compuertas de clapeta de $B \times H = 14,00 \text{ m} \times 7,50 \text{ m}$, accionadas por servomotores. Las compuertas tienen por objeto controlar el nivel máximo de operación del embalse y cuando estén totalmente abiertas serán parte del perfil de los vertederos, que podrán descargar el caudal de crecidas con período de recurrencia de mil años, de $965 \text{ m}^3/\text{s}$. Para mantenimiento de las compuertas de clapeta, los vertederos tienen guías para bajar compuertas tipo stop log desde la corona de la presa.

En el diseño de la presa, los vertederos se encuentran ubicados en los bloques 3 y 4, sobre los desagües de fondo.

El perfil del azud se diseñó para una carga hidráulica de 7,50 m, de manera que el agua no se desprenda de la superficie de la estructura. La geometría del perfil permite conectar el azud al paramento de aguas abajo de la presa (inclinación $V:H = 1:0,7$).

La rápida de descarga termina con un salto en esquí cuyo labio está situado a la cota 942,25 msnm, el ángulo de salida con respecto a la horizontal es de 20° . Dos deflectores de forma trapezoidal, de 2,42 m de alto y con ancho igual a 3,25 m en la base, están dispuestos en la parte final del salto en esquí. Éstos permiten abrir el flujo en abanico, para facilitar la aireación y disipación de energía. El ángulo de salida de los deflectores en correspondencia a su labio de salida a la cota 944,67 msnm, es igual a 37° .

1.1.1.1.3 Desagües de fondo

La presa cuenta con dos desagües de fondo y se encuentran ubicados en los bloques 3 y 4. Están controlados por compuertas radiales de $B \times H = 8,00 \text{ m} \times 8,00 \text{ m}$, accionadas por servomotores. La cresta de los desagües se encuentra a la cota 927,00 msnm. El caudal de diseño para operación individual es de 1600 m³/s cuando el embalse está en la cota 970 msnm.

La descarga de los vertederos se efectúa por medio de saltos de esquí, cuyo labio se encuentra a la cota 923,02 msnm para lanzar los chorros al estanque de disipación de energía aguas abajo de la presa.

Para mantenimiento de las compuertas, delante de ellas se ha previsto guías para bajar compuertas tipo stop log desde la corona de la presa.

1.1.1.1.4 Cuenco amortiguador

Se encuentra delante de los desagües de fondo y vertederos de excesos, es decir, aguas abajo de la presa, en una extensión de 10 m se protegerá a la presa por medio de enrocado de escollera con grandes piedras unidas con hormigón. El cuenco disipador de energía es de aproximadamente 70 m de ancho y 65 m de longitud, conformado por medio de excavaciones laterales en las dos márgenes del río y por la construcción de un dique de escollera hormigonado, que tiene una abertura que descargará los caudales al canal de transición de unos 80 m de longitud hasta su unión con el río.

1.1.1.1.5 Galería de interconexión entre los dos aprovechamientos

La galería conecta el túnel de presión Toachi-Alluriquín y el túnel de descarga de la casa de máquinas Sarapullo, alimentando directamente a la casa de máquinas de Alluriquín con las aguas limpias turbinadas en Sarapullo, evitando así su descarga al embalse. Las dimensiones de la galería son: $B \times H = 3,50 \text{ m} \times 5,60 \text{ m}$, está conformada dentro de los bloques de hormigón de la presa y la atraviesa longitudinalmente.

1.1.1.1.6 Casa de control

Se encuentra ubicada en la plataforma formada al nivel de la corona de la presa. Allí se dispondrá de todos los sistemas de control de los equipos de la presa.

1.1.2.2 Obras de conducción

1.1.1.3.1 Túnel de presión

Inicia en la cota 952 msnm, al final de la galería de interconexión de los dos aprovechamientos que atraviesa la presa. Si el túnel es excavado por el método convencional será de sección interna circular, de 5,60 m de diámetro, revestido con hormigón, de 0,30 m de espesor. En caso de ser excavado con TBM (Tunnel Boring Machine), el diámetro interno será de 6,0 m y el diámetro de excavación 6,70 m e irá revestido con dovelas de hormigón empacadas con gravilla contra la roca y luego con inyecciones de cemento. La longitud del túnel es de 8,65 Km hasta el inicio del blindaje de acero de la tubería de presión, con la cota 779,50 msnm.

1.1.1.3.2 Chimenea de equilibrio superior

La chimenea de equilibrio superior está ubicada 38 m aguas abajo del inicio de la tubería de presión. Está compuesta por un pozo vertical inferior (garganta) con un diámetro interior útil de 3,50 m hasta la cota 905 msnm; y, a partir de éste, el pozo principal de la chimenea es de 15 m de diámetro, hasta el nivel 1014 msnm, en donde sale a la superficie y está protegida por una cubierta de hormigón. Toda la chimenea será revestida de hormigón, la garganta con 0,35 m y el pozo principal con 0,55 m.

1.1.1.3.3 Tubería de presión

El ramal principal tiene una longitud de 187 m hasta el inicio de los ramales distribuidores y un diámetro interno de 4,70 m. Será blindada con acero, embebida en el revestimiento de hormigón de 0,60 m de espesor. El tramo de 20 m de la conexión de la tubería con el pozo de la chimenea de equilibrio, será blindado.

1.1.1.3.4 Ramales distribuidores

Los tres ramales distribuidores de acero son de 2,70 m de diámetro interno, de 23 m, 20 m y 30 m de longitud hasta la primera, segunda y tercera turbina, respectivamente, en cuyo tramo final se reducen a 2,60 m para su unión con las válvulas de guardia tipo mariposa. El tramo que alimenta a las dos últimas turbinas es de 3,85 m de diámetro y 16 m de longitud.

1.1.2.4 Casa de máquinas de Alluriquín

La casa de máquinas es subterránea, con dimensiones L x B x H = 66 m x 24 m x 45 m. Tiene tres turbinas Francis, con potencia nominal por unidad de 68 MW, para una caída neta de 231 m y caudal de diseño de 33,33 m³/s. Su velocidad de rotación será de 300 rpm; la cota del eje de las turbinas es 732 msnm y la contra carga está dada por la cota de restitución al río 738 msnm. De igual manera se tienen tres generadores, cada uno con capacidad 80 MVA, con factor de potencia 0,85, voltaje de generación 13,8 KV y frecuencia 60 Hz, tres transformadores, tres válvulas de guardia y un puente grúa.

1.1.2.5 Obras de descarga

1.1.1.7.1 Chimenea de equilibrio inferior

Tiene una cámara inferior sección tipo baúl de área útil L x B x H = 41 m x 10 m x 36 m, con la solera a la cota 722,40 msnm.

1.1.1.7.2 Túnel y estructura de descarga

El túnel es de sección circular, de diámetro interno 5,60 m, y 504 m de longitud, revestido de hormigón hasta empatar con la estructura de descarga. Sus cotas inicial y final son 722 y 732 msnm.

La estructura de descarga está constituida por una transición de 26 m de longitud entre el túnel y el azud-vertedero de 21 m de ancho, cuya cresta se encuentra a la cota 736 msnm y permitirá la restitución de los caudales turbinados al río Toachi.

1.1.2.8 Subestación Alluriquín

La subestación es exterior y está ubicada entre el carretero y el río. Es del tipo SF6 y permitirá la conexión del Proyecto con las líneas del sistema nacional Interconectado.

1.2 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL E INFORMACIÓN DE BASE

El estudio experimental en modelo físico de la presa Toachi se ha desarrollado en cuatro fases de investigación.

En la Fase I se construyó el modelo físico en las instalaciones del Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI) de la Escuela Politécnica Nacional, de acuerdo a la información técnica entregada por HIDROTOAPI-EP. En esta fase se realizaron análisis experimentales del funcionamiento hidráulico de los vertederos de excesos, desagües de fondo, vertedero Sarapullo y clapetas de los vertederos de excesos, además se evaluó la forma y alcance de los chorros impulsados por el salto en esquí de los vertederos de excesos, y desagües de fondo con lo que se pudo definir que las dimensiones del cuenco de disipación del diseño original, tanto en ancho como en longitud no son suficientes para recibir a los chorros.²

En la Fase II se realizó un análisis del funcionamiento hidráulico de los vertederos de excesos y de los desagües de fondo mediante la medición de presiones a lo largo de los respectivos ejes longitudinales de estas estructuras, además, acogiendo las recomendaciones dadas en la Fase I, se realizó la modificación del cuenco de disipación de energía, teniendo como resultado que la longitud de la estructura de disipación de energía, al pie de la presa Toachi, no es suficiente, y según los alcances registrados se recomienda incrementar la longitud del cuenco al menos 30 m para evitar el impacto de los chorros sobre el umbral.³

² Escuela Politécnica Nacional, HIDROTOAPI E.P. *“Estudio en modelo hidráulico. Presa Toachi y sus obras complementarias. Informe Técnico Fase I”*. Quito. 2011.

³ Escuela Politécnica Nacional, HIDROTOAPI E.P. *“Estudio en modelo hidráulico. Presa Toachi y sus obras complementarias. Informe Técnico Fase II”*. Quito. 2012.

El estudio experimental de la Fase III evaluó la operación de los saltos en esquí de los vertederos de excesos de la presa Toachi con las modificaciones geométricas de sus deflectores, entregadas a la EPN por CELEC E.P. HIDROTOAPI. Se pudo determinar en la investigación que las modificaciones geométricas introducidas en el salto en esquí (estrechamiento y deflectores de diferente altura) no conducen a la orientación deseada de los chorros de salida, al pie de la Presa Toachi. La zona de impacto de los chorros se mantiene junto a las márgenes del cuenco de disipación de energía; originando que la amenaza de inestabilidad de las paredes del cuenco y de los taludes en esta zona, por socavación del pie, sea importante. De este modo, la geometría de los saltos en esquí y los correspondientes deflectores fue revisada, tomando en consideración la necesidad ya mencionada en los informes de las investigaciones anteriores, de desplazar los vertederos de excesos hacia el eje central del cuenco de disipación de energía al pie de la presa.⁴

Tomando en cuenta las recomendaciones realizadas en la Fase III, CELEC E.P. HIDROTOAPI realizó modificaciones al diseño, y lo envió a la EPN para la correspondiente verificación en modelo físico. La Fase IV tuvo como principales objetivos verificar el funcionamiento hidráulico de los vertederos de excesos con su nueva ubicación en la parte central de la Presa Toachi, de los desagües de fondo y del flujo tipo rasante (“skimming flow”) sobre el vertedero de cimacio escalonado, para la descarga de las aguas turbinadas de la central Sarapullo. El estudio experimental evaluó la dirección, forma y alcance de los chorros de la descarga de los vertederos de excesos y desagües de fondo de la presa, con lo que se pudo determinar que dadas las características geométricas, tanto de los saltos en esquí y deflectores de los vertederos de excesos, como de los saltos en esquí de los desagües de fondo, examinados en el modelo, la trayectoria de los chorros de salida se desarrolla hacia la zona central del cuenco, por lo que la fosa

⁴ Escuela Politécnica Nacional, HIDROTOAPI E.P. “Modelo hidráulico de la presa Toachi. Análisis experimental de la modificación en los deflectores del salto en esquí. Informe técnico No. 1”. Quito. 2012.

de socavación no tiene incidencia negativa sobre los taludes o márgenes del cuenco.⁵

1.3 PLAN DE OPERACIÓN DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS Y DEL CUENCO PREECAVADO COMO ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA

El máximo nivel de operación del embalse se ubica en la cota 970 msnm, se operan dos compuertas, una para cada vertedero de excesos, con el propósito de mantener este nivel. El momento en que el nivel del embalse llega al máximo, se retiran las compuertas y se inicia la descarga hacia el cuenco amortiguador, ubicado aguas abajo de los vertederos de excesos y desagües de fondo, al pie de la presa.

El cuenco amortiguador está compuesto de material suelto (no cohesivo), el estudio experimental se hace con tres diferentes tamaños de material, aguas abajo se tiene un umbral y una transición para la restitución de las aguas hacia el río Toachi.

1.4 OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN DEL MODELO

Evaluar el desarrollo (forma, tamaño y profundidad máxima) de los cuencos de socavación como resultado del impacto de los chorros provenientes de los vertederos de descarga de la presa Toachi.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN DEL MODELO

- Revisar y realizar el análisis crítico de las relaciones empíricas utilizadas y existentes para evaluar la forma y la profundidad máxima potencial en el cuenco de disipación de energía al pie de la presa Toachi, en particular, de aquellas que consideran el tamaño y la calidad del material de protección.

⁵ Escuela Politécnica Nacional, HIDROTOAPI E.P. “*Estudio experimental en modelo hidráulico. Escala 1:50. Verificación experimental del diseño definitivo de la presa Toachi y obras complementarias. Informe Técnico Fase IV*”. Quito. 2013.

- Analizar los resultados experimentales sobre el desarrollo del cuenco socavado en el modelo, mediante la comparación de los resultados para tres tamaños del material de protección.
- Comparar las relaciones empíricas correspondientes, que incluyan el efecto del tamaño del material de protección.
- Formular recomendaciones sobre la técnica de la modelación física de cuencos de socavación.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO FÍSICO Y ANÁLISIS TEÓRICO SOBRE EL PROCESO DE SOCAVACIÓN DE UN CUENCO AL PIE DE UN CHORRO

2.1 ANÁLISIS TEÓRICO BÁSICO SOBRE EL CHORRO DE SALIDA DESDE EL SALTO EN EL ESQUÍ

Los saltos en esquí son elementos muy importantes en una presa, debido a que éstas son las estructuras que funcionando con descarga libre tienen como principal función el lanzamiento del chorro hacia aguas abajo. Existe íntima relación entre el salto en esquí y su correspondiente foso socavado, dado que la ubicación y dimensiones del cuenco pueden hacer fallar desde el punto de vista estructural a la presa. Por esta razón el correcto pronóstico del foso socavado y su incidencia en la estabilidad de la presa, corresponden el aspecto esencial del diseño hidráulico del salto en esquí.⁶

El salto en esquí es el elemento que desvía el flujo del vertedero de su dirección original y arroja el agua hacia el aire. La forma longitudinal de un esquí es normalmente un arco circular y su radio se encuentra entre 10 y 20 m. Si el radio es muy pequeño se formará demasiada turbulencia que puede ocasionar vibraciones y en ocasiones fallas en la estructura. La forma de un salto en esquí es normalmente optimizada en pruebas realizadas en modelos físicos. El tamaño del labio del esquí debe ser suficiente para lanzar al chorro lejos de la estructura. La elevación del labio del esquí en ningún caso debe estar bajo el nivel del cuenco amortiguador, debido a que puede ingresar material sólido y causar abrasión.⁷

⁶ Pardo-Gómez, R. (2008). "Método propuesto para el diseño hidráulico de trampolines empleados como disipadores de energía en aliviaderos para presas, considerando la ocurrencia del cono de socavación al pie del mismo". Ingeniería hidráulica en México: Volúmen XXIII, pp. 111-121.

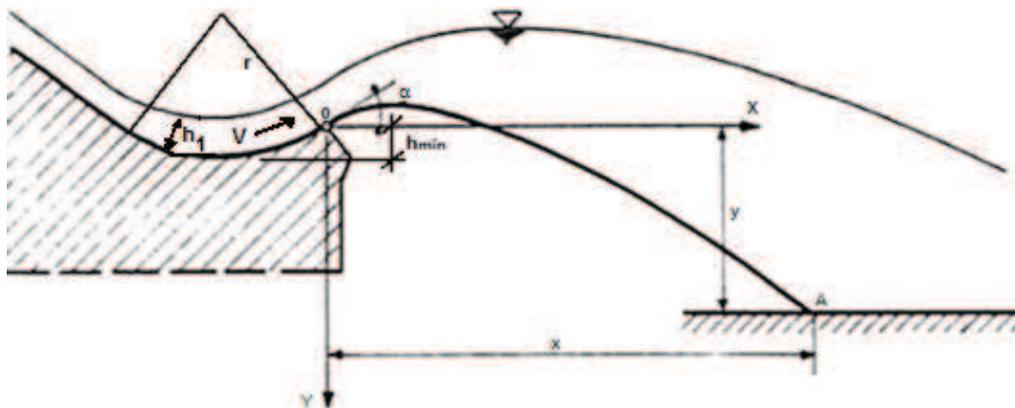
⁷ Vischer, D., Hager, W. "Energy Dissipators". 1995. I.A.H.R.

2.1.1 PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DEL SALTO EN ESQUÍ

Para el diseño hidráulico del salto en esquí se requiere la determinación del radio de curvatura (r), la altura mínima del labio ($h_{\text{mín}}$) y el ángulo de salida de la trayectoria (α).

Los parámetros son establecidos como función de la distancia X , que se elige de modo que no se produzca socavación al pie de la presa. Cuando se determina X , se obtiene el valor de Y , con el ángulo α , o viceversa. El diseñador generalmente escoge Y en función de la topografía y geología, y en consecuencia calcula el valor del ángulo α . Cuando el valor del ángulo α es conocido, el centro puede ser determinado y el radio de la cubeta, r , puede ser calculado.

Figura 2.1: Definición de los símbolos en un salto en esquí



Fuente: Şentürk, F. "Hydraulics of Dams and Reservoirs". 1994.

A continuación se nombra los principales parámetros necesarios para el diseño del salto en esquí.

- **Radio mínimo:** Es el mínimo radio de curvatura que puede tener el esquí, para que posteriormente el chorro despegue hacia arriba.

$$r_{\text{mín}} = \frac{\rho V_1^2 d_1}{P_T - \gamma d_1} \quad (2.1)$$

Donde:

$r_{\text{mín}}$ = Radio mínimo [m]

ρ = Densidad del agua [kgf/m³]

V = Velocidad del flujo [m/s]

h_1 = Profundidad del flujo [m]

P_T = Unidad de carga específica en la solera del esquí [kg/m²]

γ = Peso específico del agua [kg/m³]

- **Altura mínima:** Para tener un correcto flujo, la altura del esquí debe ser lo suficiente como para alejar al chorro de la estructura.

$$h_{\text{mín}} = r - r \cos (\theta - \tan^{-1} s) \quad (2.2)$$

Donde:

$h_{\text{mín}}$ = Altura mínima [m]

r = Radio de la cubeta [m]

s = Pendiente de la rápida [m/m]

$\theta = \alpha$; cuando la cuerda del arco (cucharón o esquí) sea horizontal [°]

- **Ángulo de trayectoria:** Es el ángulo que forma la salida del esquí con respecto a la horizontal. Es un factor importante para determinar la longitud de la trayectoria del chorro.

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{h_1(2r-h_1)}}{r-h_1} \right] \quad (2.3)$$

Donde:

α = Ángulo de trayectoria o de salida del chorro[°]

h_1 = Profundidad del flujo [m]

r = Radio de la cubeta [m]

Los parámetros r , h_{\min} y θ están estrechamente relacionados, de tal manera que se los puede reajustar para obtener un diseño satisfactorio.⁸

2.1.2 DESARROLLO DEL FLUJO DE SALIDA DESDE EL SALTO EN ESQUÍ (AIREACIÓN, RESISTENCIA DEL AIRE)

El flujo de aproximación que baja por el perfil del vertedero es lanzado por el cucharón del esquí, entrando en contacto directo con el aire, produciéndose la aireación del chorro y posterior caída al cuenco preexcavado. La formación de chorros desintegrados de agua es necesaria para la disipación de energía.⁹

Si la desintegración del chorro es muy grande, la disipación de energía puede ser significativa. Esta disipación se debe a la transformación del medio de agua, en una nube con gotas de agua en el aire, éstas gotas se ven afectadas por la resistencia del aire, especialmente si son pequeñas y se mueven con una velocidad alta en relación al aire que esta alrededor.¹⁰

2.1.3 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS: ALCANCE Y ALTURA MÁXIMA DEL CHORRO

La consideración más importante en el diseño de saltos en esquí, es la de determinar que tan lejos puede ser lanzado el chorro aguas abajo de la estructura. Teóricamente si se desprecia la fricción o resistencia del aire, la trayectoria puede ser determinada por las ecuaciones de trayectoria de un proyectil, aproximadamente como una parábola convencional.¹¹

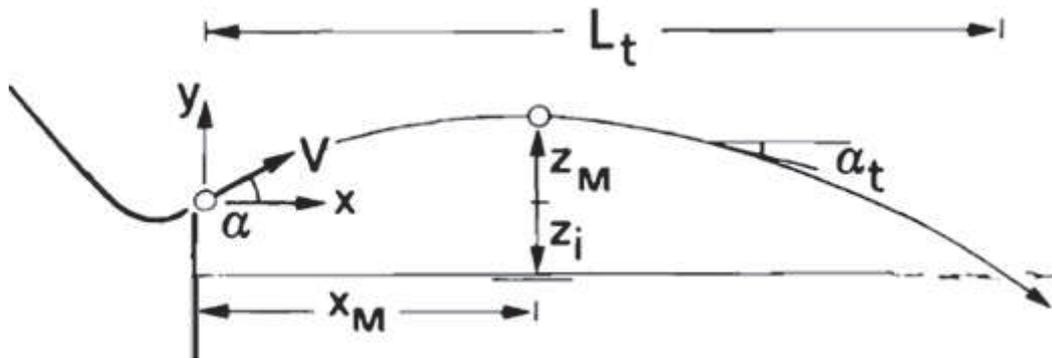
⁸ Whittaker, J, Schleiss, A. “*Scour Related to Energy Dissipators for Head Structures*”. 1984.

⁹ Vischer, D., Hager, W. “*Dam Hydraulics*”. 1998.

¹⁰ Velasco, C., Vera, P. “*Estudio en modelo físico de la disipación de energía aguas debajo de los vertederos de excesos y desagües de fondo de la Presa Toachi Proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón*”. Quito. 2012. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. EPN.

¹¹ Vischer, D., Hager, W. “*Dam Hydraulics*”. 1998.

Figura 2.2: Definición de la trayectoria del chorro en una dirección



Fuente: Vischer, D., Hager, W. "Dam Hydraulics". 1998.

A continuación se mencionan las ecuaciones para calcular los principales parámetros para la determinación de la trayectoria del chorro:

- **Trayectoria del chorro:**

$$t_{ch} = x \tan \alpha - x^2 \frac{g}{2V^2 \cos^2 \alpha} \quad (2.4)$$

Donde:

t_{ch} = Trayectoria del chorro [m]

α = Ángulo de salida del chorro [°]

x = Distancia desde el pie del esquí [m]

g = Aceleración de la gravedad [m/s^2]

V = Velocidad de salida del chorro [m/s]

- **Altura máxima del chorro:**

$$\frac{z_M}{H_j} = \sin^2 \alpha \quad (2.5)$$

Donde:

z_M = Altura máxima del chorro [m]

α = Ángulo de salida del chorro [°]

$H_j =$ Carga de velocidad, $\frac{V^2}{2g}$ [m]

- **Posición del chorro:**

$$\frac{x_M}{H_j} = 2 \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha \quad (2.6)$$

Donde:

$x_M =$ Altura máxima del chorro [m]

$\alpha =$ Ángulo de salida del chorro [°]

$H_j =$ Carga de velocidad, $\frac{V^2}{2g}$ [m]

- **El ángulo de trayectoria local:**

$$\tan \alpha_t = \tan \alpha - \frac{\frac{x}{H_j}}{2 \cos^2 \alpha} \quad (2.7)$$

Donde:

$\alpha_t =$ Ángulo de trayectoria local [°]

$\alpha =$ Ángulo de salida del chorro [°]

$x =$ Distancia desde el pie del esquí [m]

$H_j =$ Carga de velocidad, $\frac{V^2}{2g}$ [m]

- **Longitud de la trayectoria:**

$$\frac{L_t}{H_j} = 2 \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha \left[1 + \sqrt{1 + \frac{z_i}{H_j \operatorname{sen}^2 \alpha}} \right] \quad (2.8)$$

Donde,

$L_t =$ Distancia horizontal desde el pie del esquí hasta el lugar donde el chorro entra a la superficie del agua [m]

α = Ángulo de salida del chorro [°]

z_i = Altura de impacto [m]

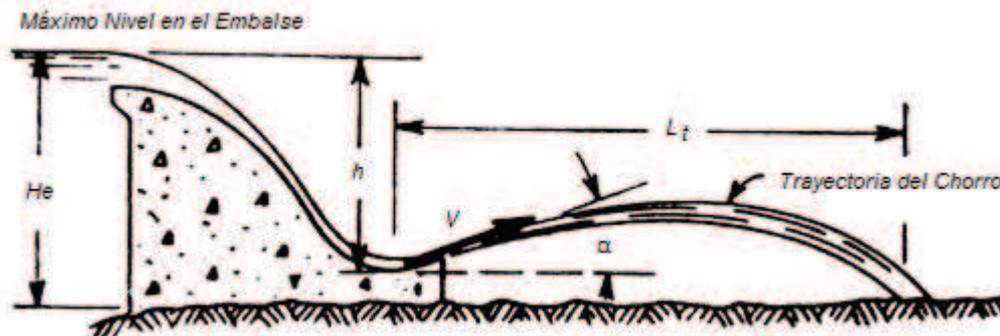
H_j = Carga de velocidad, $\frac{V^2}{2g}$ [m]

2.1.3.1 TRAYECTORIA DEL CHORRO SEGÚN ELEVATORSKI¹²

En base a diversos estudios experimentales realizados en modelos hidráulicos y en prototipo, se han deducido algunas fórmulas para encontrar el alcance del chorro lanzado por el esquí, una de las más interesantes es la propuesta por Elevatorski.

La alta velocidad del flujo de salida proveniente del cucharón del esquí formará un chorro que se dispersará en el aire. La consideración más importante que se toma en el diseño del salto en esquí es la determinación del alcance del chorro lanzado aguas abajo de la estructura.

Figura 2.3: Trayectoria del chorro según Elevatorski



Fuente: Elevatorski, E. "Hydraulic Energy Dissipators". 1959

Estudios realizados demuestran que aproximadamente entre el 19 y 20 % de la energía es disipada por la interacción del chorro con el aire. Para compensar la reducción de velocidad y la pérdida de energía del chorro durante su vuelo, Elevatorski propone la siguiente ecuación:

$$\frac{L_t}{H_e} = 1.9 \frac{h}{H_e} \text{ sen } (2\alpha) \quad (2.9)$$

¹² Elevatorski, E. "Hydraulic Energy Dissipators". 1959

Donde,

L_t = Longitud de la trayectoria [m]

H_e =Máximo nivel del embalse [m]

h = Diferencia entre el máximo nivel en el embalse y el punto más bajo en la cubeta [m]

α = Ángulo de salida del chorro [°]

2.2 DESARROLLO, PROFUNDIDAD Y UBICACIÓN DEL CUENCO SOCAVADO AL PIE DE LA PRESA¹³

La socavación es un proceso extremadamente complejo, debido a la influencia de diversos factores hidráulicos, hidrológicos y geológicos; está principalmente relacionada con la calidad del material presente en la zona de impacto del chorro. Si el área en la que impacta el chorro tiene un comportamiento diferente a lo asumido en el diseño, la presa entera puede sufrir daños.

La mayoría de las fórmulas propuestas para la predicción de la profundidad máxima de socavación aguas abajo de las estructuras hidráulicas son empíricas. El desarrollo de la socavación puede ser estudiado en modelo físico. La modelación física es la principal herramienta para el estudio de los fenómenos existentes en las estructuras hidráulicas.

2.2.1 DESARROLLO DEL CUENCO SOCAVADO¹⁴

El chorro no impacta con el lecho rocoso cuando el calado en el cuenco amortiguador es mayor que la profundidad máxima a la que llega el chorro o profundidad de disturbio del chorro, por lo tanto el lecho del cuenco no se ve afectado. Si el nivel en el cuenco amortiguador es menor que la profundidad de

¹³ Alias, N., Mohamed, T., Ghazali, A., Mohd, M. (2008). *“Impact of Takeoff Angle of Bucket Type Energy Dissipater on Scour Hole”*. American Journal of Applied Sciences: pp. 117-121.

¹⁴ Pan, G., Tian, C. (1988). *“Research on the free jet ultimate scour below dams”*. The International Symposium on Hydraulics for High Dams: pp. 239-245.

disturbio del chorro, los materiales del lecho son excavados por el chorro sumergido.

El impacto del chorro proveniente del esquí en el cuenco amortiguador da lugar a la formación de un foso, el material granular se acumula aguas abajo del foso formando una montaña de pendiente muy pronunciada, que posteriormente fallará produciendo el colapso de las partículas, éstas se acumularán en la montaña y colapsarán de nuevo, este es el llamado proceso de socavación. Si ninguna de las partículas es llevada hacia la parte superior de la acumulación de los materiales del foso, la profundidad de socavación no aumentará, llegando a un estado de equilibrio cinético.

2.2.2 PROFUNDIDAD MÁXIMA DEL CUENCO SOCAVADO

Existen muchos factores que influyen en la profundidad de socavación. Éstos se dividen en dos tipos:

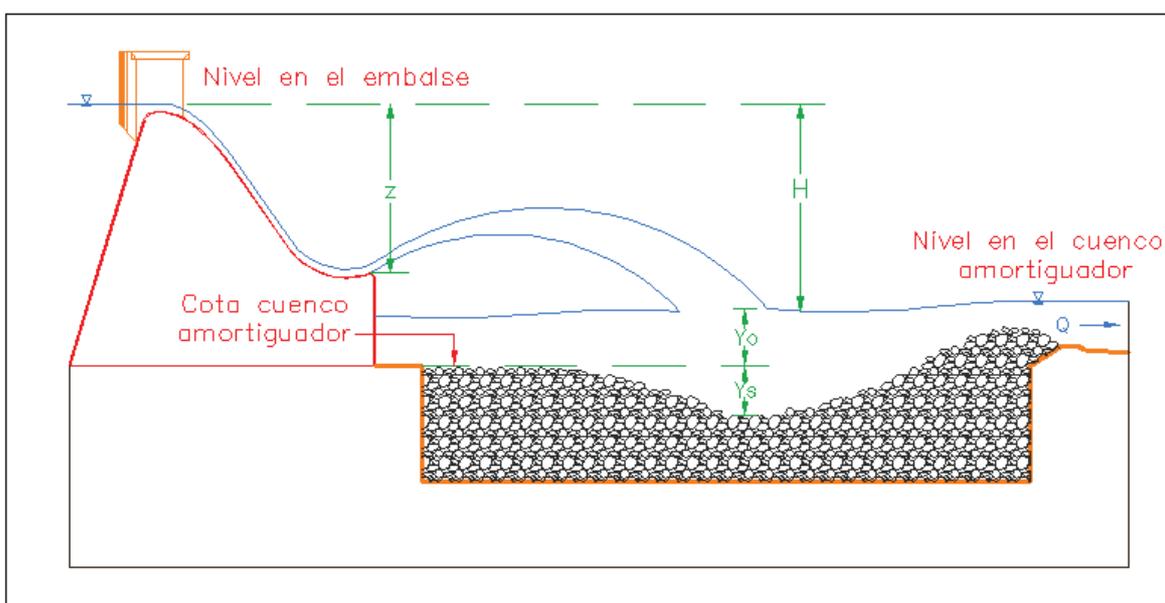
- Factores activos: Caudal, diferencia entre el nivel máximo en el embalse y en el cuenco amortiguador, velocidad del chorro en el punto de incidencia del chorro, ángulo de salida del chorro, aireación del chorro, etc.
- Factores pasivos: Resistencia a la socavación del lecho rocoso, calado en el cuenco amortiguador, etc.

La resistencia del lecho rocoso es el factor más difícil de determinar, usualmente se la establece a partir de las características de las partículas del lecho. Es así que se puede determinar una profundidad de socavación de equilibrio para un tamaño de partícula dado, mediante la experimentación o fórmulas empíricas. En prototipos, la resistencia del lecho rocoso cambiará durante el proceso de socavación a largo plazo, debido a que en la parte más baja del foso, el chorro sumergido todavía tiene energía para afectar la roca, es decir, el tamaño de las partículas en el punto más bajo disminuirá progresivamente. Por lo tanto, las profundidades de socavación de equilibrio final, para diferentes resistencias de lecho rocoso, bajo un proceso de socavación a largo plazo e iguales características hidráulicas, son las mismas, la única diferencia es que el tiempo para conseguir esta profundidad no será igual. La profundidad de socavación para

un tamaño de material pétreo dado, únicamente indica una etapa en todo el proceso de socavación. La profundidad de disturbio del chorro es la última profundidad de socavación. (Pan, G., Tian, C. 1988: 239)

Diversos investigadores han determinado ecuaciones para el cálculo de la profundidad máxima de socavación, dichas ecuaciones dan como resultado la profundidad desde el nivel en el cuenco amortiguador hasta el punto más bajo en el foso ($Y_o + Y_s$). Las fórmulas más conocidas para el cálculo de esta profundidad son las siguientes:

Figura 2.4: Parámetros para determinar la profundidad de socavación



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

- **Veronese A (1937):** Veronese da un estimado de la erosión medida desde la superficie del agua en el cuenco amortiguador hasta el fondo del foso socavado.¹⁵

$$Y_s + Y_o = 1,90 q^{0,54} H^{0,225} \quad (2.10)$$

¹⁵ Alias, N., Mohamed, T., Ghazali, A., Mohd, M. (2008). "Impact of Takeoff Angle of Bucket Type Energy Dissipater on Scour Hole". American Journal of Applied Sciences: pp. 117-121.

Donde,

Y_s = Profundidad del foso [m]

Y_o = Calado en el cuenco [m]

q = Caudal unitario [$m^3/s/m$]

H = Diferencia entre superficie libre en el embalse y superficie libre en el cuenco amortiguador [m]

- **Veronese B (1937):** En esta segunda ecuación Veronese toma en cuenta el diámetro medio del material.¹⁶

$$Y_s + Y_o = 0,202 \frac{q^{0,54} H^{0,225}}{d_m^{0,42}} \quad (2.11)$$

Donde,

d_m = Diámetro medio de material suelto en el cuenco amortiguador [m]

- **Mason y Arumugam A (1985):**

Las ecuaciones de Mason y Arumugam incluyen el diámetro del material, este factor representa la variación de las propiedades de los materiales del lecho del cuenco amortiguador. (Alias, N., Mohamed, T., Ghazali, A., Mohd, M. 2008).

$$Y_s + Y_o = 3,27 \frac{q^{0,60} H^{0,05} Y_o^{0,15}}{g^{0,30} d_m^{0,10}} \quad (2.12)$$

Donde,

g = Aceleración de la gravedad [m/s^2]

- **Mason y Arumugam B (1985):**

Las ecuaciones están basadas en diversos estudios realizados, tanto en modelo físico, como en prototipo. (Alias, N., Mohamed, T., Ghazali, A., Mohd, M. 2008).

¹⁶ Bormann, N., Julien, P. (1991). "Scour Downstream of Grade-Control Structures". Journal of Hydraulic Engineering: Vol. 117, No. 5, pp 579-594.

$$Y_s + Y_o = 22,88 q^{0,60} H^{0,50} d_{90}^{0,40} \quad (2.13)$$

Donde,

d_{90} = Tamaño de las partículas de las cuales el 90% del material es más fino [m]

- **Martins (1973):** Martin propone la siguiente ecuación para el cálculo de la profundidad del foso socavado aguas abajo del salto en esquí, basado en observaciones realizadas en prototipo. (Alias, N., Mohamed, T., Ghazali, A., Mohd, M. 2008).

$$Y_s + Y_o = 1,50 q^{0,60} z^{0,10} \quad (2.14)$$

Donde,

z = Diferencia entre el nivel del embalse y el labio del esquí [m]

- **Damle (1966):** Damle recopiló datos de modelos físicos y prototipos de presas con salto en esquí de la India. (Alias, N., Mohamed, T., Ghazali, A., Mohd, M. 2008). Damle obtuvo la siguiente relación:

$$Y_s + Y_o = 0,55 q^{0,50} H^{0,50} \quad (2.15)$$

- **Chian Min Wu (1973):** En base a estudios hechos en prototipo, Chain propone la siguiente ecuación. (Alias, N., Mohamed, T., Ghazali, A., Mohd, M. 2008).

$$Y_s + Y_o = 1,18 q^{0,51} H^{0,235} \quad (2.16)$$

- **Schoklitsch (1932):** Schoklitsch propone la siguiente ecuación para el cálculo de la profundidad de socavación:¹⁷

$$Y_s + Y_o = 0,521 \frac{q^{0,57} H^{0,20}}{d_{90}^{0,32}} \quad (2.17)$$

- **Zimmerman y Maniak (1967):** Zimmerman y Maniak proponen la siguiente ecuación para el cálculo de la socavación: (Pemberton, E., Lara, J. 1984)

¹⁷ Pemberton, E., Lara, J. "Computing Degradation and Local Scour". 1984.

$$Y_s + Y_o = 0,59 \frac{q^{0,20} Y_o^{0,93}}{d_{85}^{0,23}} \quad (2.18)$$

Donde,

d_{85} = Tamaño de las partículas de las cuales el 85% del material es más fino [m]

- **Machado (1980):** Machado considera principios teóricos, estudiados en modelos físicos y prototipo:¹⁸

$$Y_s + Y_o = 1,35 \frac{q^{0,50} H^{0,3145}}{d_{90}^{0,0645}} \quad (2.19)$$

- **Chee y Padiyar (1969):** Chee y Padiyar desarrollaron la siguiente ecuación para el cálculo de la profundidad del foso socavado: (López R., Álvarez, J. 2005)

$$Y_s + Y_o = 2,13 \frac{q^{0,67} H^{0,18}}{d_m^{0,063}} \quad (2.20)$$

En el caso de material casi uniforme o con poca dispersión en los tamaños de sus partículas, se ha considerado que un valor central, como la media (d_m) o la mediana (d_{50}), es suficiente para definir la granulometría o tamaño representativo de estos materiales.¹⁹

2.2.3 UBICACIÓN DEL CUENCO DE SOCAVACIÓN²⁰

La ubicación del cuenco o cono de socavación, es decir, la posición donde se produce la mayor profundidad del mismo, viene dada por la siguiente expresión:

$$L_T = L_t + \frac{Y_o + Y_s}{\tan \alpha'} \quad (2.21)$$

¹⁸ López R., Álvarez, J. (2005) "Erosión local aguas debajo de diques para el control de torrentes: Metodología de cálculo". Universidad de Lleida. Foresta: pp. 68-77.

¹⁹ http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_132_183_85_1201.pdf

²⁰ Pardo-Gómez, R. (2008). "Método propuesto para el diseño hidráulico de trampolines empleados como disipadores de energía en aliviaderos para presas, considerando la ocurrencia del cono de socavación al pie del mismo". Ingeniería hidráulica en México: Volúmen XXIII. Pp. 111-121.

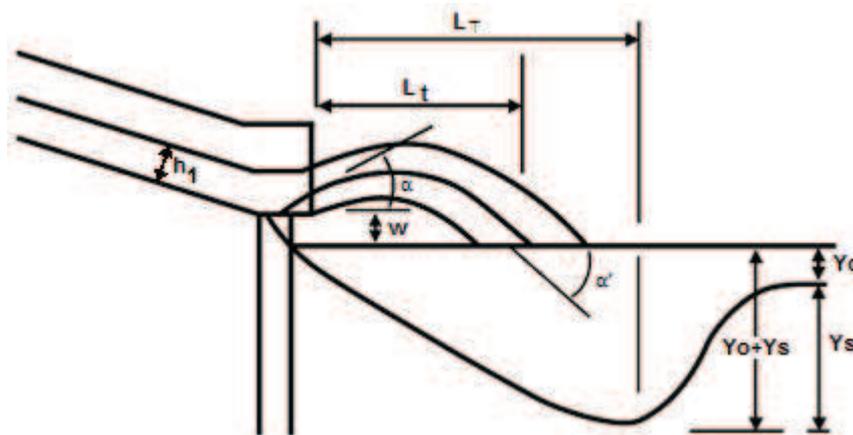
Donde,

L_T = Distancia horizontal desde el pie del esquí hasta el lugar donde se produce la mayor profundidad del cuenco de socavación [m]

L_t = Distancia horizontal desde el pie del esquí hasta el lugar donde el chorro entra a la superficie del agua [m]

α' = Ángulo de entrada del chorro a la superficie del agua. [°]

Figura 2.5: Esquema general de la ubicación del cuenco de socavación



Fuente: Pardo-Gómez, R. (2008). "Método propuesto para el diseño hidráulico de trampolines empleados como disipadores de energía en aliviaderos para presas, considerando la ocurrencia del cono de socavación al pie del mismo". Ingeniería hidráulica en México: Volúmen XXIII. Pp. 111-121.

El ángulo de entrada del chorro α' se determina con la siguiente ecuación:

$$\alpha' = \arctan \left(\sqrt{\tan^2 \alpha + \frac{2g(w+h_1)}{V^2 \cos^2 \alpha}} \right) \quad (2.22)$$

Donde,

V = Velocidad del flujo a la entrada del cucharón del esquí [m/s]

h_1 = Tirante de circulación a la entrada del cucharón del esquí [m]

w = Diferencia entre el nivel del embalse y el labio del esquí [m]

α = Ángulo de salida del chorro [°]

2.2.4 LONGITUD DEL CUENCO

Martins obtuvo la siguiente ecuación para la determinación de la longitud del cuenco:

$$L_c = (0,80 + 2 \cos \alpha') \sqrt[4]{Y_s(Y_s + b_o)^3} \quad (2.23)$$

Donde,

L_c = Longitud del cuenco [m]

α' = Ángulo de entrada del chorro a la superficie del agua [°]

Y_s = Profundidad del foso [m]

b_o = Espesor del chorro de agua [m]

2.2.5 ANCHO DEL CUENCO

Martins obtuvo la siguiente ecuación para la determinación del ancho del cuenco:

$$A_c = 1,60 \sqrt[4]{Y_s(Y_s + b_o)^3} \quad (2.24)$$

Donde,

A_c = Ancho del cuenco [m]

b_o = Espesor del chorro de agua [m]

2.3 CONCLUSIONES

- El proceso de aireación del chorro es importante debido a que una parte de la energía se disipa al momento en que éste se desintegra en el aire, llegando así al cuenco amortiguador con menor porcentaje de ésta, lo que ayuda a obtener profundidades de socavación más pequeñas.
- Algunos autores proponen ecuaciones para la predicción de las características de un foso socavado, estas fórmulas son netamente empíricas, es decir, su desarrollo se ha basado en estudios experimentales realizados en modelos físicos y en prototipos, por lo que su resultado es

aproximado, pero permiten tener una cierta idea de las características reales que se pueden obtener.

- Existen muchos factores que se deben tomar en cuenta para la determinación de la máxima profundidad de socavación, entre ellos los que guardan relación con las características del material pétreo en el cuenco amortiguador, por lo que se considera de gran interés para la presente investigación.
- En el proceso de socavación, un factor muy importante es la profundidad de agua en el cuenco amortiguador, ya que si es mayor que la profundidad de disturbio del chorro, la socavación no se generará; al contrario, si es menor, el chorro impactará sobre el lecho rocoso, dando lugar a la formación de un foso.
- La experimentación es la mejor herramienta para la determinación de las características geométricas de los fosos socavados.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL FENÓMENO DE SOCAVACIÓN POR IMPACTO DEL CHORRO DE AGUA EN UN CUENCO DE MATERIAL SUELTO

Los estudios en modelo hidráulico buscan verificar y modificar el diseño analítico de las estructuras hidráulicas. Los modelos hidráulicos son usualmente contruidos en una escala de tal manera que la relación de escala del prototipo con el modelo varía entre 10 y 100.

Después que la relación de escala es determinada, los resultados de los ensayos realizados en modelo son multiplicados por las respectivas relaciones para obtener los resultados en la naturaleza.

Los ensayos en modelo dan una idea del comportamiento de la estructura bajo condiciones de operación, obteniendo resultados cualitativos y cuantitativos.²¹

3.1 BASES DE LA SIMILITUD GEOMÉTRICA

La propiedad característica de los sistemas geoméricamente similares es que la relación de cualquier longitud en el modelo con respecto a la longitud correspondiente en el prototipo, es igual. Esta relación se conoce como escala de longitud y se expresa de la siguiente manera:

$$e_L = \frac{L_P}{L_M} \quad (3.1)$$

Donde,

e_L = Escala de longitud

L_P = Longitud en prototipo

L_M = Longitud en modelo

²¹ Creager, W., Justin, J., Hinds, J. "Engineering for Dams". 1945.

3.2 BASES DE LA SIMILITUD CINEMÁTICA

La similitud cinemática implica semejanza en el movimiento, es decir, similitud geométrica y similitud de intervalos de tiempo. Cuando los movimientos de los fluidos son cinemáticamente similares, los patrones formados por líneas de corriente son geoméricamente similares en los tiempos correspondientes. Esta relación se representa con la escala de velocidad.

$$e_v = \frac{e_L}{e_T} \quad (3.2)$$

Donde,

e_v = Escala de velocidad

e_T = Escala de tiempo

De igual manera se deriva la escala de aceleración:

$$e_a = \frac{e_L}{e_T^2} \quad (3.3)$$

Donde,

e_a = Escala de aceleración

3.3 SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA²²

Se debe identificar la fuerza predominante del fenómeno hidráulico en el prototipo y representarla en el modelo mediante la utilización de uno de los números adimensionales que se mencionan a continuación: Froude, Reynolds, Euler, Weber y Mach. De esta manera se logra una similitud dinámica restringida, debido a que solo se representa la fuerza que condiciona al fenómeno hidráulico.

²² Hidalgo, M. *“Introducción a la teoría de modelos hidráulicos y aplicaciones básicas.”* Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional. 2007.

Cuadro 3.1: Parámetros adimensionales

FUERZA PREDOMINANTE	IDENTIDAD	SIMILITUD RESTRINGIDA	TIPO DE MODELO
Gravedad	Fr	Froude	froudiano
Viscosidad	Re	Reynolds	viscoso
Tensión Superficial	We	Weber	-
Elasticidad	Ma	Mach	elástico
Gravedad y Viscosidad	Fr y Re	Froude y Reynolds	grávido-viscoso

Fuente: Hidalgo, M. *“Introducción a la teoría de modelos hidráulicos y aplicaciones básicas.”* Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional. 2007.

3.3.1 SIMILITUD DE FROUDE

La similitud restringida de Froude solo puede aplicarse al estudio o modelación de fenómenos hidráulicos donde las fuerzas gravitacionales o de peso (F_g), sean preponderantes, tal es el caso del fenómeno que se representa en el modelo físico de la presa Toachi que corresponde a flujo con superficie libre.

La definición del número de Froude es la siguiente:

$$Fr = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas gravitacionales}} = \frac{V}{\sqrt{\left(\frac{\gamma}{\rho}\right)_L}} = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (3.4)$$

Donde,

Fr = Número de Froude

V = Velocidad media

γ = Peso específico del agua

ρ = Densidad del agua

L = Longitud característica

g = Aceleración de la gravedad

Debido a que en el modelo físico y en el prototipo se utiliza el mismo fluido (agua), se determina que $\rho_M = \rho_P$, de la misma manera, al tener las dos condiciones en el mismo campo gravitatorio, se establece que $g_M = g_P$, y por tanto $\gamma_M = \gamma_P$.

Según la escala de aceleración determinada en el numeral 3.2, y reemplazando en términos de la aceleración de la gravedad, se tiene:

$$e_g = \frac{e_L}{e_T^2} \quad (3.5)$$

Donde,

e_g = Escala de aceleración de la gravedad

Esta ecuación se simplifica en función a lo determinado anteriormente, obteniendo:

$$e_T = e_L^{1/2} \quad (3.6)$$

Según el criterio de similitud de Froude, las escalas de magnitud más utilizadas son:

Cuadro 3.2: Escala de magnitudes según el criterio de Froude

Magnitud	Símbolo	Equivalencia
Longitud	e_L	e_L
Superficie	e_A	e_L^2
Velocidad	e_V	$e_L^{1/2}$
Tiempo	e_T	$e_L^{1/2}$
Caudal	e_Q	$e_L^{5/2}$
Fuerza	e_F	e_L^3
Presión	e_P	e_L

Fuente: Escuela Politécnica Nacional, HIDROTOAPI E.P. "Estudio en modelo hidráulico. Presa Toachi y sus obras complementarias. Informe Técnico Fase I". Quito. 2011.

Con el objetivo de que las fuerzas de viscosidad y de tensión superficial no sean de relevancia en el flujo analizado en el modelo físico, se debe asegurar que tenga un flujo turbulento totalmente desarrollado en la experimentación,

manteniendo un coeficiente de fricción λ similar en ambas condiciones. Esto se logra cuando el número de Reynolds es superior a 2×10^4 , y el calado es mayor a 0.03 m.

De esta manera se puede obtener una pendiente en la línea de energía igual en los dos casos, siguiendo la ley de similitud de Froude.

3.3.2 ANÁLISIS DIMENSIONAL²³

Se aplica el análisis dimensional como herramienta para el planteamiento del estudio de los fenómenos hidráulicos a ser simulados en modelos físicos, de manera que los parámetros variables que generalmente son magnitudes físicas que intervienen en estos fenómenos pueden ser manejados con orden y lógica matemática.

Para llevar a cabo este análisis se emplea el Teorema π o de Buckingham, en donde es necesario conocer las variables que controlan al fenómeno físico.

El presente estudio se basa en el análisis del desarrollo de los cuencos de socavación producidos por los chorros provenientes de los vertederos de excesos de la presa Toachi, por lo que, el parámetro que se debe determinar es el correspondiente a la profundidad de socavación, incluyendo el valor del calado de agua presente en el cuenco amortiguador, es decir, la profundidad $Y_s + Y_o$.

En el estudio se debe tomar en cuenta que la profundidad de socavación no se puede determinar de una forma cuantitativa, sino de una forma cualitativa, ya que el material pétreo utilizado en el modelo es escalado geométricamente con respecto al del prototipo, y el peso específico, que es una de las propiedades dinámicas del material, no se puede escalar.

Para realizar el análisis dimensional se determinan las siguientes variables que intervienen en el fenómeno:

²³ Hidalgo, M. *“Introducción a la teoría de modelos hidráulicos y aplicaciones básicas.”* Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional. 2007.

- Variable dependiente:

$Y_s + Y_o =$ Profundidad de socavación + calado en el cuenco [m]

- Variables independientes:

$\varphi =$ Diámetro nominal del material pétreo [m]

$\alpha =$ Ángulo de salida del chorro [°]

$H =$ Diferencia entre superficie libre en el embalse y superficie libre en el cuenco amortiguador [m]

$q =$ Caudal unitario [$m^3/s/m$]

$g =$ Aceleración de la gravedad [m/s^2]

$\gamma_s =$ Peso específico del material pétreo [kg/m^3]

$\gamma =$ Peso específico del agua [kg/m^3]

Una vez establecidas las variables se aplica el teorema de Buckingham, el cual permite definir el número de parámetros adimensionales (π), éstos son determinados mediante la diferencia entre el número de variables (n), y las magnitudes fundamentales (k). Por tanto se tiene:

- Variables (n): $8 = (Y_s + Y_o, \varphi, \alpha, H, q, g, \gamma_s, \gamma)$
- Magnitudes fundamentales (k): $3 = (L, M, T)$
- Parámetros adimensionales ($n-k$): $5 = (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5)$

A partir del análisis matemático se plantea:

$$Y_s + Y_o = f_1(\varphi, \alpha, H, q, g, \gamma_s, \gamma) \quad (3.7)$$

$$0 = f_2(Y_s + Y_o, \varphi, \alpha, H, q, g, \gamma_s, \gamma) \quad (3.8)$$

$$0 = f_3(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5) \quad (3.9)$$

Se deben establecer las variables repetitivas que se utilizarán para la determinación de los parámetros π en la matriz característica, tomando en cuenta

que su determinante no debe ser nulo. Se escogieron las siguientes variables: ϕ , g y γ .

Cuadro 3.3: Matriz característica

Variables	L	M	T
ϕ	1	0	0
g	1	0	-2
γ	-3	1	0
q	2	0	-1
γ_s	-3	1	0
α	0	0	0
H	1	0	0
$Y_s + Y_o$	1	0	0

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Resolución del sistema:

3.3.2.1 Determinación del parámetro adimensional π_1 :

Cuadro 3.4: Determinación de π_1

π_1					π_1
Magnitud fundamental	a	b	c	-q	
L	1	1	-3	-2	a = -3/2
M	0	0	1	0	b = -1/2
T	0	-2	0	1	c = 0

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

$$\pi_1 = \frac{q}{\phi^{3/2} g^{1/2}} \quad (3.10)$$

3.3.2.2 Determinación del parámetro adimensional π_2 :

Cuadro 3.5: Determinación de π_2 :

π_2					π_2
Magnitud fundamental	a	b	c	- γ_s	
L	1	1	-3	3	a = 0
M	0	0	1	-1	b = 0
T	0	-2	0	0	c = -1

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

$$\pi_2 = \frac{Y_s}{Y} \quad (3.11)$$

3.3.2.3 Determinación del parámetro adimensional π_3 :

Cuadro 3.6: Determinación de π_3 :

π_3					π_3
Magnitud fundamental	a	b	c	$-\alpha$	Resultados
L	1	1	-3	0	a = 0
M	0	0	1	0	b = 0
T	0	-2	0	0	c = 0

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

$$\pi_3 = \alpha \quad (3.12)$$

3.3.2.4 Determinación del parámetro adimensional π_4 :

Cuadro 3.7: Determinación de π_4 :

π_4					π_4
Magnitud fundamental	a	b	c	-H	Resultados
L	1	1	-3	-1	a = -1
M	0	0	1	0	b = 0
T	0	-2	0	0	c = 0

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

$$\pi_4 = \frac{H}{\varphi} \quad (3.13)$$

3.3.2.5 Determinación del parámetro adimensional π_5 :

Cuadro 3.8: Determinación de π_5 :

π_5					π_5
Magnitud fundamental	a	b	c	$-(Y_s + Y_o)$	Resultados
L	1	1	-3	-1	a = -1
M	0	0	1	0	b = 0
T	0	-2	0	0	c = 0

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

$$\pi_5 = \frac{Y_s + Y_o}{\varphi} \quad (3.14)$$

Reemplazando los resultados obtenidos en la expresión 3.9, se tiene:

$$0 = f_3 \left(\frac{q}{\varphi^{3/2} g^{1/2}}, \frac{Y_s}{\varphi}, \alpha, \frac{H}{\varphi}, \frac{Y_s + Y_o}{\varphi} \right) \quad (3.15)$$

$$\frac{Y_s + Y_o}{\varphi} = f_3 \left(\frac{q}{\varphi^{3/2} g^{1/2}}, \frac{Y_s}{\varphi}, \alpha, \frac{H}{\varphi} \right) \quad (3.16)$$

El ángulo de salida del chorro se elimina debido a que su valor es fijo, y la relación entre los pesos específicos del material pétreo y del agua también serán suprimidos por cuanto su valor es constante. De manera que se tiene:

$$\frac{Y_s + Y_o}{\varphi} = f \left(\frac{q}{\varphi^{3/2} g^{1/2}}, \frac{H}{\varphi} \right) \quad (3.17)$$

En donde se puede determinar que la profundidad de socavación se encuentra en función del caudal unitario (q), la diferencia entre la superficie libre en el embalse y la superficie libre en el cuenco amortiguador (H), el diámetro del material (φ) y la aceleración de la gravedad (g). A partir de esto, se determinan las siguientes relaciones:

$$\text{Caudal adimensional: } \frac{q}{\varphi^{3/2} g^{1/2}} \quad (3.18)$$

$$\text{Profundidad de Socavación adimensional: } \frac{Y_s + Y_o}{\varphi} \quad (3.19)$$

3.4 SIMILITUD DINÁMICA EXACTA

La similitud dinámica exacta se logra cuando los números de Froude y Reynolds son numéricamente iguales en dos sistemas de flujo geoméricamente similares, es decir, que para tener una similitud dinámica exacta éstos números deben ser iguales en modelo y prototipo.²⁴

3.4.1 EFECTOS DE ESCALA

El parámetro físico de mayor relevancia dentro de la representación del flujo turbulento en modelos físicos, es la gravedad. Como se determinó anteriormente,

²⁴ Domingo, R. "Estudio teórico - experimental de un sistema de disipación de energía poco habitual al pie de una caída de agua". Barcelona, España. 2003. Tesis de Grado. Universidad de Cataluña.

la similitud dinámica exacta se logra cuando los números de Froude y Reynolds son iguales, tanto en modelo como en prototipo. Las fuerzas moleculares que no tienen, por lo general, relevancia en el prototipo, cobran gran importancia en el modelo. Estas fuerzas están asociadas, principalmente, con las fuerzas capilares derivadas de la tensión superficial y con las fuerzas viscosas o de fricción interna.²⁵

En los modelos froudianos, es decir, en aquellos modelos en donde se asegura que el número de Froude es igual en los dos sistemas, modelo y prototipo, no se garantiza una relación igual entre los otros parámetros que caracterizan al flujo en los sistemas antes mencionados, por lo que se recurre a los denominados efectos de escala en la representación del flujo en los casos que la gravedad no sea el principal parámetro que caracteriza el flujo.

3.5 JUSTIFICACIÓN DE LA ESCALA LONGITUDINAL DEL MODELO EXISTENTE²⁶

La selección de la escala longitudinal del modelo de la presa Toachi tomó en cuenta las condiciones impuestas por el criterio de similitud restringida, la disponibilidad del espacio físico en el laboratorio del CIERHI, la capacidad del sistema de recirculación de caudales disponible y el factor económico.

Para garantizar la presencia de flujo turbulento, se procura escoger una escala con la que se pueda tener un mayor tamaño, pero sin descuidar los demás parámetros planteados. La escala seleccionada fue 1:50, con la que se tuvo un área de aproximadamente 37 m² y un caudal máximo de operación de alrededor de 180 l/s.

En el siguiente cuadro se presentan los valores de las escalas de modelación, así como también las principales dimensiones del modelo, para la escala seleccionada.

²⁵ http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_123_183_81_1150.pdf

²⁶ Escuela Politécnica Nacional, HIDROTOAPI E.P. *“Estudio en modelo hidráulico. Presa Toachi y sus obras complementarias. Informe Técnico Fase I”*. Quito. 2011.

Cuadro 3.9: Selección de la escala del modelo

DIMENSIONES	PROTOTIPO	MODELO		
		1:60	1:50	1:40
CAUDAL	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
Desagües	3200	0,115	0,181	0,316
Vertederos	1182	0,042	0,067	0,117
CARGA	[m]	[m]	[m]	[m]
Desagües	43,00	0,717	0,86	1,075
Vertederos	7,50	0,125	0,15	0,188
LONGITUD	[m]	[m]	[m]	[m]
Altura Presa	59,00	0,980	1,180	1,480
Longitud Presa	170,50	2,840	3,410	4,260
Ancho del Cuenco	67,75	1,129	1,355	1,694
Longitud del Cuenco	105,00	1,750	2,100	2,625

Fuente: Escuela Politécnica Nacional, HIDROTOAPI E.P. “*Estudio en modelo hidráulico. Presa Toachi y sus obras complementarias. Informe Técnico Fase I*”. Quito. 2011.

La escala seleccionada fue la más idónea, debido a que en el área destinada para la modelación física en el laboratorio del CIERHI, existen otros dos modelos correspondientes a estructuras del mismo proyecto, por lo que la superficie que ocupa el modelo de la presa Toachi es un factor muy importante, además, se debe tomar en cuenta que si el tamaño del modelo es mayor, los efectos de escala serán menores y las mediciones tendrán mayor exactitud.

3.6 CONCLUSIONES

- El modelo físico de la presa Toachi opera bajo las condiciones de la ley de similitud restringida de Froude y con un flujo turbulento totalmente desarrollado.
- Para la correcta representación del fenómeno hidráulico en el modelo físico se debe tomar en cuenta la fuerza predominante, para así determinar el tipo de similitud restringida con la que se va a trabajar.
- Se debe asegurar que las fuerzas de tensión superficial y viscosas no sean importantes en la representación en modelos, esto se logra cuando se tiene un flujo turbulento totalmente desarrollado, de manera que se mantenga un mismo coeficiente de fricción f en modelo y prototipo con

números de Reynolds diferentes, lo que se alcanza al construir un modelo hidráulicamente liso.

- Es preciso tomar en cuenta el tamaño del material pétreo presente en el cuenco amortiguador, debido a que éste va a ser uno de los principales parámetros que influirán en la profundidad de socavación provocada por los chorros provenientes de las estructuras de descarga.

CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN Y OPERACIÓN DEL MODELO FÍSICO

4.1 GENERALIDADES

El modelo físico de la presa Toachi se construyó en las instalaciones del Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI) de la Escuela Politécnica Nacional. El CIERHI cuenta con un área experimental de 1200 m², un sistema de recirculación de flujo de 800 l/s (4 bombas con capacidad máxima de bombeo de 200 l/s cada una), oficinas, talleres, equipos mecánicos, eléctricos y electrónicos de medición.

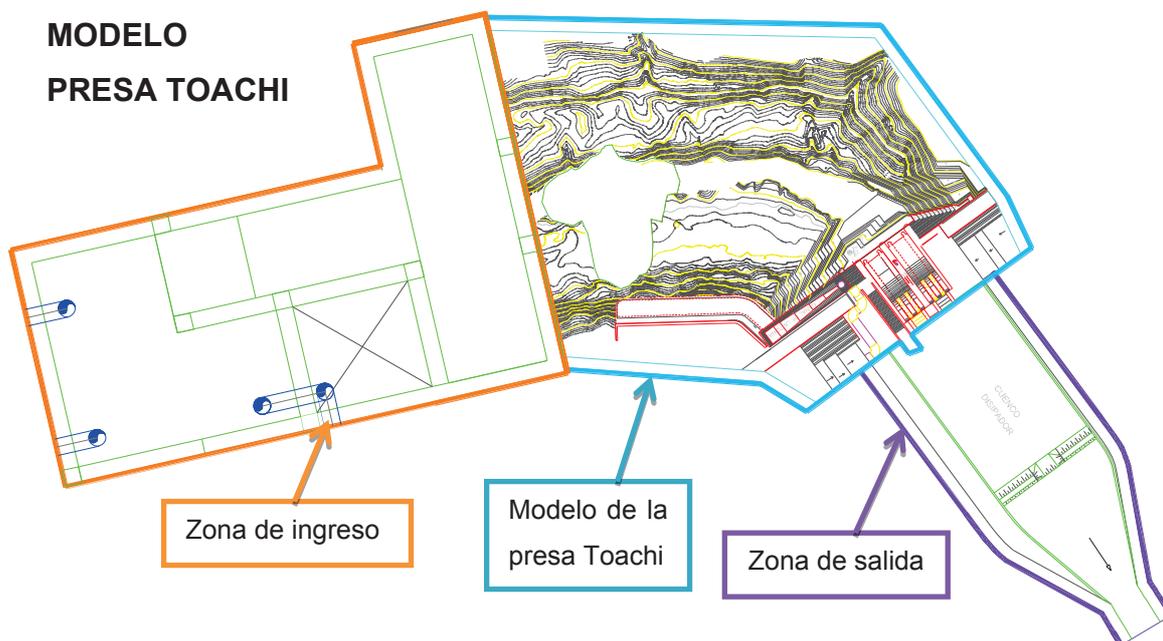
4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO FÍSICO EXISTENTE

El modelo físico de la presa Toachi fue construido de acuerdo a la información técnica entregada por HIDROTOAPI-EP al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DICA).

En la primera fase de investigación se construyó:

- Zona de ingreso
- Modelo de la presa Toachi
- Zona de salida

Figura 4.1: Componentes del modelo físico de la presa Toachi



Fuente: Equipo de investigación Toachi-Pilatón 2011-2013

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

4.2.1 COMPONENTES DE LA ZONA DE INGRESO

La zona de ingreso permite la entrada del caudal al modelo físico, la disipación de energía residual y la uniformización del flujo que ingresa al embalse. El sistema comprende:

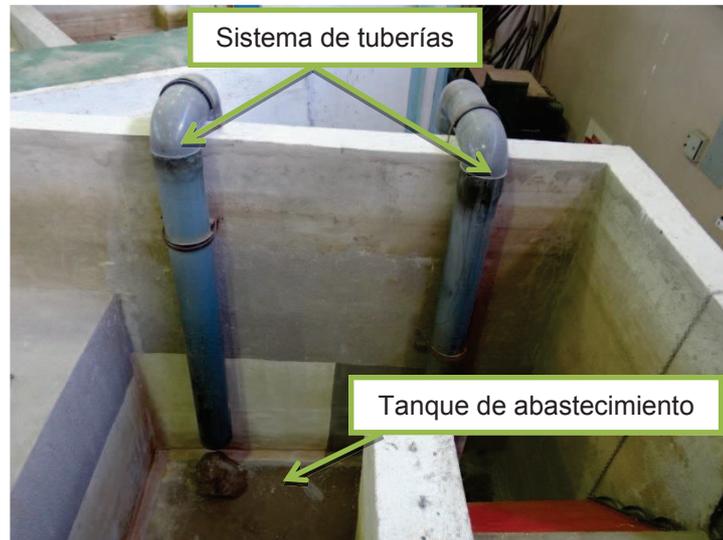
- Sistema de tuberías
- Tanque de abastecimiento
- Pantalla uniformizadora
- Canal de ingreso al vertedero de aforo
- Vertedero triangular de aforo
- Tanque uniformizador

4.2.2.1 Sistema de tuberías

El sistema de ingreso consta de 3 tuberías de PVC de presión de 200 mm de diámetro, éstas llevan el agua desde el tanque de carga constante del CIERHI,

hasta el tanque de abastecimiento, cada tubería posee una válvula de compuerta cuya función es la de regular el ingreso de caudal al tanque.

Fotografía 4.1: Sistema de tuberías y tanque de abastecimiento



Fuente: Equipo de investigación Toachi-Pilatón 2011-2013

4.2.2.2 Tanque de abastecimiento

Al tanque de abastecimiento llegan las 3 tuberías provenientes del tanque de carga, la función de éste es la de almacenar un volumen suficiente de agua para cumplir con los requerimientos del plan de pruebas planteado. El tanque tiene un volumen máximo de 8 m³.

4.2.2.3 Pantalla uniformizadora

La pantalla uniformizadora tiene como función estabilizar el flujo de aproximación aguas arriba del vertedero triangular de aforo.

4.2.2.4 Canal de ingreso al vertedero de aforo

Es el canal ubicado antes del vertedero de aforo, donde se estabiliza el flujo de aproximación.

Fotografía 4.2: Vertedero triangular de aforo



Fuente: Equipo de investigación Toachi-Pilatón 2011-2013

4.2.2.5 Vertedero triangular de aforo

Es el vertedero triangular de pared delgada que se utiliza para determinar el caudal que ingresa al embalse. Tiene un ángulo central de 90° .

4.2.2.6 Tanque uniformizador

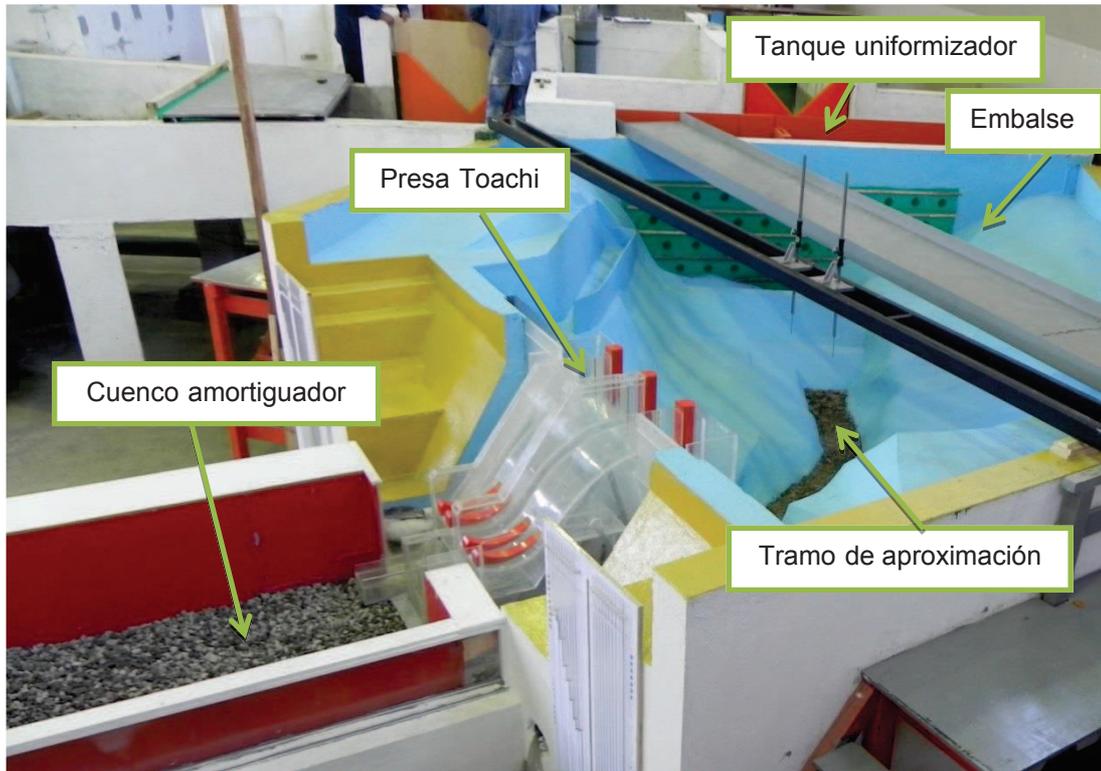
El caudal que escurre del vertedero de aforo llega a este tanque para posteriormente ser conducido al embalse, posee una pared con agujeros de 5 cm de diámetro, que actúan como pantalla uniformizadora de flujo.

4.2.2 MODELO FÍSICO DE LA PRESA TOACHI

El modelo de la presa Toachi ha sido construido a escala 1:50.

El tramo de aproximación hacia la presa es de 4,50 m en modelo, es decir, 225 m en prototipo, este tramo es la representación de la curvatura que presenta el cauce y márgenes del río Toachi. Aguas abajo de la presa se encuentran el cuenco de disipación de energía, la transición de entrega al cauce natural y un pequeño tramo de río que en total suman una longitud de 3.90 m en modelo o 195 m en prototipo. El área aproximada de construcción es de 37 m^2 .

Fotografía 4.3: Modelo de la presa Toachi



Fuente: Equipo de investigación Toachi-Pilatón 2011-2013

La presa se compone de las siguientes obras complementarias:

- Embalse y ataguía
- Canal de toma y obra de toma
- Vertederos de excesos
- Vertedero Escalonado de Sarapullo
- Desagües de fondo
- Cuenco de disipación de energía
- Transición hacia el río

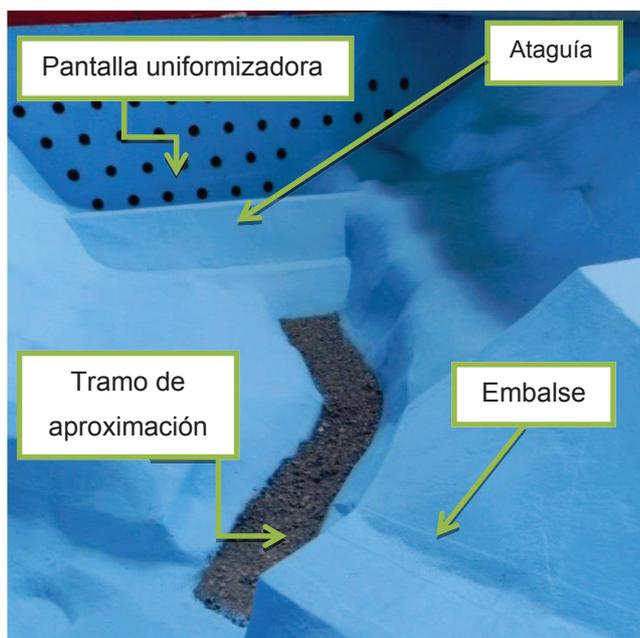
4.2.2.1 Embalse y ataguía

Estas obras han sido construidas siguiendo la topografía del tramo. El cauce del río y los taludes laterales fueron construidos dentro de un tanque con paredes de mampostería y losa de hormigón. La topografía fue representada de acuerdo a los detalles entregados por HIDROTOAPI EP, se utilizó material suelto compactado y terrocemento, posteriormente se impermeabilizó y pintó.

Cuadro 4.1: Datos del embalse y ataguía

EMBALSE			
	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
Volumen	m ³	1,13x10 ⁶	9,00
Pendiente del fondo	%	2,50	2,50
Cota máxima de los taludes	m.s.n.m.	970,00	1,73 m
ATAGUÍA			
	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
Volumen	m ³	5,75x10 ⁴	0,46
Longitud de la cresta	m	85,50	1,71
Ancho de la cresta	m	6,00	0,12
Cota de la cresta	m.s.n.m.	945,00	1,23 m
Longitud máxima de las plataformas	m	38,50	0,77
	m	32,50	0,65
Ancho de las plataformas	m	6,50	0,13
	m	10,00	0,20
Cota de las plataformas	m.s.n.m.	933,50	1,00 m

Fuente: Escuela Politécnica Nacional, HIDROTOAPI E.P. “Estudio en modelo hidráulico. Presa Toachi y sus obras complementarias. Informe Técnico Fase I”. Quito. 2011.

Fotografía 4.4: Modelo del embalse

Fuente: Equipo de investigación Toachi-Pilatón 2011-2013

4.2.2.2 Canal de toma

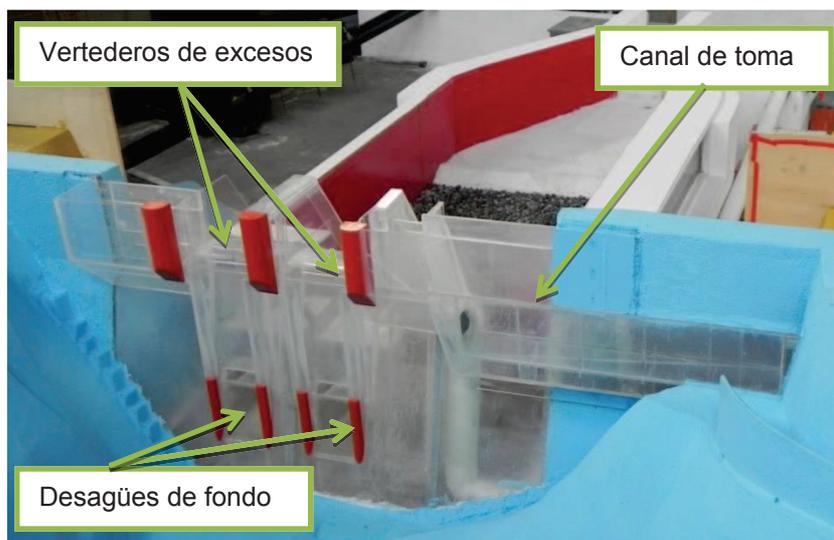
El canal de toma se encuentra empotrado en el paramento de la presa. Se construyeron varias piezas en acrílico de 6 mm de espesor. Debido a que la geometría de esta estructura es compleja se extrajo varios cortes transversales que sirvieron como base para la configuración de todas las piezas de acrílico. En la siguiente tabla se presentan las principales características del canal de toma.

Cuadro 4.2: Dimensiones del canal de toma

CANAL DE TOMA			
	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
Longitud superior del canal	m	56,95	1,139
Longitud inferior del canal	m	51,85	1,037
Ancho del canal	m	1,70	0,214
Pendiente longitudinal	%	4,90	4,90
Cota del labio del vertedero lateral	m.s.n.m.	964,00	1,61 m

Fuente: Escuela Politécnica Nacional, HIDROTOAPI E.P. “Estudio experimental en modelo hidráulico. Escala 1:50. Verificación experimental del diseño definitivo de la presa Toachi y obras complementarias. Informe Técnico Fase IV”. Quito. 2013.

Fotografía 4.5: Vista posterior de la presa Toachi



Fuente: Equipo de investigación Toachi-Pilatón 2011-2013

4.2.2.3 Vertederos de excesos

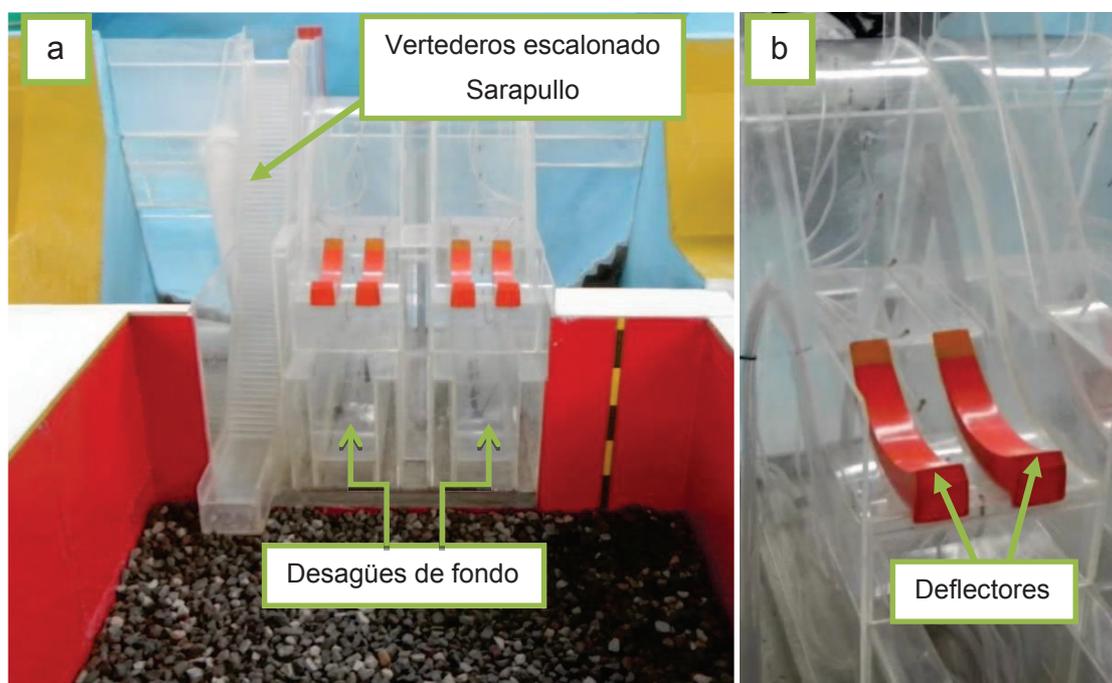
Los vertederos de excesos de la presa Toachi fueron construidos en acrílico transparente de 6 mm de espesor. Las pilas y los deflectores fueron moldeados en madera lacada con acabado liso. En la siguiente tabla se presentan las características más relevantes de los vertederos de excesos.

Cuadro 4.3: Dimensiones de los vertederos de excesos y sus componentes

VERTEDEROS DE EXCESOS			
	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
Ancho de bloques	m	18,00	0,36
Ancho de vertedero	m	14,00	0,28
Carga de diseño	m	7,50	0,15
Cota de la cresta	m.s.n.m.	962,50	1,58 m
CLAPETAS			
	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
Radio	m	17,00	0,34
Cota borde superior	m.s.n.m.	970,40	1,74 m
SALTO EN ESQUÍ			
	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
Radio	m	12,00	0,24
Ángulos de salida	°	20	20
Cota del labio	m.s.n.m.	942,25	1,175 m
DEFLECTORES			
	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
Radio	m	10,00	0,20
Ángulos de salida	°	37	37
Cota del labio	m.s.n.m.	944,67	1,223 m

Fuente: Escuela Politécnica Nacional. HIDROTOAPI E.P. “Estudio experimental en modelo hidráulico. Escala 1:50. Verificación experimental del diseño definitivo de la presa Toachi y obras complementarias. Informe Técnico Fase IV”. Quito. 2013.

Fotografía 4.6: Modelo de las estructuras de descarga de la presa Toachi (a). Vertedero de excesos derecho (b).



Fuente: Equipo de investigación Toachi-Pilatón 2011-2013

4.2.2.4 Vertedero Escalonado de Sarapullo

Las paredes laterales del vertedero escalonado de Sarapullo fueron construidas con acrílico transparente de 6 mm de espesor. Las huellas y contrahuellas de los escalones fueron construidas en acrílico de 4 mm. Las principales características del vertedero escalonado de Sarapullo se muestran en la siguiente tabla.

Cuadro 4.4: Dimensiones del vertedero Sarapullo

VERTEDERO ESCALONADO DE SARAPULLO			
	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
Ancho del vertedero	m	6,50	0,13
Número de escalones	-	48	48
Ancho de la huella	m	0,52	0,0104

Cuadro 4.4: Continuación

Ancho de la contrahuella	m	0,75	0,015
Cota de la cresta	m.s.n.m.	969,50	1,72 m
Cota de la cubeta de fondo	m.s.n.m.	923,00	0,79 m

Fuente: Escuela Politécnica Nacional. HIDROTOAPI E.P. “Estudio experimental en modelo hidráulico. Escala 1:50. Verificación experimental del diseño definitivo de la presa Toachi y obras complementarias. Informe Técnico Fase IV”. Quito. 2013.

4.2.2.5 Desagües de fondo

Los desagües de fondo de la presa Toachi fueron construidos en acrílico transparente de 6 mm de espesor. Las pilas fueron moldeadas en madera lacada con acabado liso. En la siguiente tabla se presentan las características más relevantes de los desagües de fondo.

Cuadro 4.5: Dimensiones relevantes de los desagües de fondo

DESAGÜES DE FONDO			
	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
Ancho de bloques	m	12,00	0,24
Ancho de desagüe	m	8,00	0,16
Cota de la cresta	m.s.n.m.	927,00	0,87 m
SALTO EN ESQUÍ			
	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
Radio	m	15,00	0,30
Cota del labio	m.s.n.m.	923,00	0,79 m

Fuente: Escuela Politécnica Nacional, HIDROTOAPI E.P. “Estudio experimental en modelo hidráulico. Escala 1:50. Verificación experimental del diseño definitivo de la presa Toachi y obras complementarias. Informe Técnico Fase IV”. Quito. 2013.

4.2.2.6 Cuenco de disipación de energía

La estructura fue construida con una losa de hormigón y paredes de mampostería, en las fases anteriores de investigación se recomendó incrementar la longitud y el ancho del cuenco, por lo que se colocaron paredes de madera (triplex 18 mm). A continuación se presentan las principales características del cuenco de disipación de energía.

Cuadro 4.6: Dimensiones principales del cuenco de disipación de energía

CUENCO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA			
	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
Longitud del cuenco	m	105,00	2,10
Ancho del cuenco	m	68,00	1,36
Cota enrocado	m	918,50	0,70 m

Fuente: Escuela Politécnica Nacional, HIDROTOAPI E.P. “*Estudio experimental en modelo hidráulico. Escala 1:50. Verificación experimental del diseño definitivo de la presa Toachi y obras complementarias. Informe Técnico Fase IV*”. Quito. 2013.

Fotografía 4.7: Zona de salida del modelo de la presa Toachi

Fuente: Equipo de investigación Toachi-Pilatón 2011-2013

4.2.2.7 Transición hacia el río

La transición hacia el río fue construida con hormigón, en la entrada (aguas arriba), tiene una escollera o umbral, que tiene 7 cm de altura en modelo. Los ángulos de las paredes con respecto al eje longitudinal son diferentes, por lo tanto la transición es asimétrica. A continuación se describen las principales características de la transición hacia el río.

Cuadro 4.7: Dimensiones de la transición hacia el río

TRANSICIÓN HACIA EL RÍO			
	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
Longitud de la transición	m	85,00	1,70
Ancho aguas arriba	m	68,00	1,36
Ancho aguas abajo	m	17,25	0,345
Pendiente longitudinal	%	2	2
Ángulo margen derecha	°	13	13
Ángulo margen izquierda	°	26	26

Fuente: Escuela Politécnica Nacional, HIDROTOAPI E.P. *“Estudio experimental en modelo hidráulico. Escala 1:50. Verificación experimental del diseño definitivo de la presa Toachi y obras complementarias. Informe Técnico Fase IV”*. Quito. 2013.

4.3 INSTRUMENTACIÓN PARA LAS PRUEBAS

Los instrumentos de medición son de suma importancia para la determinación experimental de los resultados. Para la investigación se utilizaron los siguientes instrumentos:

- Vertedero triangular de 90°, pared delgada.
- Limnímetros, cinta métrica.
- Nivel y estación total.

4.3.1 VERTEDERO TRIANGULAR DE 90°, PARED DELGADA

Se utiliza un vertedero triangular de pared delgada para la determinación del caudal que entra al embalse. El agua cae desde el vertedero hasta el tanque uniformizador, y posteriormente al embalse. El vertedero está hecho de madera lacada y pintada, tiene 1,00 m de ancho, 0,20 m desde el fondo del canal hasta el vértice y 0,66 m de altura.

La curva de descarga del vertedero triangular de pared delgada está representada por una tendencia experimental, con la ecuación que se describe a continuación:

$$Q = 1,351 h_v^{2,414} \quad (4.1)$$

Donde,

Q = Caudal que ingresa al embalse [m³/s]

h = Carga sobre el vértice del vertedero [m]

Fotografía 4.8: Vertedero triangular de ingreso en funcionamiento



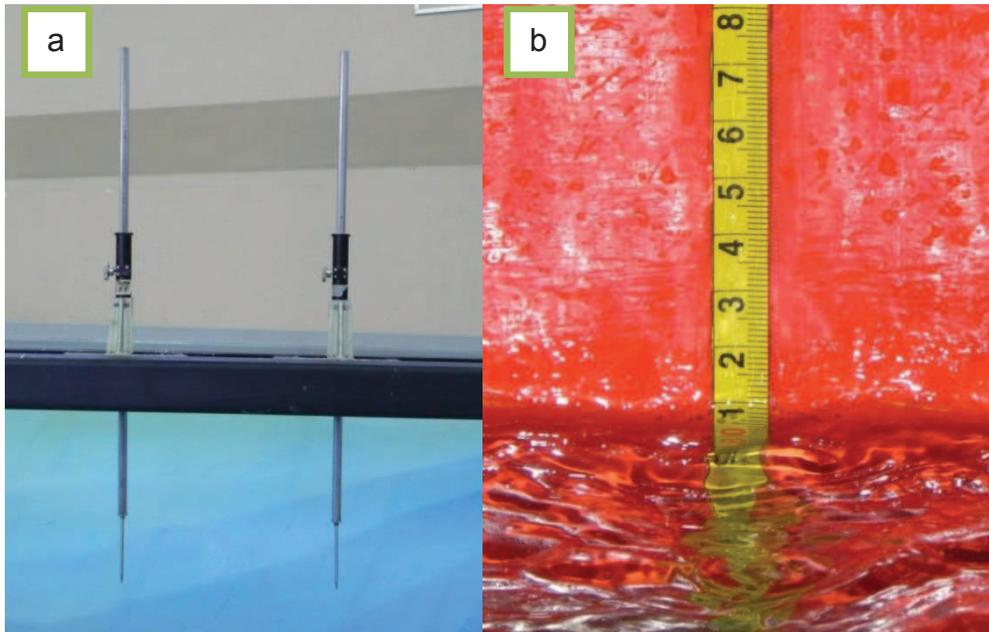
Fuente: Equipo de investigación Toachi-Pilatón 2011-2013

4.3.2 LIMNÍMETROS, CINTA MÉTRICA

Para medir el nivel del agua o calado en el canal de ingreso y en el embalse se utilizan limnímetros, éstos tienen una apreciación de 0,1 mm en la escala de Vernier.

Con la ayuda de las cintas se mide el alcance de los chorros provenientes de los vertederos de excesos, el calado en el cuenco de disipación de energía y la altura en los piezómetros. Las cintas tienen una apreciación de 1 mm.

Fotografía 4.9: Limnímetros (a). Cinta métrica (b).



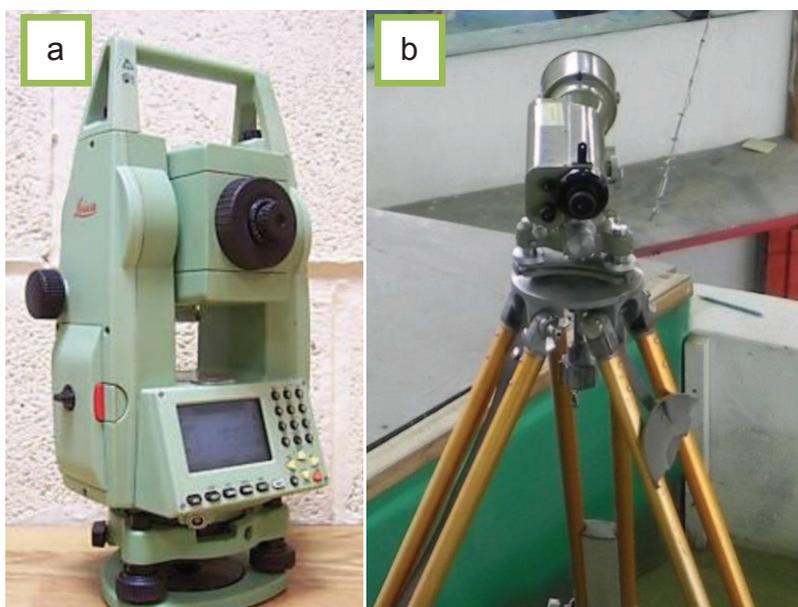
Fuente: Equipo de investigación Toachi-Pilatón 2011-2013

4.3.3 NIVEL Y ESTACIÓN TOTAL

Se utilizó un nivel topográfico marca Wild Heerbrugg Switzerland para la correcta colocación de las estructuras moldeadas en acrílico, con el fin de ubicarlas en los puntos correctos según las especificaciones entregadas por HIDROTOAPI EP.

Para el levantamiento topográfico de todos los fosos formados en el cuenco de disipación de energía, así como para el replanteo de las estructuras moldeadas en acrílico, se utilizó una estación total marca Leica.

Fotografía 4.10: Estación total marca Leica (a). Nivel topográfico marca Wild Heerbrugg Switzerland (b).



Fuente: Equipo de investigación Toachi-Pilatón 2011-2013

4.4 PLAN DE PRUEBAS

El plan de pruebas se desarrolla en tres escenarios, en cada uno de ellos se van a determinar las características, tanto en la forma, como en la profundidad de los fosos socavados en el cuenco amortiguador, para una serie de cinco caudales en cada escenario, como se detalla en la siguiente tabla:

Cuadro 4.8: Serie de caudales propuestos para cada escenario

Código	Escenario N°1		Escenario N°2		Escenario N°3	
	Q [m ³ /s] Prototipo	Q [l/s] Modelo	Q [m ³ /s] Prototipo	Q [l/s] Modelo	Q [m ³ /s] Prototipo	Q [l/s] Modelo
A	250	14,14	250	14,14	250	14,14
B	500	28,28	500	28,28	500	28,28
C	700	39,6	800	45,25	800	45,25
D	1000	56,57	1000	56,57	1000	56,57
E	1200	67,88	1200	67,88	1200	67,88

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Los caudales fueron seleccionados en función de los caudales de crecida, proporcionados en el informe hidrológico del proyecto para el sitio donde se ubica la presa Toachi. Las obras de descarga (vertederos de excesos y desagües de

fondo) de la presa se diseñaron para aliviar caudales con tiempo de retorno de 1000 años ($965 \text{ m}^3/\text{s}$), que se aproximaron a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.²⁷

La nomenclatura de las pruebas consta de un número y una letra. El número representa el escenario y la letra simboliza el caudal que ingresa al embalse.

Para la representación del material suelto en el cuenco de disipación de energía se utilizó grava (ripió) de diferentes diámetros nominales.

En cada escenario se utiliza material pétreo de diámetro definido, como se muestra a continuación:

Cuadro 4.9: Diámetro nominal del material pétreo

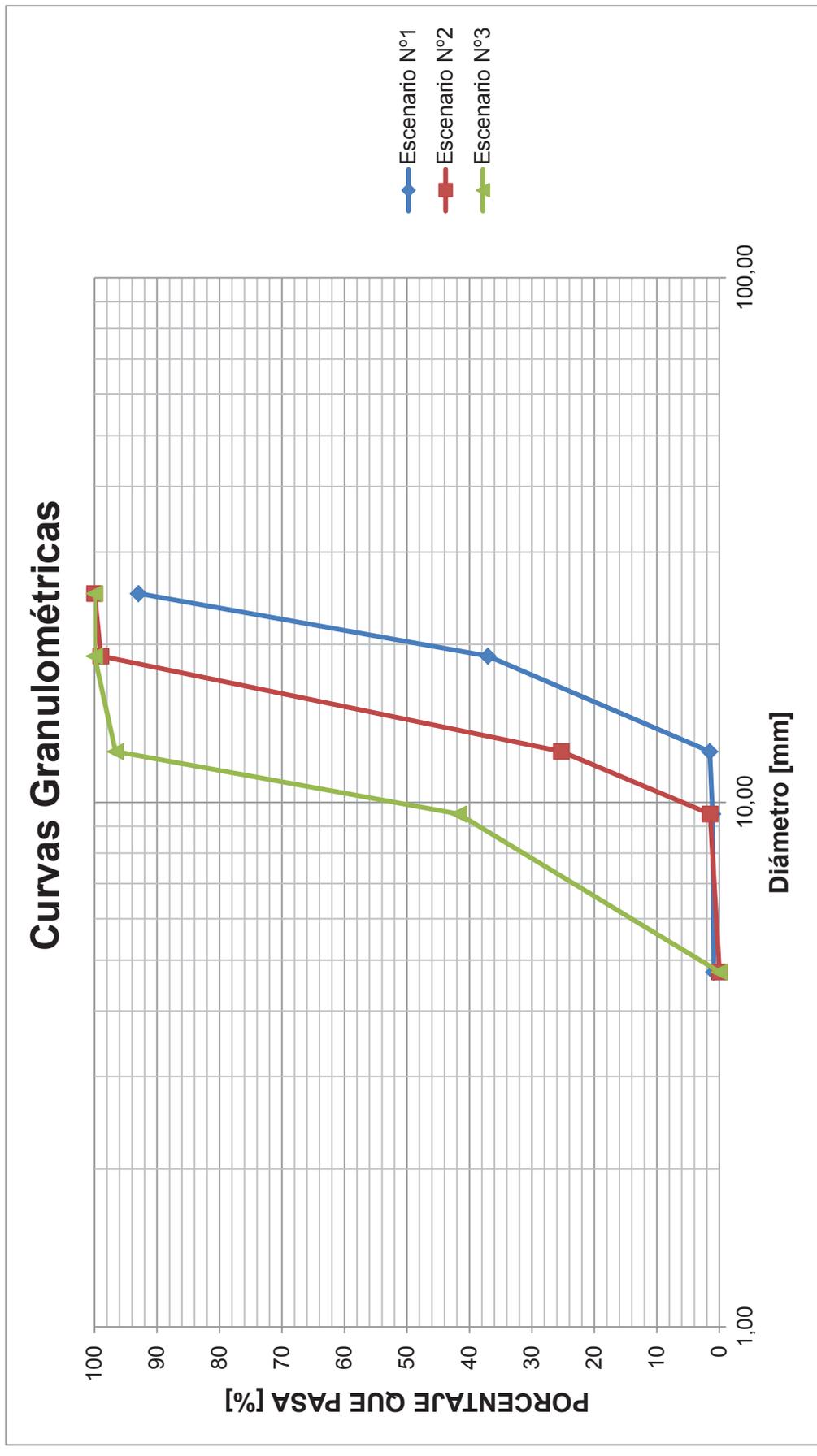
Escenario N°	Diámetro nominal material pétreo	Unidad
1	2,00	cm
2	1,50	cm
3	1,00	cm

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

En el gráfico 4.1 se muestran las curvas granulométricas correspondientes a cada uno de materiales pétreos utilizados en cada escenario.

²⁷ CELEC E.P. HIDROTOAPI. "Informe 6256.0-R-18. Presa Toachi. Hidráulica. Memoria de cálculo". 2010.

Gráfico 4.1: Curvas granulométricas de los materiales pétreos utilizados



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

En el cuadro 4.10 se presentan las principales características de los materiales pétreos, éstas fueron determinadas en las respectivas curvas granulométricas.

Cuadro 4.10: Características de los materiales pétreos

Diámetros Característicos	Escenario N°1	Escenario N°2	Escenario N°3
d_m [cm]	2,04	1,47	0,99
d_{85} [cm]	2,40	1,76	1,18
d_{90} [cm]	2,47	1,81	1,21

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Para la obtención de los materiales utilizados en la investigación se recurrió al informe del Análisis del material pétreo realizado en la EPN en la cuarta fase de investigación, donde se recomienda las canteras en las cuales se encuentran los materiales granulares ideales para la investigación.

4.5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan las diferencias porcentuales entre los caudales experimentales ensayados y los propuestos en los diferentes escenarios. Se puede notar que se tiene una diferencia porcentual máxima del 5,4 %.

Cuadro 4.11: Comparación de caudales propuestos vs. Ensayados, Escenario N°1

Código	Escenario N°1		
	Q Propuesto	Q Experimental	Diferencia Porcentual
	[l/s] Modelo	[l/s] Modelo	%
A	14,14	14,95	5,4
B	28,28	28,26	-0,1
C	39,6	40,21	1,5
D	56,57	56,51	-0,1
E	67,88	68,63	1,1

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Cuadro 4.12: Comparación de caudales propuestos vs. Ensayados, Escenario N°2

Código	Escenario N°2		
	Q Propuesto	Q Experimental	Diferencia Porcentual
	[l/s] Modelo	[l/s] Modelo	%
A	14,14	14,17	0,2
B	28,28	28,33	0,2
C	45,25	45,3	0,1
D	56,57	57,02	0,8
E	67,88	68,4	0,8

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Cuadro 4.13: Comparación de caudales propuestos vs. Ensayados, Escenario N°3

Código	Escenario N°3		
	Q Propuesto	Q Experimental	Diferencia Porcentual
	[l/s] Modelo	[l/s] Modelo	%
A	14,14	14,24	0,7
B	28,28	28,53	0,9
C	45,25	45,3	0,1
D	56,57	57,28	1,2
E	67,88	68,06	0,3

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Basándose en los resultados obtenidos en los levantamientos topográficos realizados con la estación total a los fosos formados después de cada prueba, se grafican los mismos en AutoCad Civil 3D, obteniendo curvas de nivel de cada foso, para posteriormente determinar los valores de la máxima profundidad (derecha e izquierda), la distancia desde el pie de los vertederos de excesos hasta el punto de máxima socavación (derecha e izquierda), el ancho y la longitud del foso.

Cuadro 4.14: Resultados experimentales Escenario N°1

ESCENARIO N°1					
Q_{MODELO} [l/s]	14,954	28,260	40,212	56,510	68,627
Cota de Máxima Profundidad Derecho [m]	0,574	0,559	0,574	0,557	0,576
Cota de Máxima Profundidad Izquierdo [m]	0,574	0,539	0,558	0,566	0,562
Profundidad Derecho [m]	0,126	0,141	0,126	0,143	0,124
Profundidad Izquierdo [m]	0,126	0,161	0,142	0,134	0,138
Cota cuenco amortiguador [m]	0,814	0,855	0,890	0,945	0,975
Profundidad + Colchón de Aguas (Ys + Yo) Derecho [m]	0,240	0,296	0,316	0,388	0,399
Profundidad + Colchón de Aguas (Ys + Yo) Izquierdo [m]	0,240	0,316	0,332	0,379	0,413
Distancia Desde la Presa Hasta el Foso Derecho [m]	1,035	1,192	1,312	1,232	1,248
Distancia Desde la Presa Hasta el Foso Izquierdo [m]	1,035	1,219	1,282	1,233	1,284
Ancho del Foso [m]	0,956	1,039	1,091	1,085	1,059
Longitud del Foso [m]	0,485	0,655	0,749	0,884	0,740

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Cuadro 4.15: Resultados experimentales Escenario N°2

ESCENARIO N°2					
Q_{MODELO} [l/s]	14,174	28,328	45,300	57,020	68,399
Cota de Máxima Profundidad Derecho [m]	0,559	0,537	0,535	0,537	0,556
Cota de Máxima Profundidad Izquierdo [m]	0,559	0,534	0,524	0,517	0,523
Profundidad Derecho [m]	0,141	0,163	0,165	0,163	0,144
Profundidad Izquierdo [m]	0,141	0,166	0,176	0,183	0,177
Cota cuenco amortiguador [m]	0,808	0,855	0,915	0,935	0,980
Profundidad + Colchón de Aguas (Ys + Yo) Derecho [m]	0,249	0,318	0,380	0,398	0,424
Profundidad + Colchón de Aguas (Ys + Yo) Izquierdo [m]	0,249	0,321	0,391	0,418	0,457
Distancia Desde la Presa Hasta el Foso Derecho [m]	1,077	1,244	1,228	1,163	1,229
Distancia Desde la Presa Hasta el Foso Izquierdo [m]	1,108	1,242	1,304	1,296	1,342
Ancho del Foso [m]	1,091	1,124	1,076	1,060	0,818
Longitud del Foso [m]	0,686	0,858	0,771	0,818	0,607

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Cuadro 4.16: Resultados experimentales Escenario N°3

ESCENARIO N°3					
Q_{MODELO} [l/s]	14,241	28,532	45,300	57,275	68,059
Cota de Máxima Profundidad Derecho [m]	0,545	0,522	0,543	0,576	0,556
Cota de Máxima Profundidad Izquierdo [m]	0,542	0,538	0,508	0,505	0,534
Profundidad Derecho [m]	0,155	0,178	0,157	0,124	0,144
Profundidad Izquierdo [m]	0,158	0,162	0,192	0,195	0,166
Cota cuenco amortiguador [m]	0,810	0,858	0,915	0,948	0,975
Profundidad + Colchón de Aguas (Ys + Yo) Derecho [m]	0,265	0,336	0,372	0,372	0,419
Profundidad + Colchón de Aguas (Ys + Yo) Izquierdo [m]	0,268	0,320	0,407	0,443	0,441
Distancia Desde la Presa Hasta el Foso Derecho [m]	1,009	1,207	1,147	1,066	1,331
Distancia Desde la Presa Hasta el Foso Izquierdo [m]	1,136	1,242	1,260	1,354	1,375
Ancho del Foso [m]	1,089	1,111	0,903	0,796	0,703
Longitud del Foso [m]	0,736	0,771	0,714	0,611	0,651

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

4.6 CONCLUSIONES

- Tomando en cuenta las recomendaciones planteadas en la Fase III de la investigación, se construyeron las modificaciones en el modelo físico de la presa Toachi, que consisten en la reubicación de los vertederos de excesos de la presa hacia el eje de la misma, según la información técnica facilitada por CELEC E.P. HIDROTOAPI a la Escuela Politécnica Nacional.
- Se determinó una serie de cinco caudales, a partir del informe de revisión hidrológica de la zona del proyecto, con los cuales se obtendrán características propias en los fosos de socavación según el material pétreo

utilizado, para luego compararlas entre si y obtener el material más idóneo, según las necesidades del proyecto.

- A partir de las curvas granulométricas obtenidas se puede determinar que el tamaño del material pétreo en cada escenario es prácticamente uniforme, ya que se tamizó todo el material antes de colocar en cada cuenco, con zarandas de diámetros requeridos.
- Para la representación del material pétreo se utilizó grava de diferentes tamaños, encontrados en diversas canteras cercanas a la ciudad de Quito. Se formaron tres grupos con los mismos diámetros nominales cada uno, para la representación de las diferentes alternativas propuestas en la investigación.
- Tomando en cuenta los caudales propuestos, se realizaron las pruebas; obteniendo como resultado caudales similares, pero no iguales a los planteados, debido a pequeñas variaciones al momento de tomar las medidas con el limnómetro antes de la entrada al embalse.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE LA SOCAVACIÓN EN EL CUENCO AMORTIGUADOR AL PIE DE LA PRESA TOACHI PROVOCADO POR LOS VERTEDEROS DE EXCESOS

5.1 SOCAVACIÓN EN EL CUENCO DE MATERIAL SUELTO DISPUESTO COMO ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR EFECTO DE LA DESCARGA DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS DE LA PRESA TOACHI

El cuenco amortiguador se localiza aguas abajo de la presa Toachi, la socavación ocurre cerca del final de este cuenco y es causada por el exceso de energía presente en los chorros provenientes de los vertederos de descarga de dicha presa.

Al momento de realizar cada prueba se aseguró la presencia de un colchón de agua en el cuenco amortiguador, la altura de este colchón es de 7 cm sobre la cota del enrocado, es decir, la superficie del agua se encuentra en la cota 0,77 m. Para la investigación se utilizó ripio con tres diámetros nominales diferentes; Diseño original: $\varphi = 2,00$ cm, Alternativa 1: $\varphi = 1,50$ cm y Alternativa 2: $\varphi = 1,00$ cm; teniendo en cuenta que el peso específico del ripio es prácticamente similar a la de la roca que se va a utilizar en el prototipo. El tiempo de duración de cada prueba fue de 90 minutos, se pudo determinar mediante la observación que este es el tiempo necesario para que el movimiento del material sólido llegue a una estabilidad y así evaluar cualitativamente al foso formado.

Durante cada una de las pruebas se determinan los niveles de agua con la ayuda de cintas métricas y limnímetros, tanto en el embalse, como en el cuenco amortiguador. Una vez concluida la prueba y mediante el uso de la estación total se realiza el levantamiento topográfico de cada uno de los fosos obtenidos, posteriormente, con el programa computacional AutoCad Civil 3D se determinan

las formas que tienen los diferentes fosos y en estos se miden las principales características que influyen en la investigación.

5.1.1 CUENCO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON EL MATERIAL PÉTREO DEL DISEÑO ORIGINAL DE DIÁMETRO NOMINAL 2,0 CM

En el diseño original presentado por HIDROTOAPI EP a la Escuela Politécnica Nacional, se indica que el material pétreo que se va a utilizar en el prototipo tiene un diámetro nominal de 1,00 m, lo que en modelo físico se debe representar con grava (ripió) cuyo diámetro nominal sea de 2,00 cm, debido a que la escala en la que se construyó el modelo es 1:50.

Como se indica en el plan de pruebas en el capítulo 4, se realizaron cinco ensayos en el Escenario N°1.

- Prueba 1A, $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 264,35 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{MODELO}} = 14,95 \text{ l/s}$
- Prueba 1B, $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 499,57 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{MODELO}} = 28,26 \text{ l/s}$
- Prueba 1C, $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 710,85 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{MODELO}} = 40,21 \text{ l/s}$
- Prueba 1D, $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 998,97 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{MODELO}} = 56,51 \text{ l/s}$
- Prueba 1E, $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 1213,16 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{MODELO}} = 68,63 \text{ l/s}$

En el Anexo No. 1 se muestra la fotografía, vista en planta y cortes longitudinales y transversal de los cuencos socavados para cada caudal ensayado en el Escenario N°1.

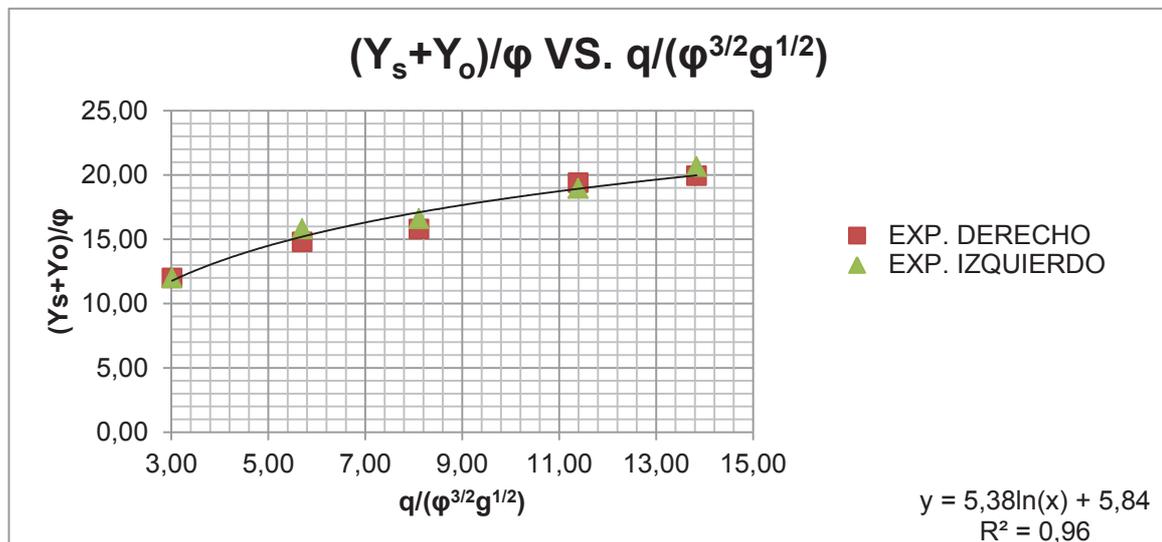
A partir de los resultados obtenidos en la experimentación, se procede a determinar los parámetros adimensionales mencionados en numeral 3.3.2. Mediante el uso de estos parámetros se puede determinar la relación existente entre el caudal ensayado y su respectiva profundidad de socavación, sin tomar en cuenta sus magnitudes.

Una vez representada la relación $(Y_s + Y_o)/\varphi$ VS. $q/(\varphi^{3/2} g^{1/2})$, se puede observar la existencia de una tendencia, constituida por la ecuación correspondiente en el gráfico 5.1. La línea de tendencia representa que la profundidad de socavación aumenta a medida que el caudal incrementa.

Cuadro 5.1: Datos experimentales y parámetros adimensionales, Escenario N°1

ESCENARIO N°1					
DATOS EXPERIMENTALES			PARÁMETROS ADIMENSIONALES		
Q [l/s]	Y _s + Y _o [m]		q/(φ ^{3/2} g ^{1/2})	(Y _s + Y _o)/φ	
	Derecho	Izquierdo		Derecho	Izquierdo
14,954	0,240	0,240	3,014	12,000	12,000
28,260	0,296	0,316	5,696	14,800	15,800
40,212	0,316	0,332	8,106	15,800	16,600
56,510	0,388	0,379	11,391	19,400	18,950
68,627	0,399	0,413	13,833	19,950	20,650

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Gráfico 5.1: Relación entre parámetros adimensionales, Escenario N°1

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

5.1.2 CUENCO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON EL MATERIAL PÉTREO ALTERNATIVO DE DIÁMETRO NOMINAL 1,5 CM

Continuando la investigación se colocó en el cuenco amortiguador material pétreo (ripi) cuyo diámetro medio es 1,50 cm. Se realizaron 5 pruebas, una con cada caudal, como se muestra a continuación.

- PRUEBA 2A, Q_{PROTOTIPO} = 250,56 m³/s; Q_{MODELO} = 14,17 l/s
- PRUEBA 2B, Q_{PROTOTIPO} = 500,77 m³/s; Q_{MODELO} = 28,33 l/s
- PRUEBA 2C, Q_{PROTOTIPO} = 800,81 m³/s; Q_{MODELO} = 45,30 l/s

- PRUEBA 2D, $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 1007,97 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{MODELO}} = 57,02 \text{ l/s}$
- PRUEBA 2E, $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 1209,14 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{MODELO}} = 68,40 \text{ l/s}$

En el Anexo No. 1 se muestra la fotografía, vista en planta y cortes longitudinales y transversal de los cuencos socavados para cada caudal ensayado en el Escenario N°2.

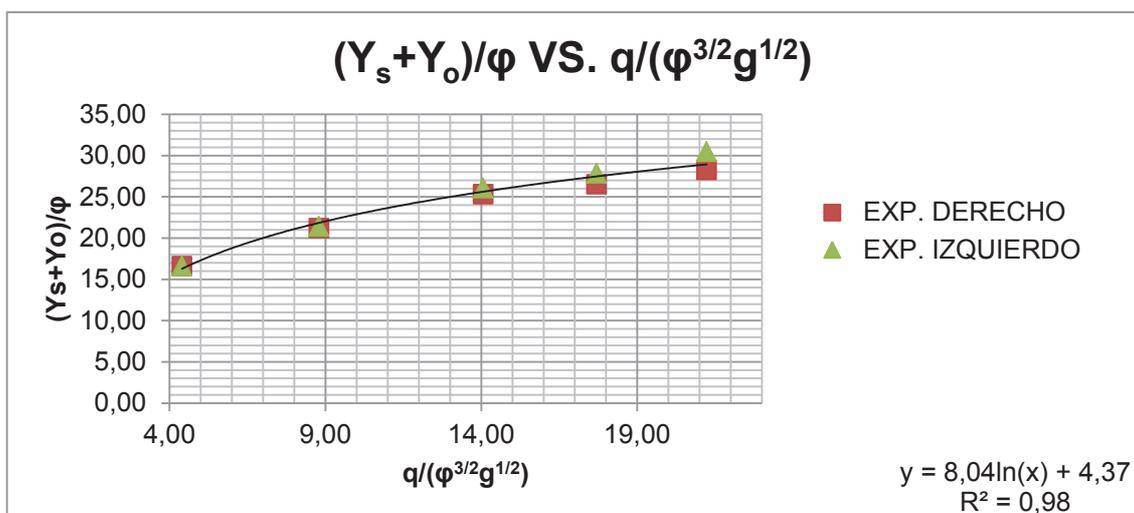
Se obtuvieron los parámetros adimensionales para la determinación de la curva $(Y_s+Y_o)/\varphi$ VS. $q/(\varphi^{3/2}g^{1/2})$. Al igual que en el escenario N°1, se puede observar la existencia de una tendencia, que de igual manera representa el incremento de la profundidad de socavación a medida que el caudal es mayor.

Cuadro 5.2: Datos experimentales y parámetros adimensionales, Escenario N°2

ESCENARIO N°2					
DATOS EXPERIMENTALES			PARÁMETROS ADIMENSIONALES		
Q [l/s]	$Y_s + Y_o$ [m]		$q/(\varphi^{3/2}g^{1/2})$	$(Y_s + Y_o)/\varphi$	
	Derecho	Izquierdo		Derecho	Izquierdo
14,174	0,249	0,249	4,399	16,600	16,600
28,328	0,318	0,321	8,791	21,200	21,400
45,300	0,380	0,391	14,059	25,333	26,067
57,020	0,398	0,418	17,696	26,533	27,867
68,399	0,424	0,457	21,227	28,267	30,467

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Gráfico 5.2: Relación entre parámetros adimensionales, Escenario N°2



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

5.1.3 CUENCO SOCAVADO GENERADO POR LA DESCARGA CON EL MATERIAL PÉTREO ALTERNATIVO DE DIÁMETRO NOMINAL 1.0 CM

Para la realización de las pruebas restantes se colocó en el cuenco amortiguador material pétreo de diámetro nominal igual a 1,00 cm. Basándose en el plan de pruebas, se realizaron cinco ensayos como se muestra a continuación.

- PRUEBA 3A, $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 251,76 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{MODELO}} = 14,24 \text{ l/s}$
- PRUEBA 3B, $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 504,38 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{MODELO}} = 28,33 \text{ l/s}$
- PRUEBA 3C, $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 800,81 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{MODELO}} = 45,30 \text{ l/s}$
- PRUEBA 3D, $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 1012,49 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{MODELO}} = 57,28 \text{ l/s}$
- PRUEBA 3E, $Q_{\text{PROTOTIPO}} = 1203,12 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{MODELO}} = 68,06 \text{ l/s}$

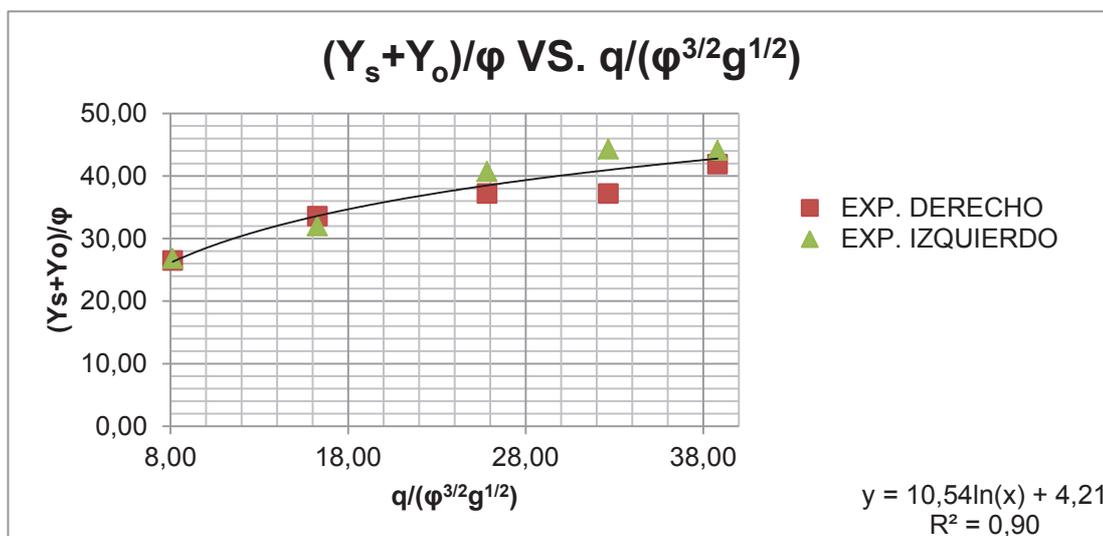
En el Anexo No.1 se muestran las fotografías de los cuencos socavados junto con las respectivas vistas en planta, cortes longitudinales y transversales, para el Escenario N°3.

En el gráfico 5.3 se puede observar, que a diferencia de las gráficas obtenidas anteriormente con los materiales pétreos de 2,00 cm y 1,50 cm, existe una dispersión mayor en los datos, a pesar de esto se logra una tendencia cuyo factor de correlación es igual a 0,90, lo que se considera aceptable debido al análisis que se está realizando.

Cuadro 5.3: Datos experimentales y parámetros adimensionales, Escenario N°3

ESCENARIO N°3					
DATOS EXPERIMENTALES			PARÁMETROS ADIMENSIONALES		
Q [l/s]	Y _s + Y _o [m]		q/(φ ^{3/2} g ^{1/2})	(Y _s + Y _o)/φ	
	Derecho	Izquierdo		Derecho	Izquierdo
14,241	0,265	0,268	8,120	26,500	26,800
28,532	0,336	0,320	16,267	33,600	32,000
45,300	0,372	0,407	25,827	37,200	40,700
57,275	0,372	0,443	32,644	37,200	44,300
68,059	0,419	0,441	38,803	41,900	44,100

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Gráfico 5.3: Relación entre parámetros adimensionales, Escenario N°3

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

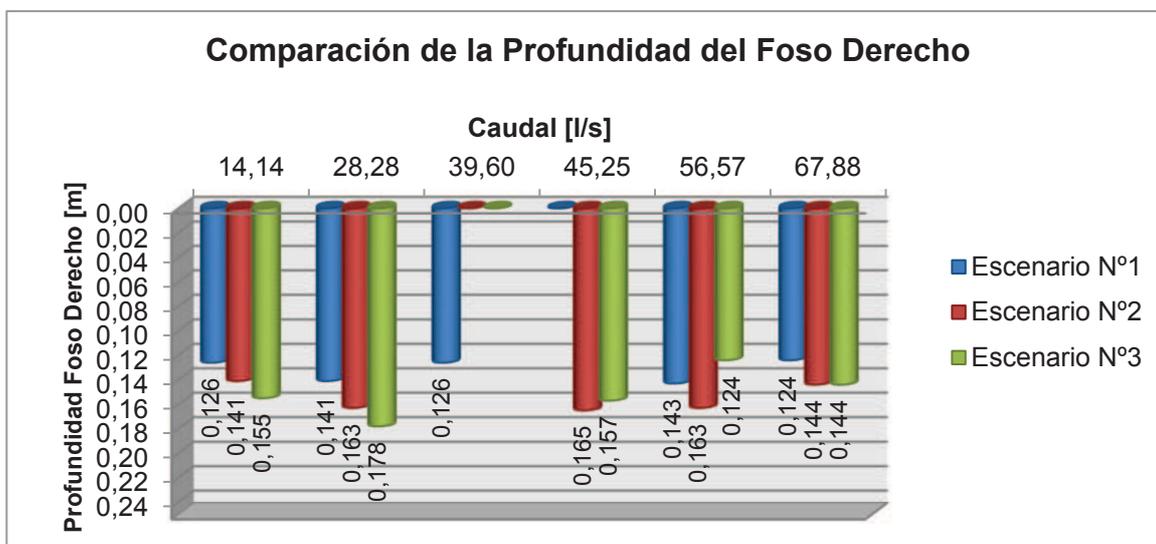
Se observa una tendencia creciente entre las profundidades de socavación adimensionales obtenidas a partir de cada caudal adimensional, en los tres escenarios planteados, cuyos coeficientes de correlación son muy cercanos a la unidad, lo que indica que el ajuste de los datos, en sus respectivas curvas, es muy preciso.

5.2 ANÁLISIS CUALITATIVO DE LAS DIFERENCIAS EN LA GEOMETRÍA DEL CUENCO SOCAVADO SEGÚN LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS

Se puede notar claramente que para un mismo caudal, las características geométricas de los fosos socavados varían de acuerdo al diámetro del material pétreo presente en el cuenco amortiguador, esto se debe a que la grava (ripió) de menor tamaño tendrá una mayor facilidad para ser removida por efecto de los chorros provenientes de los vertederos de excesos debido a que el peso de la partícula es menor. Analizando los resultados obtenidos en la presente investigación, se realiza una comparación entre las características que poseen los fosos socavados en función del diámetro del material presente en el cuenco amortiguador y el caudal que circula en cada ensayo.

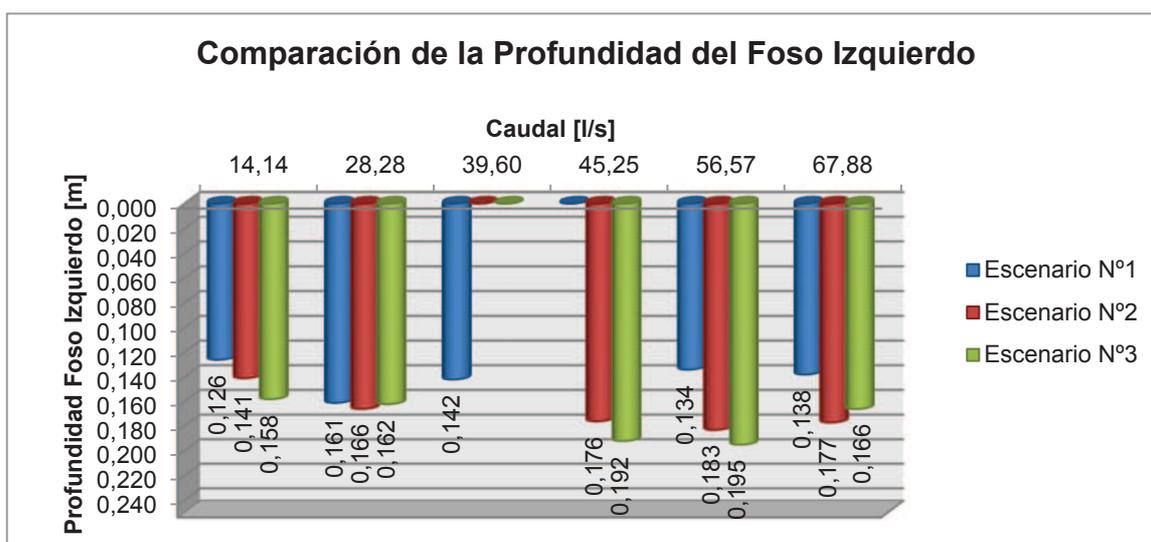
En los gráficos 5.4 y 5.5 se observan las profundidades de máxima socavación derecha e izquierda, respectivamente, en función del caudal. En la zona derecha se observa que la mayor profundidad corresponde a un caudal de 28,28 l/s, mientras que en la izquierda la profundidad es superior y pertenece a un caudal de 56,57 l/s, ambas se obtienen en presencia del material pétreo de menor diámetro.

Gráfico 5.4: Profundidades del foso derecho



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

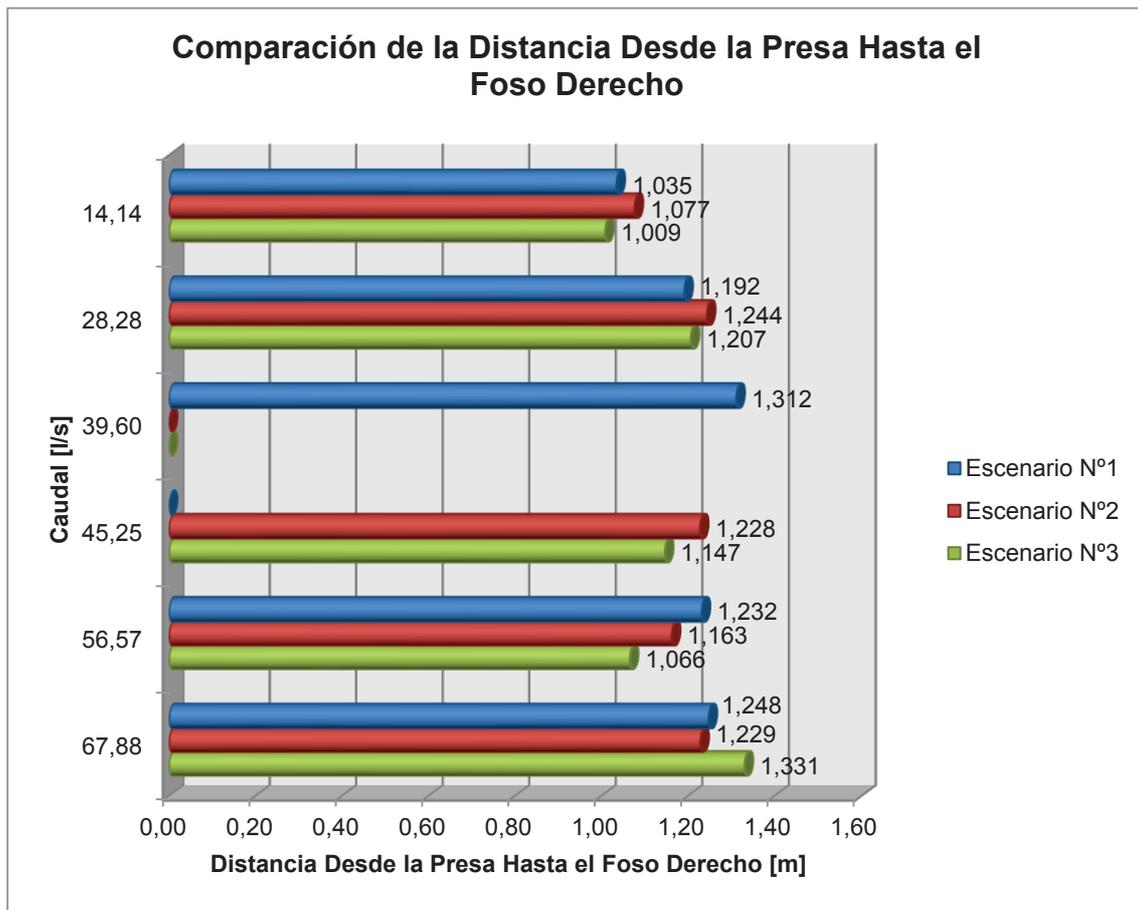
Gráfico 5.5: Profundidades del foso izquierdo



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

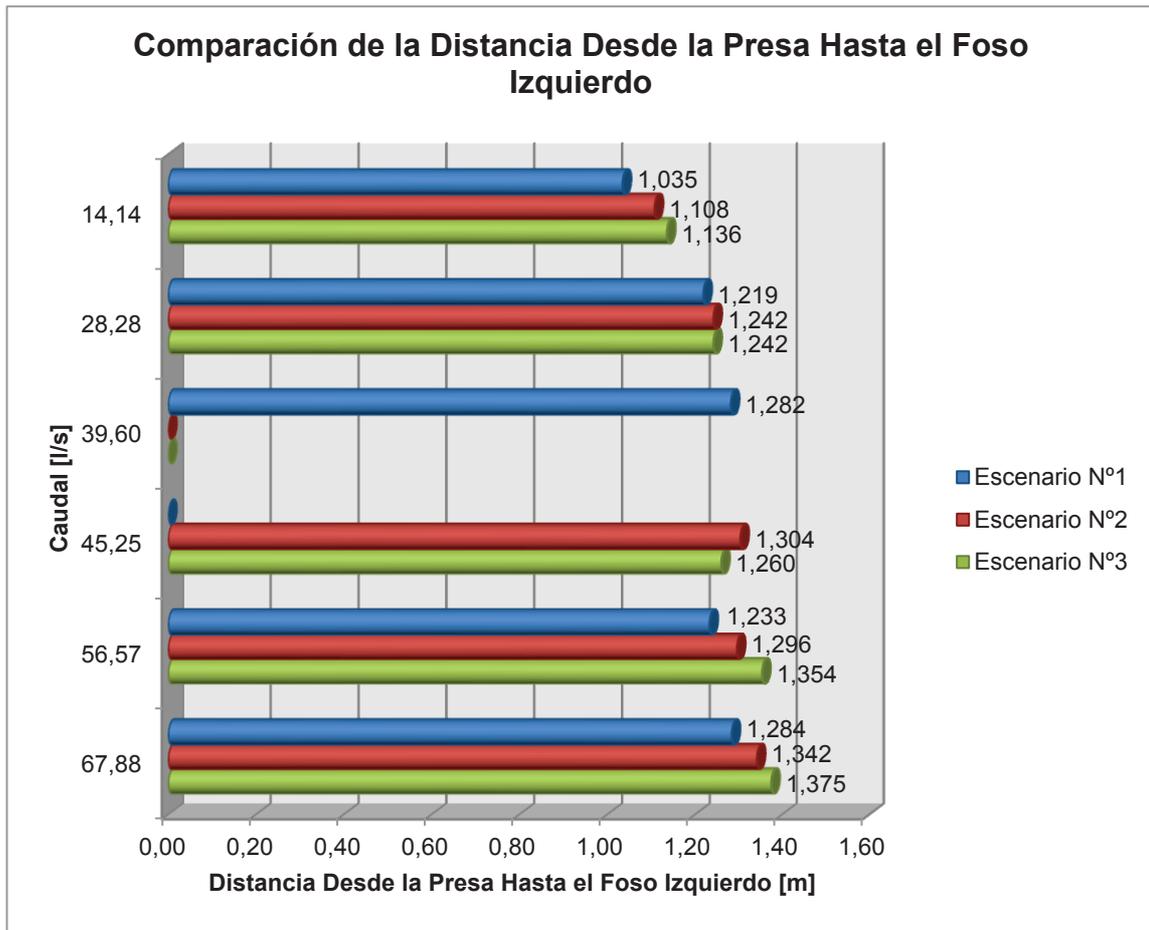
En los gráficos 5.6 y 5.7 se muestran las distancias que existen entre el pie de los vertederos de excesos y los puntos de máxima socavación, con respecto al caudal. Se puede observar que en ambos casos los puntos más distantes son los correspondientes al caudal 67,88 l/s, con un diámetro de material pétreo en el cuenco amortiguador igual a 1,00 cm.

Gráfico 5.6: Distancias desde la presa hasta el foso derecho



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

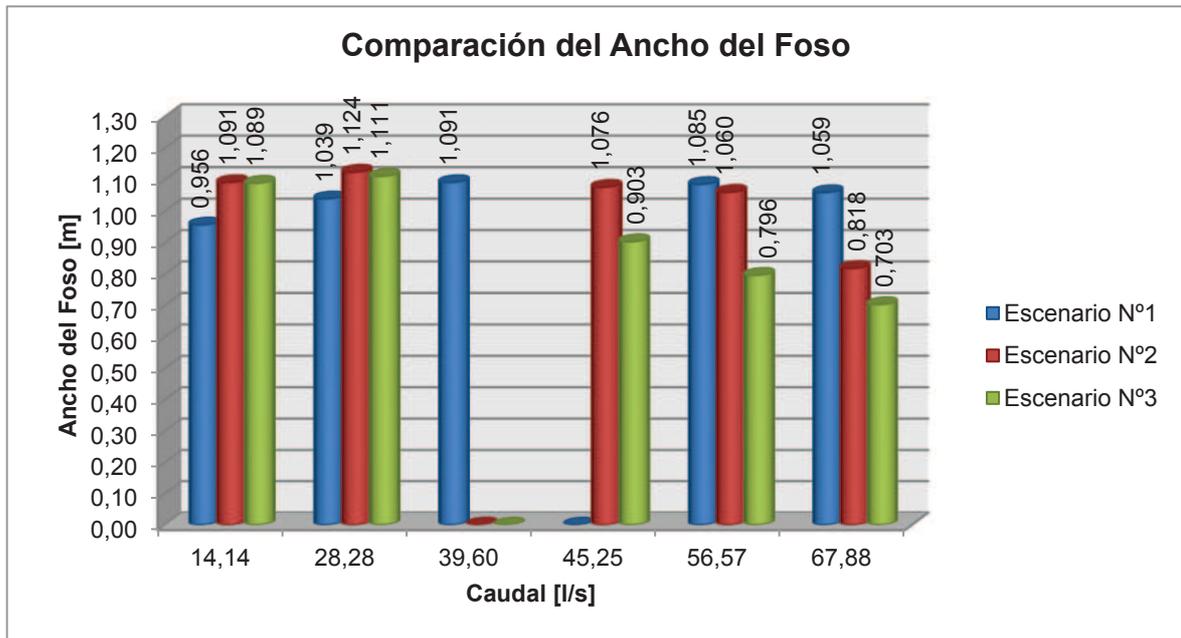
Gráfico 5.7: Distancias desde la presa hasta el foso izquierdo



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

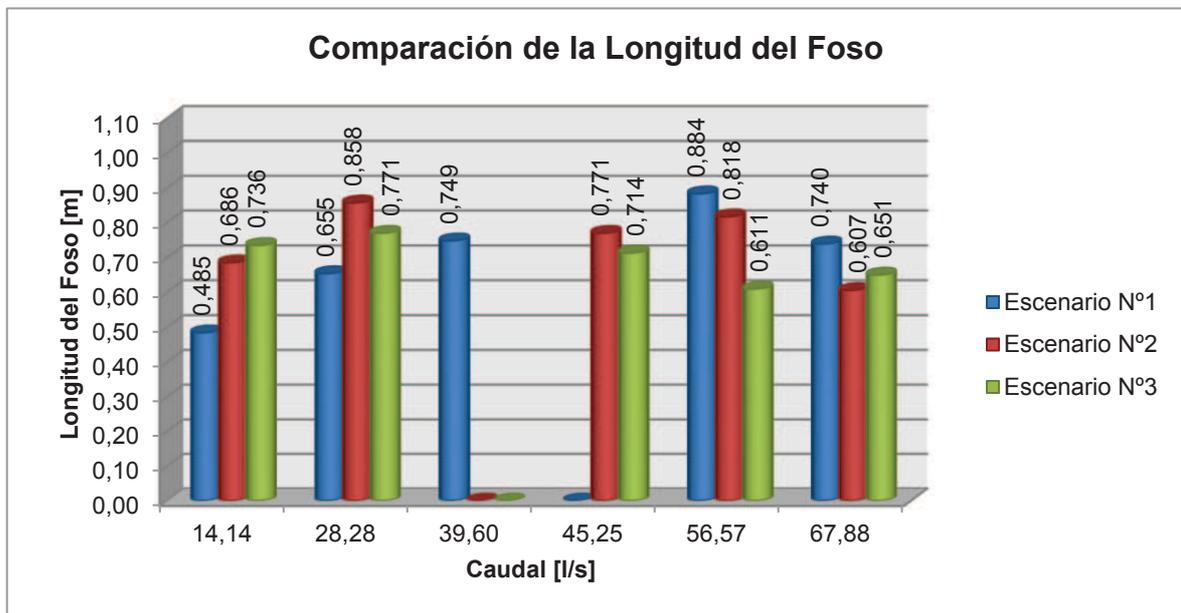
En los gráficos 5.8 y 5.9 se establecen las comparaciones entre ancho-caudal y largo-caudal, respectivamente. Se puede observar que el mayor ancho se obtiene con un caudal de 28,28 l/s en presencia de un material pétreo de diámetro igual a 1,50 cm, y la longitud que sobresale, es la correspondiente al caudal 56,57 l/s con un material de diámetro 2,00 cm.

Gráfico 5.8: Anchos de los fosos



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Gráfico 5.9: Longitudes de los fosos



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

5.3 DETERMINACIÓN TEÓRICA DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN Y COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

Utilizando las ecuaciones empíricas desarrolladas por diversos investigadores, se determina la profundidad $Y_o + Y_s$, es decir, la diferencia entre la superficie libre del agua en el cuenco amortiguador y el punto de máxima socavación en el lecho rocoso para cada caudal ensayado en función del material presente en el cuenco. Las ecuaciones planteadas se obtuvieron a partir de estudios realizados en modelos físicos y en prototipo.

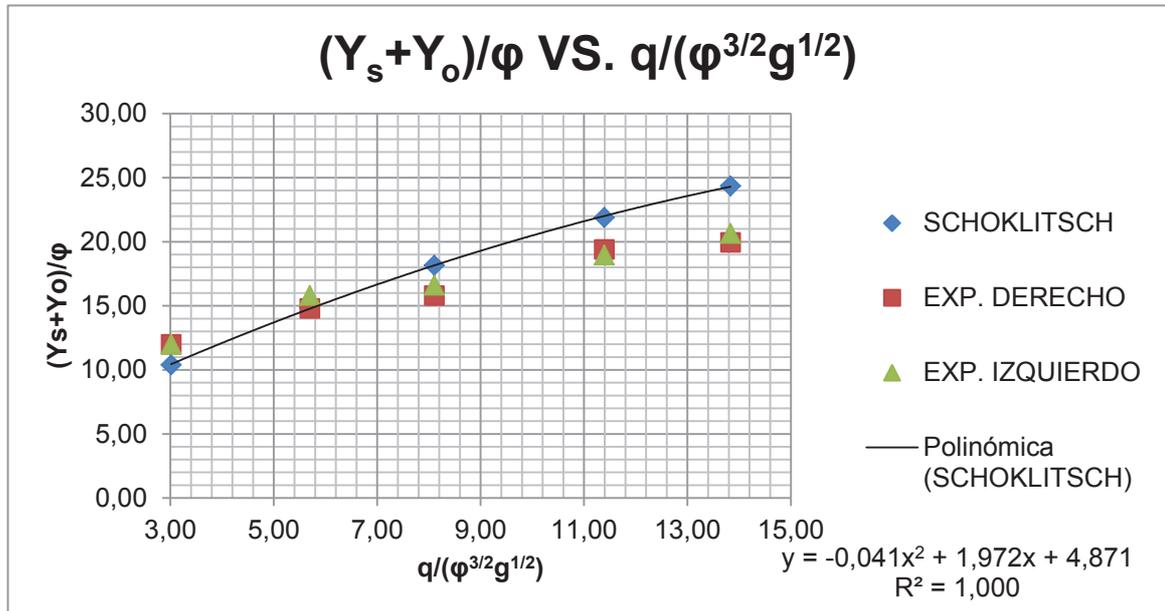
A partir de las ecuaciones mencionadas en el numeral 2.2.2. del segundo capítulo, se calcula la profundidad $Y_o + Y_s$ en función de los datos geométricos, del tamaño del material pétreo y los resultados obtenidos experimentalmente.

En el Anexo No.2 se presentan los resultados obtenidos en la experimentación y los calculados con las ecuaciones empíricas, así como la comparación entre éstos, en cada uno de los escenarios.

En base a los resultados obtenidos en la comparación, se determina que en los tres escenarios planteados, las ecuaciones que más se ajustan a los resultados experimentales son las propuestas por Schoklitsch (1932) y Machado (1980), con las cuales se obtienen mejores resultados con respecto a los obtenidos con las demás ecuaciones propuestas. En los tres casos se escogieron las fórmulas antes mencionadas debido a que los errores porcentuales obtenidos son los menores para la mayoría de los casos.

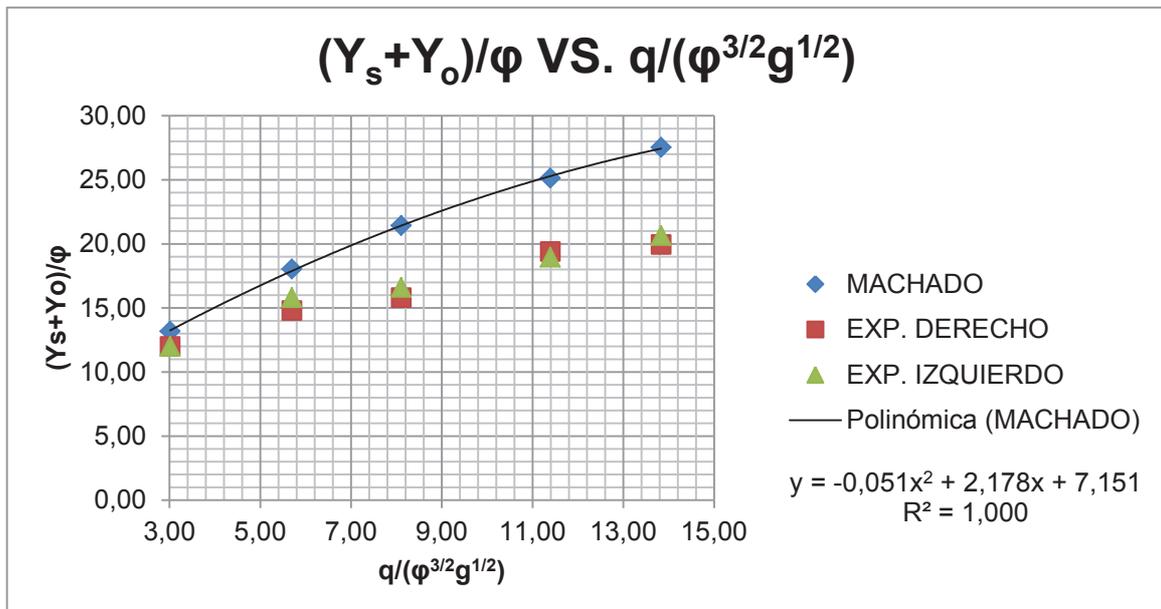
En los gráficos que se presentan a continuación se comparan las ecuaciones antes mencionadas con los valores determinados experimentalmente, para cada escenario, de una forma adimensional.

Gráfico 5.10: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Schoklitsch, Escenario N°1



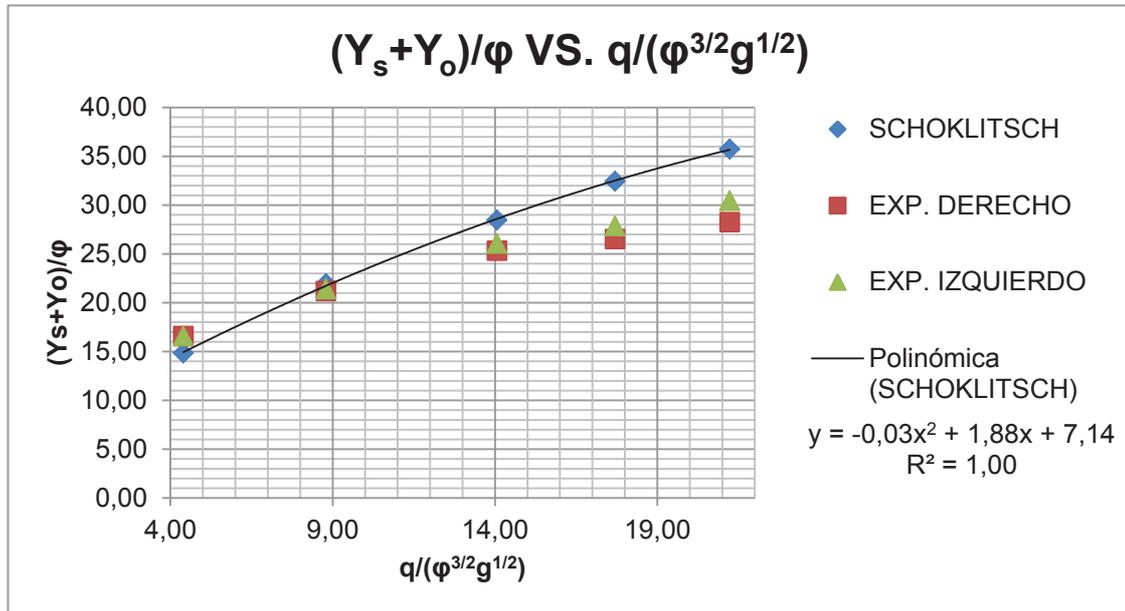
Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Gráfico 5.11: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Machado, Escenario N°1



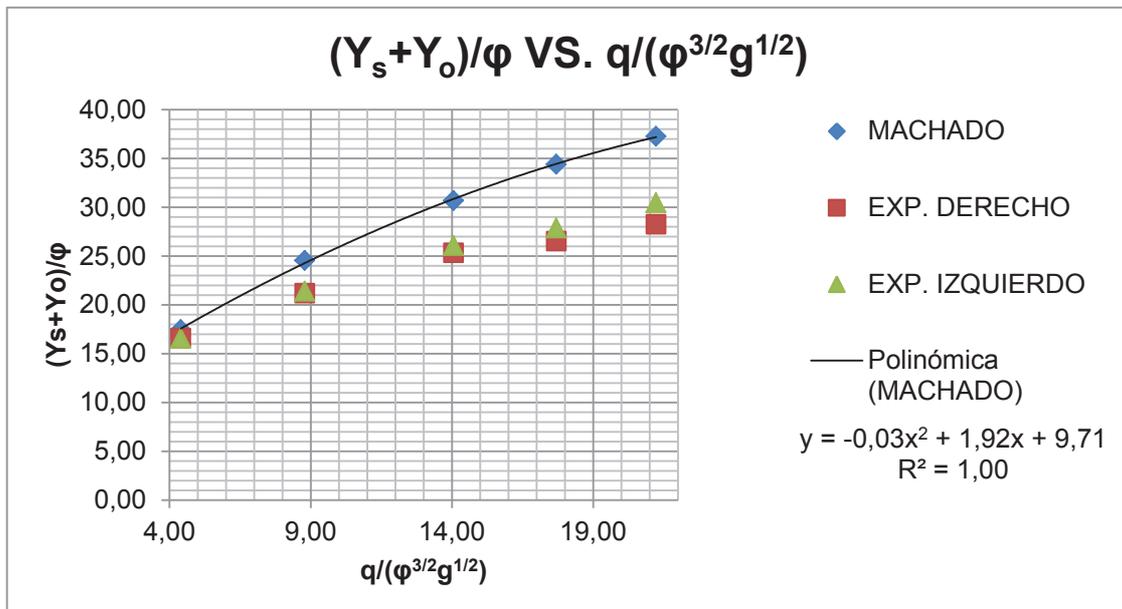
Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Gráfico 5.12: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Schoklitsch, Escenario N°2



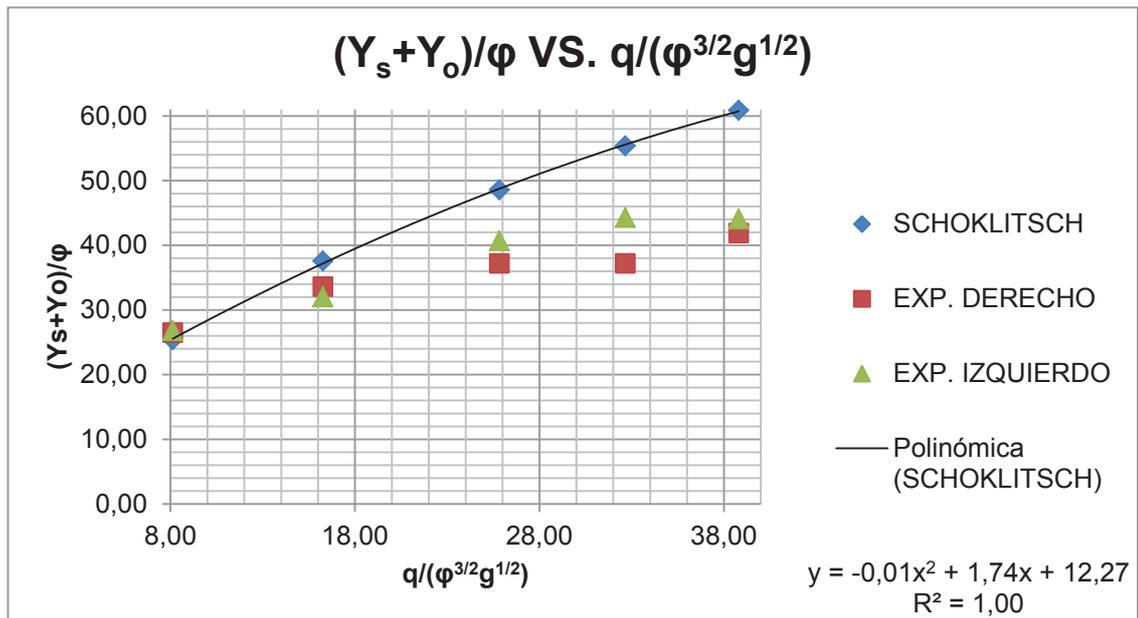
Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Gráfico 5.13: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Machado, Escenario N°2



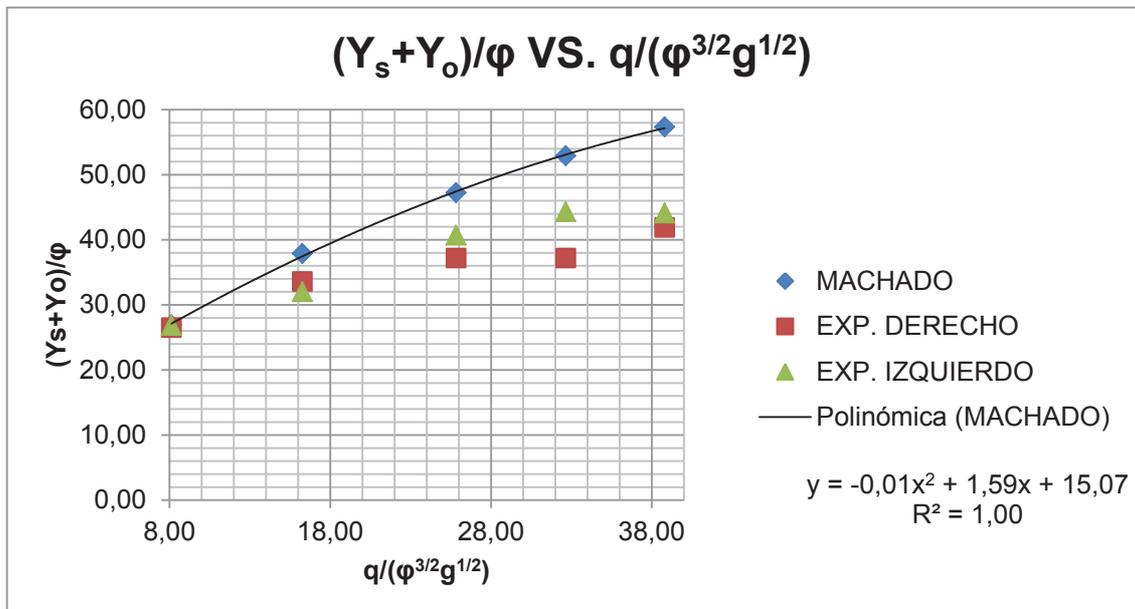
Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Gráfico 5.14: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Schoklitsch, Escenario N°3



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Gráfico 5.15: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Machado, Escenario N°3



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Al comparar, en los gráficos adimensionales, los resultados determinados experimentalmente y los obtenidos con las ecuaciones propuestas en la literatura técnica, se puede establecer que las profundidades alcanzadas en los ensayos son menores que las establecidas con las fórmulas empíricas en la mayoría de los casos, esto se debe a que los investigadores que propusieron las ecuaciones antes planteadas, poseían condiciones distintas, tanto en la geometría del cuenco de disipación de energía, como en la transición hacia el río, con respecto a las que se presentan en el modelo de la presa Toachi, es por esto que las profundidades de agua consideradas en el cuenco son distintas.

5.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD (TEORÍA DE ERRORES)

En el proceso de observación de un fenómeno físico se obtiene información que debe ser procesada, tomando en cuenta la teoría de errores que consiste en aproximar los datos obtenidos experimentalmente a los reales, disminuyendo el grado de incertidumbre en el observador cuando los datos obtenidos están, de alguna manera, dispersos.

En un ensayo experimental, las observaciones efectuadas no son absolutamente exactas debido a la incidencia de diferentes tipos de errores que se presentan. Los errores pueden clasificarse en dos: errores sistemáticos y errores fortuitos o casuales.

- Errores sistemáticos: Pueden deberse a las siguientes causas: instrumentales, personales y externas. Se deben a defectos o imprecisión del aparato utilizado, también tienen como base la apreciación del observador. Se evitan estos errores realizando cuidadosamente las lecturas, en forma repetida y por varios observadores.
- Errores fortuitos o casuales: Son resultados de las probabilidades, y su efecto se reduce haciendo un gran número de observaciones.

A veces no se mide una cantidad directamente, sino por relación con otras cantidades. Si una cantidad es calculada mediante la utilización de datos

determinados experimentalmente, dicha cantidad va a tener un cierto error, por lo que se recurre a la teoría de la propagación de errores.²⁸

En la presente investigación se utiliza la ecuación de la forma $Q = K h_v^n$ para el cálculo de caudales mediante el uso de un vertedero triangular. El caudal Q se calcula a partir de la determinación de la carga hidráulica h_v que actúa sobre el vértice del vertedero, por cuanto es correcto utilizar la teoría de la propagación de errores.

Dentro de esta teoría se encuentra la determinación de errores en funciones de una variable, que se representa de la siguiente forma.²⁹

Si se tiene una función,

$$y = K x^a \quad (5.1)$$

El error relativo será:

$$\frac{\Delta y}{\bar{y}} = a \frac{\Delta x}{\bar{x}} \quad (5.2)$$

Aplicando esta teoría a la ecuación del vertedero triangular se tiene:

$$\frac{\Delta Q}{\bar{Q}} = n \frac{\Delta h_v}{\bar{h}_v} \quad (5.3)$$

Donde,

ΔQ = Error efectivo del caudal

\bar{Q} = Valor medio del caudal

n = Coeficiente adimensional

Δh_v = Error efectivo de la carga sobre el vertedero

\bar{h}_v = Valor medio de la carga sobre el vertedero

²⁸ "Metodología para procesar datos experimentales". Universidad del Cauca. Departamento de Hidráulica

²⁹ Zúñiga, J. "Técnica experimentales de Física General". 2003/2004

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \text{Error relativo del caudal, } \varepsilon_Q$$

En la experimentación se ha determinado que:

$$\overline{h_v} = 0,2318 \text{ m}$$

$$n = 2,414$$

En el tanque de abastecimiento del modelo de la presa Toachi se tiene una gran perturbación al momento en que el caudal ingresa, es por esto que se coloca una pantalla uniformizadora aguas arriba del vertedero de aforo (triangular), su función es estabilizar el flujo que ingresa al canal de aproximación.

Durante la observación se pueden notar pequeñas ondulaciones en la superficie del agua en el canal de ingreso al vertedero, debido a que la pantalla uniformizadora no estabiliza totalmente al flujo. A partir de esto, se considera que el error efectivo de la carga sobre el vertedero Δh_v es aproximadamente igual a 1 cm.

Tomando en cuenta las consideraciones planteadas se tiene:

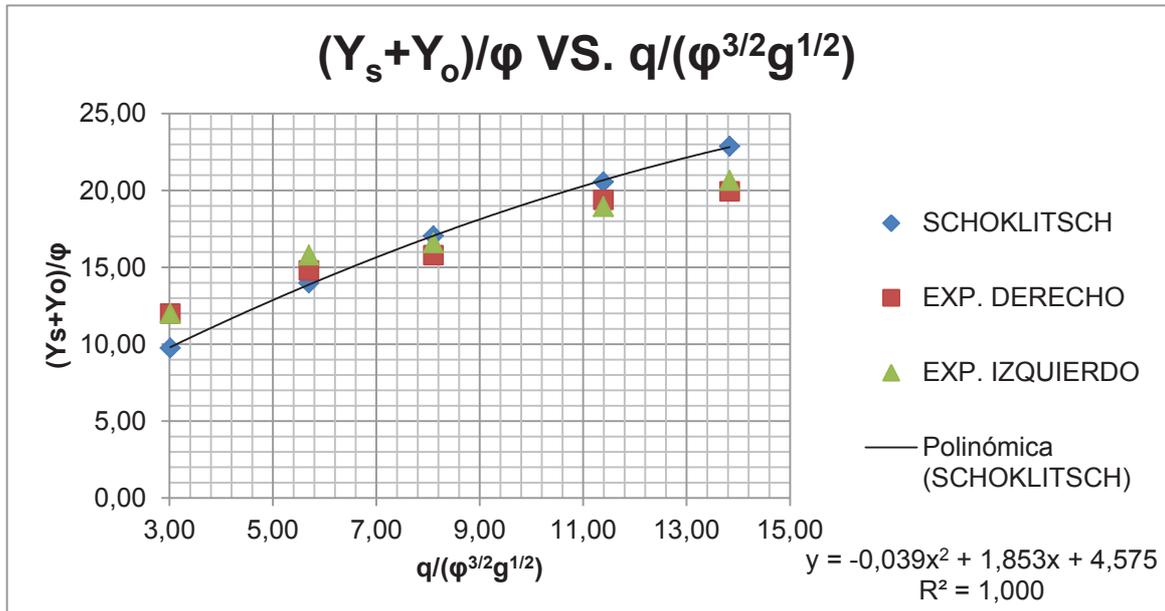
$$\varepsilon_Q = n \frac{\Delta h_v}{\overline{h_v}} = 2,414 \frac{0,01}{0,2318} = 0,104$$

$$\varepsilon_Q \% = 10,4 \%$$

Tomando en cuenta el error en el caudal que ingresa al embalse, se procede a estimar el nuevo valor del caudal Q. Para esto, se determina que las lecturas realizadas con el limnómetro en el canal de aproximación al vertedero de aforo triangular son mayores a las esperadas, por lo que los caudales corregidos deberán ser menores, es por esto que el nuevo valor del caudal Q va a ser igual al 89,6 % del medido experimentalmente.

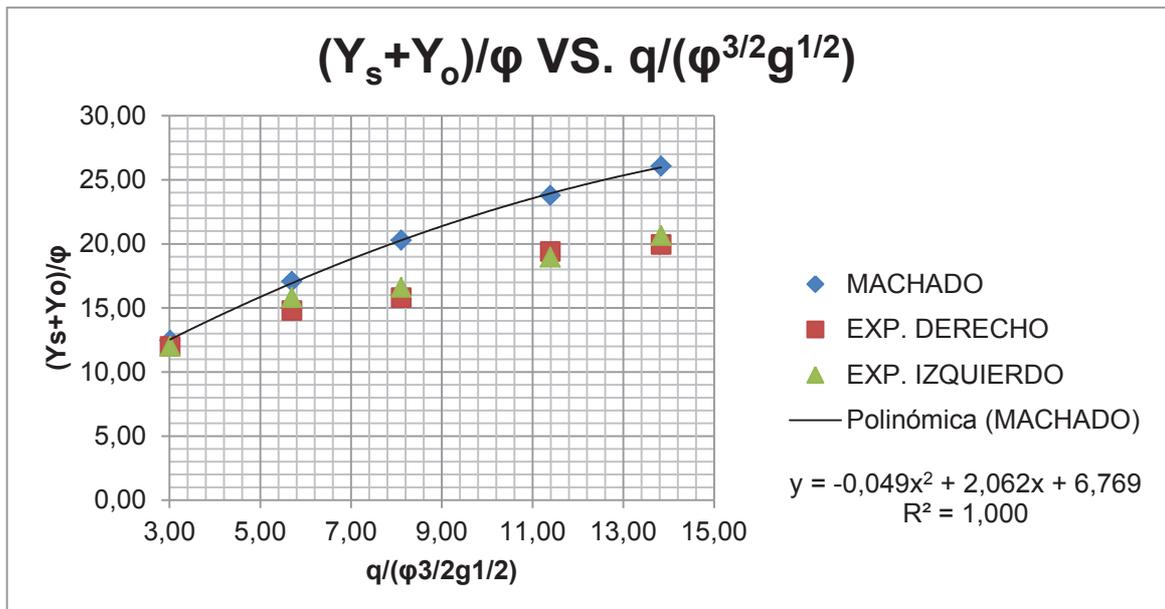
Una vez determinados los nuevos caudales, se recalcula los valores de la profundidad de socavación con las diferentes ecuaciones planteadas, pudiendo determinar que las fórmulas de los autores mencionados en el numeral 5.3, corresponden también, en este caso, a las que poseen un mejor ajuste con respecto a los resultados experimentales. Obteniendo así los siguientes gráficos:

Gráfico 5.16: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Schoklitsch utilizando el caudal corregido, Escenario N°1



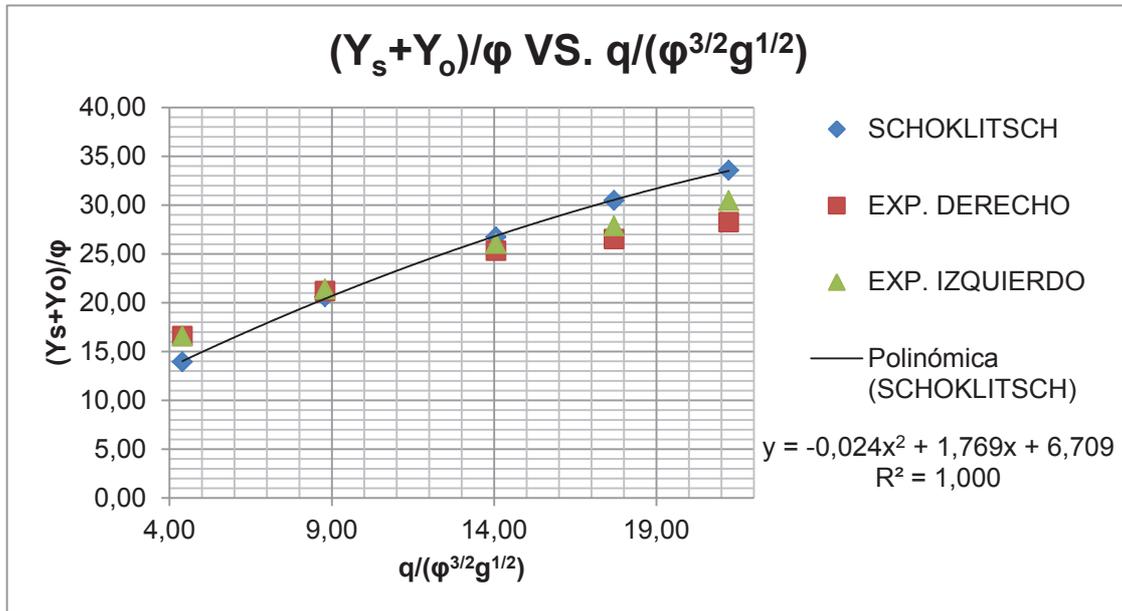
Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Gráfico 5.17: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Machado utilizando el caudal corregido, Escenario N°1



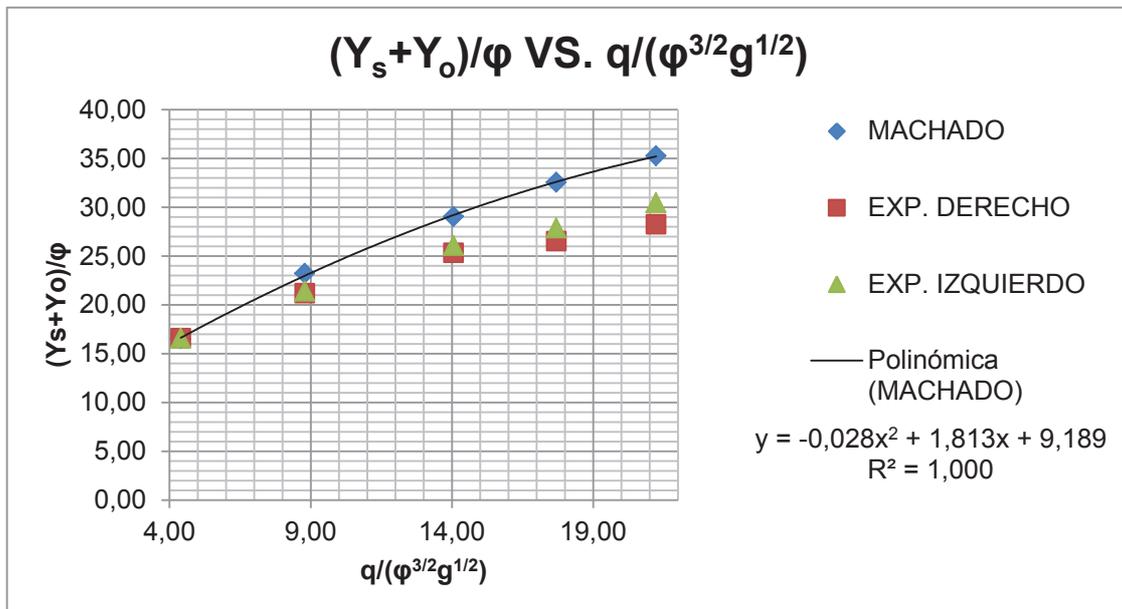
Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Gráfico 5.18: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Schoklitsch utilizando el caudal corregido, Escenario N°2



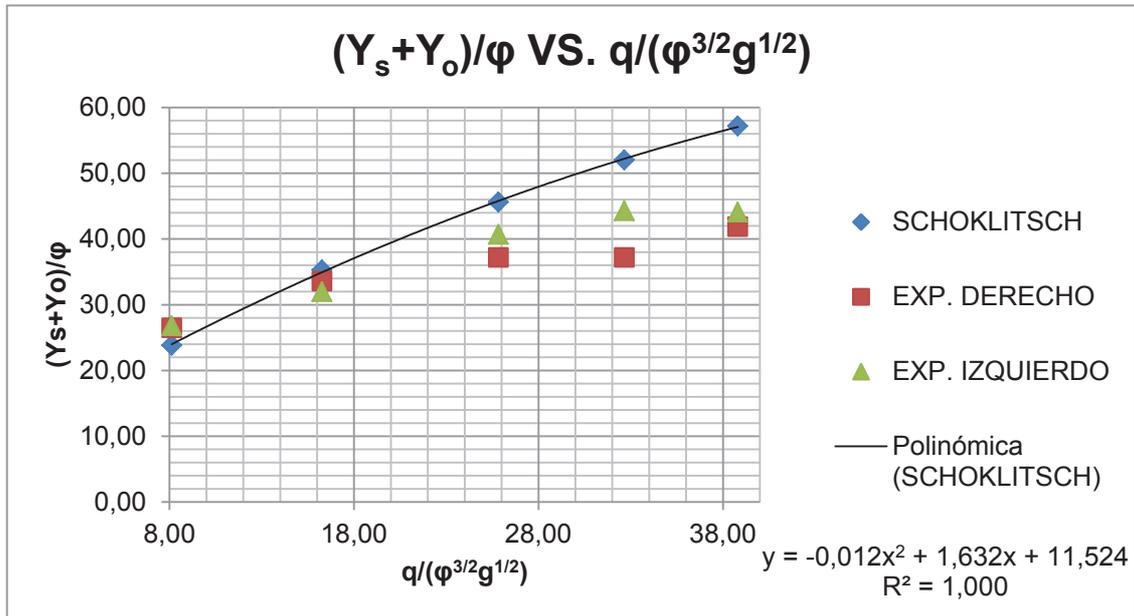
Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Gráfico 5.19: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Machado utilizando el caudal corregido, Escenario N°2



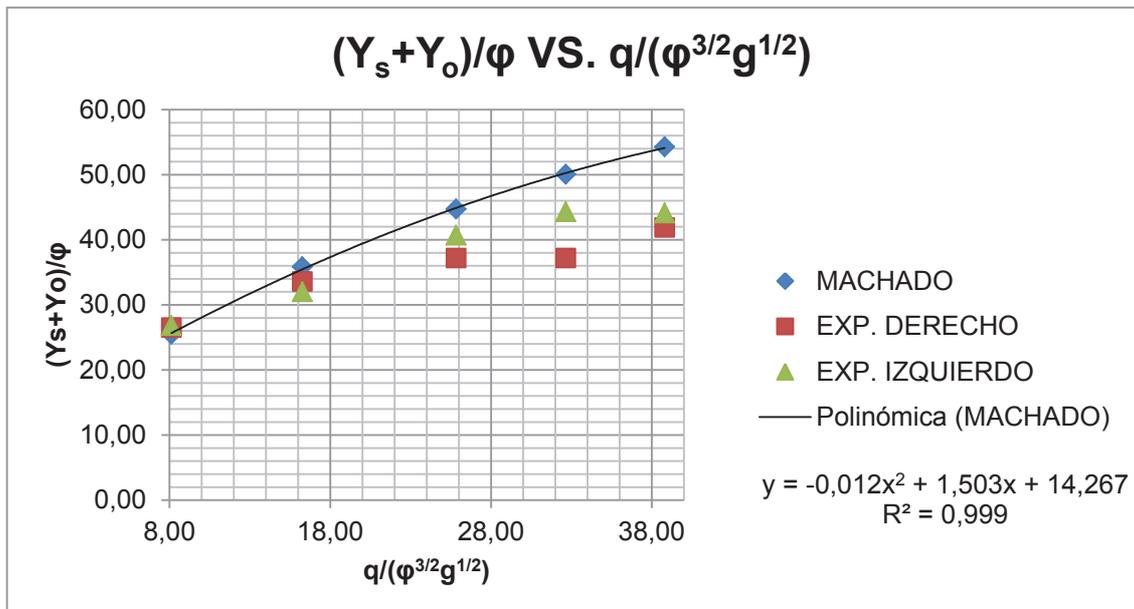
Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Gráfico 5.20: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Schoklitsch utilizando el caudal corregido, Escenario N°3



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Gráfico 5.21: Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos con la ecuación de Machado utilizando el caudal corregido, Escenario N°3



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

5.5 CONCLUSIONES

- Después de realizar todas las pruebas, se procede al levantamiento topográfico de cada foso socavado, obteniendo curvas de nivel y las características principales de cada foso para cada caudal ensayado, en cada escenario.
- En condiciones normales de operación del cuenco amortiguador en el prototipo, antes de la descarga de los vertederos de excesos de la presa, se tiene un colchón de agua. De manera que, antes de realizar cada ensayo se asegura la presencia de dicho colchón en el cuenco del modelo, para que las condiciones sean similares a las que se tienen en la realidad.
- Se puede notar claramente la presencia de una tendencia en el incremento de la profundidad de socavación con respecto al caudal en el análisis que se realiza con los parámetros adimensionales, estas líneas de tendencia tienen coeficientes de correlación muy cercanos a uno, por lo tanto, el ajuste de los datos en sus respectivas curvas es muy preciso.
- A partir de la comparación entre las profundidades de socavación obtenidas para todas las pruebas realizadas, se puede determinar que la máxima socavación no se consigue con el mayor caudal. Se observó que la mayor profundidad se obtiene con el penúltimo caudal ensayado (56,57 l/s), en el escenario N°3, es decir, con un material pétreo en el cuenco amortiguador correspondiente a un diámetro nominal igual a 1 cm.
- Se determinó que los puntos de máxima socavación más alejados de la presa corresponden a los obtenidos con los caudales mayores en el escenario N°3.
- A partir de las comparaciones realizadas entre las profundidades de socavación experimentales y teóricas, se puede observar que dos ecuaciones, de las onces propuestas, son las que tienen menores diferencias porcentuales, con respecto a las obtenidas en los ensayos.
- Al momento de medir los caudales que ingresan al embalse, se observan pequeñas ondulaciones en el canal de aproximación al vertedero de aforo, por lo que la medida tomada con el limnómetro tiene un cierto error que de forma directa afecta al valor del caudal, es por esto que se recurre a la

teoría de errores con la cual se determinó que el error efectivo del caudal es igual a 10,4 %. Es así que las profundidades de socavación determinadas con las ecuaciones empíricas están sujetas a una variación, ya que se encuentran en función del caudal.

- Al momento de realizar las correcciones en los caudales, se tienen nuevas comparaciones entre las profundidades de socavación experimentales y las teóricas, en donde se puede observar que las nuevas profundidades obtenidas con las ecuaciones empíricas son menores que las anteriormente determinadas y, por ende, las diferencias porcentuales con respecto a las experimentales son menores.

5.6 RECOMENDACIONES

- La determinación del valor del caudal que ingresa al embalse debe ser lo más precisa posible, debido a que las pequeñas variaciones en éste, influirán en el valor de la profundidad de socavación calculada con las ecuaciones empíricas.
- Al momento de realizar el levantamiento topográfico de los fosos socavados, se debe dar mayor importancia a la toma de los puntos más relevantes (puntos más bajos, altos, etc.), debido a que la estación total tiene una gran precisión y se obtendrán los valores exactos de estos puntos, los cuales son de gran importancia para el desarrollo de la investigación.

CAPÍTULO 6

ELABORACIÓN DE UNA HOJA DE CÁLCULO PARA LA EVALUACIÓN DE LA PROFUNDIDAD MÁXIMA DE SOCAVACIÓN

Para la determinación de la máxima socavación en el cuenco amortiguador, después de la acción de los chorros provenientes de los vertederos de excesos de la presa, se utilizan diversas ecuaciones empíricas. Las fórmulas toman en cuenta varios parámetros, por lo que es necesario sistematizar el proceso de cómputo. En la presente investigación se elaboró una hoja de cálculo digital, en la cual se determinan las profundidades máximas de socavación con diversas ecuaciones, a partir de estos resultados, el diseñador puede tener un criterio para definir las dimensiones de un cuenco de disipación de energía al pie de una presa. Se adjunta en el Anexo No. 4 digital, la hoja de cálculo mencionada.

Las fórmulas más conocidas para la determinación de la socavación son las mencionadas en el numeral 2.2.2 del Capítulo 2.

En el cuadro 6.2 se muestran las ecuaciones con las que se va a determinar la profundidad de socavación:

Cuadro 6.1: Parámetros utilizados en las ecuaciones empíricas

PRINCIPALES PARÁMETROS		
Parámetro	Unidad	Descripción
Y_s	m	Profundidad del foso
Y_o	m	Calado en el cuenco amortiguador
q	$m^3/s/m$	Caudal unitario
H	m	Diferencia entre superficie libre en el embalse y superficie libre en el cuenco amortiguador
z	m	Diferencia entre el nivel del embalse y el labio del esquí
g	m/s^2	Aceleración de la gravedad
d_m	m	Diámetro medio de material suelto en el cuenco amortiguador
d_{85}	m	Tamaño de las partículas de las cuales el 85% del material es más fino
d_{90}	m	Tamaño de las partículas de las cuales el 90% del material es más fino

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Cuadro 6.2: Ecuaciones empíricas

DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE MÁXIMA SOCAVACIÓN												
INVESTIGADOR	AÑO	ECUACIÓN	ECUACIÓN TIPO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA SOCAVACIÓN:									
			K	a	b	c	d	e	f	h	i	
1. Schoklitsch	1932	$Y_s + Y_o = 0.521 \frac{q^{0.57} H^{0.20}}{d_{90}^{0.32}}$	0,521	0,57	0,2	0	0	0	0	0	0	0,32
2. Veronese A	1937	$Y_s + Y_o = 1.90 q^{0.54} H^{0.225}$	1,9	0,54	0,225	0	0	0	0	0	0	0
3. Veronese B	1937	$Y_s + Y_o = 0.202 \frac{q^{0.54} H^{0.225}}{d_m^{0.42}}$	0,202	0,54	0,225	0	0	0	0,42	0	0	0
4. Damle	1966	$Y_s + Y_o = 0.55 q^{0.50} H^{0.50}$	0,55	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0	0
5. Zimmerman y Maniak	1967	$Y_s + Y_o = 0.59 \frac{q^{0.20} Y_o^{0.93}}{d_{85}^{0.23}}$	0,59	0,2	0	0,93	0	0	0	0	0,23	0
6. Chee y Padiyar	1969	$Y_s + Y_o = 2.13 \frac{q^{0.67} H^{0.18}}{d_m^{0.063}}$	2,13	0,67	0,18	0	0	0	0,063	0	0	0
7. Martins	1973	$Y_s + Y_o = 1.50 q^{0.60} z^{0.10}$	1,5	0,6	0	0	0,1	0	0	0	0	0
8. Chian Min Wu	1973	$Y_s + Y_o = 1.18 q^{0.51} H^{0.235}$	1,18	0,51	0,235	0	0	0	0	0	0	0
9. Machado	1980	$Y_s + Y_o = 1.35 \frac{q^{0.50} H^{0.3145}}{d_{90}^{0.0645}}$	1,35	0,5	0,3145	0	0	0	0	0	0	0,0645
10. Mason y Arumugam A	1985	$Y_s + Y_o = 3,27 \frac{q^{0.60} H^{0.05} Y_o^{0.15}}{g^{0.30} d_m^{0.10}}$	3,27	0,6	0,05	0,15	0	0	0,3	0,1	0	0
11. Mason y Arumugam B	1985	$Y_s + Y_o = 22.88 q^{0.60} H^{0.50} d_{90}^{0.40}$	22,88	0,6	0,5	0	0	0	0	0	0	-0,4

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

A continuación se presenta un ejemplo del ingreso de datos necesarios para el cálculo de la máxima profundidad de socavación mediante el uso de las ecuaciones antes mencionadas, para el Escenario N°1.

Se ingresan los datos correspondientes a la geometría del vertedero de excesos y los diámetros característicos del material pétreo, datos necesarios para el cálculo de la socavación máxima. En los recuadros sombreados de color gris se registran los datos correspondientes.

Cuadro 6.3: Ingreso de los valores correspondientes a los datos geométricos

DATOS GEOMÉTRICOS		
Descripción	Unidad	Cantidad
Ancho Vertedero (B)	m	0,560
Cota Cresta del Vertedero	m	1,580
Cota labio esquí	m	1,175
Cota deflector	m	1,223
Cota enrocado	m	0,700
Aceleración de la gravedad (g)	m/s ²	9,810

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Cuadro 6.4: Ingreso de los datos del material pétreo

DATOS DEL MATERIAL PÉTREO		
Diámetros Característicos	Unidad	Escenario N°1
d_m	m	0,020
d_{85}	m	0,024
d_{90}	m	0,025

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Una vez determinados los datos iniciales, se ingresan los datos obtenidos en la experimentación, para posteriormente obtener los valores de socavación máxima. En la siguiente tabla se deben escribir únicamente los valores en las celdas sombreadas de color gris.

Cuadro 6.5: Ingreso de los datos obtenidos en los ensayos

ESCENARIO N°1					
DISEÑO ORIGINAL (Modelo)			$\phi_{\text{MATERIAL}} = 2,00 \text{ cm}$		
DATOS EXPERIMENTALES ESCENARIO N°1; $\phi = 2,00 \text{ cm}$					
$Q_{\text{MODELO}} \text{ [l/s]}$	14,954	28,260	40,212	56,510	68,627
Carga sobre vertedero [m]	0,057	0,088	0,113	0,140	0,156
Cota cuenco amortiguador [m]	0,814	0,855	0,890	0,945	0,975
$q \text{ [m}^3\text{/s/m]}$	0,027	0,050	0,072	0,101	0,123
H [m]	0,823	0,813	0,803	0,775	0,761
Yo [m]	0,114	0,155	0,190	0,245	0,275
z [m]	0,462	0,493	0,518	0,545	0,561

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

A continuación se muestran los resultados obtenidos con cada ecuación, en función del caudal utilizado y del material pétreo.

Cuadro 6.6: Profundidades de socavación máxima, obtenidas mediante la aplicación de las ecuaciones empíricas

RESULTADOS TEÓRICOS ESCENARIO N°1; $\phi = 2,00 \text{ cm}$					
$Q_{\text{MODELO}} \text{ [l/s]}$	14,954	28,260	40,212	56,510	68,627
Investigador	$Y_s + Y_o \text{ [m]}$				
1. Schoklitsch	0,208	0,298	0,363	0,438	0,487
2. Veronese A	0,257	0,361	0,436	0,520	0,575
3. Veronese B	0,140	0,197	0,238	0,283	0,314
4. Damle	0,082	0,111	0,132	0,154	0,168
5. Zimmerman y Maniak	0,089	0,135	0,175	0,238	0,275
6. Chee y Padiyar	0,232	0,355	0,448	0,559	0,635
7. Martins	0,158	0,233	0,289	0,357	0,402
8. Chian Min Wu	0,178	0,245	0,292	0,345	0,379
9. Machado	0,263	0,361	0,429	0,503	0,551
10. Mason y Arumugam A	0,169	0,260	0,331	0,420	0,480
11. Mason y Arumugam B	0,537	0,782	0,961	1,158	1,289

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

CAPITULO 7

RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

En la etapa de experimentación se observaron las principales características de los fosos formados en el cuenco amortiguador después del impacto de los chorros provenientes de los vertederos de excesos de la presa Toachi.

La principal característica que se analizó fue la profundidad de socavación, es por esto que, basándose en los resultados obtenidos, mostrados en el capítulo 5, se puede determinar que el máximo valor obtenido de ésta, corresponde a 0,195 m, obtenido al ensayar un caudal propuesto de 56,57 l/s, en presencia de material pétreo en el cuenco amortiguador con diámetro nominal igual a 1 cm. Es por esto que se presenta una comparación entre las características de los fosos obtenidos con caudales iguales al mencionado anteriormente.

Cuadro 7.1: Características de los fosos socavados con $Q_{\text{PROPUESTO}} = 56,57$ l/s, en los tres escenarios

$Q_{\text{PROPUESTO}} = 56,57$ l/s			
Característica	Escenario N°1	Escenario N°2	Escenario N°3
$Q_{\text{EXPERIMENTAL}}$ [l/s]	56,510	57,020	57,275
d_m material pétreo [m]	0,020	0,015	0,010
Máxima profundidad [m]	0,143	0,183	0,195
Distancia desde el pie de la presa hasta el foso [m]	1,232	1,296	1,354
Ancho del foso [m]	1,085	1,060	0,796
Longitud del foso [m]	0,884	0,818	0,611

Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

En el cuadro 7.1 se puede notar claramente que el tamaño del material pétreo presente en el cuenco amortiguador al momento de realizar cada ensayo, influye directamente en la conformación de los fosos y en sus respectivas características.

Fotografía 7.1: Foso socavado, Q=56,51 l/s, Escenario N°1



Figura 7.1: Foso socavado, Q = 56,51 l/s, Escenario N°1

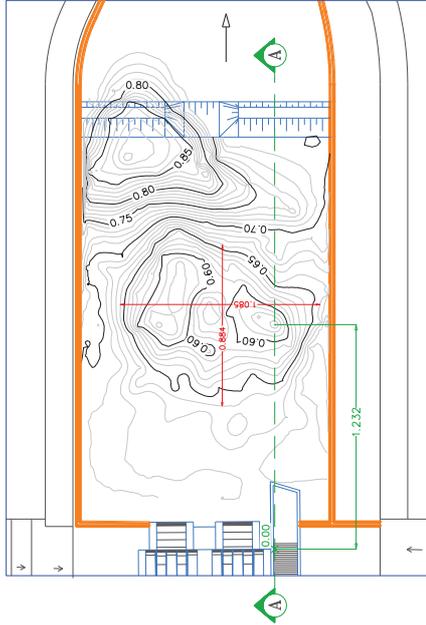


Figura 7.2: Perfil longitudinal, Q = 56,51 l/s, Escenario N°1



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Fotografía 7.2: Foso socavado, Q=57,02 l/s, Escenario N°2



Figura 7.3: Foso socavado, Q = 57,02 l/s, Escenario N°2

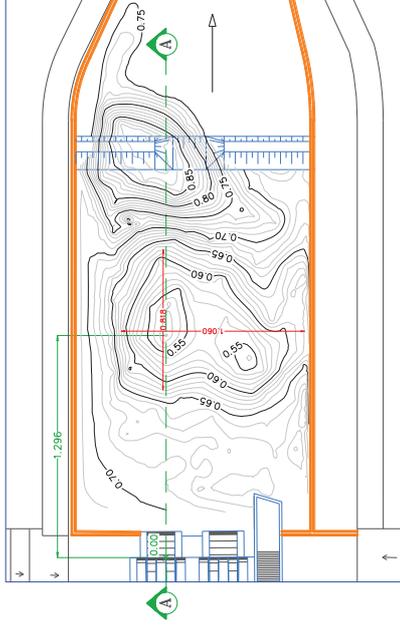
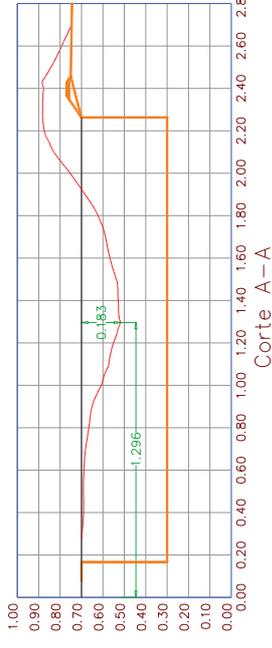


Figura 7.4: Perfil longitudinal, Q = 57,02 l/s, Escenario N°2



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Fotografía 7.3: Foso socavado, Q=57,28 l/s, Escenario N°3



Figura 7.5: Foso socavado, Q = 57,28 l/s, Escenario N°3

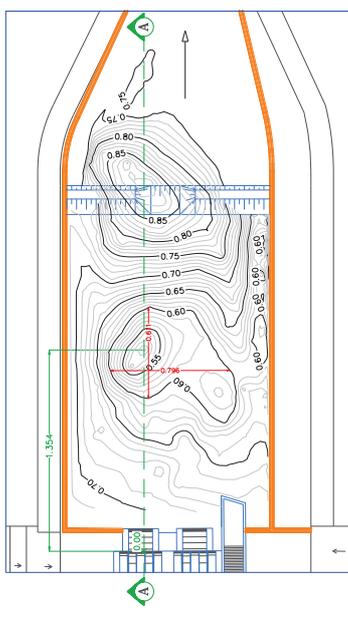
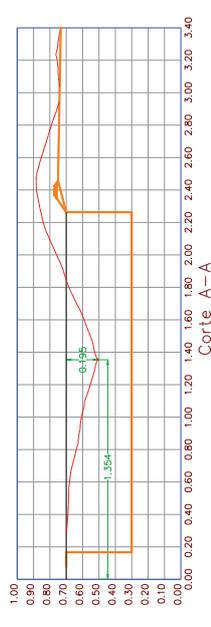


Figura 7.6: Perfil longitudinal, Q = 57,28 l/s, Escenario N°3



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

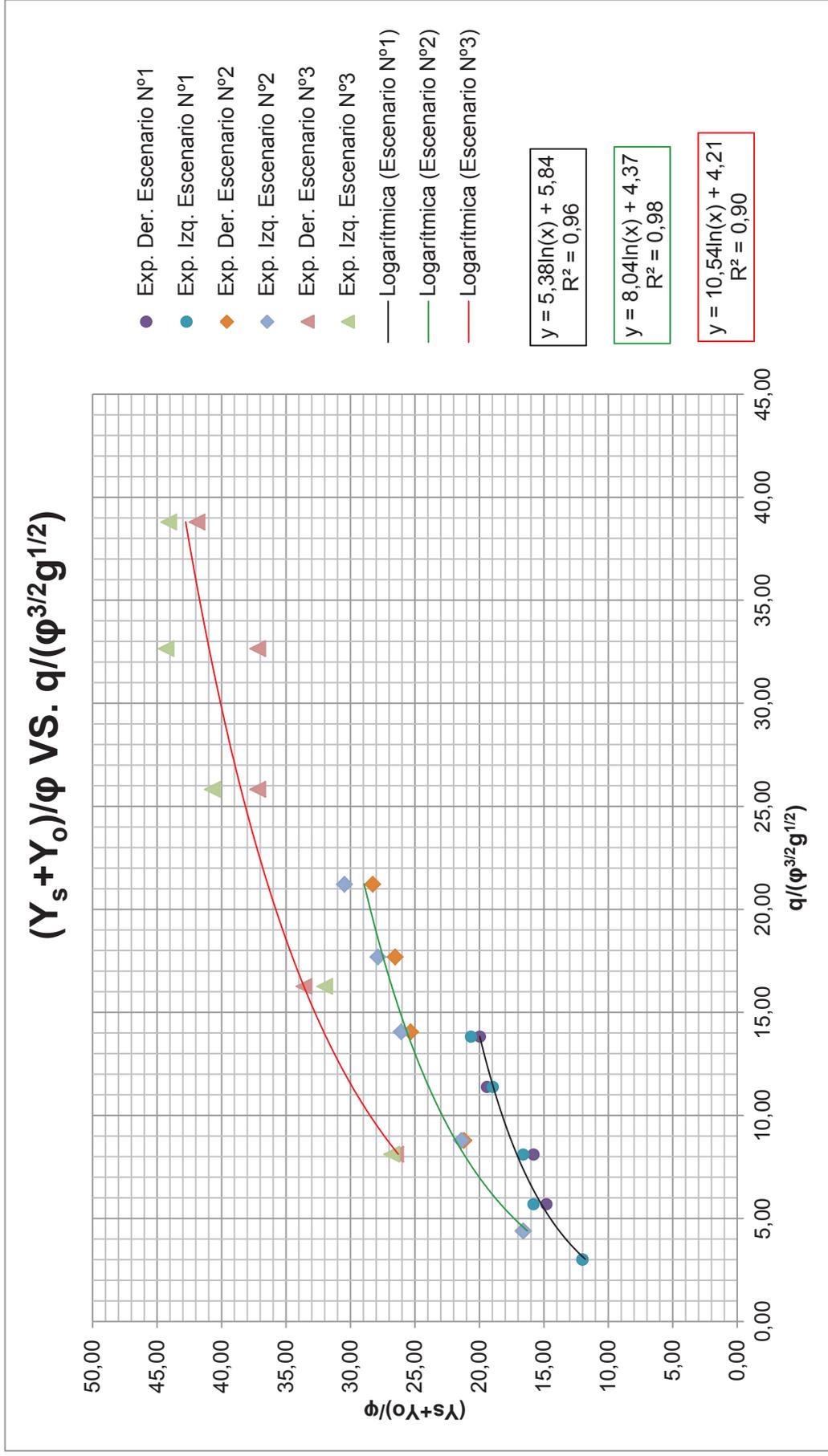
En las fotografías y figuras mostradas se tiene una comparación entre los tres escenarios, para un caudal similar. Se pueden observar las diferencias que existen entre los fosos socavados tanto en su forma, localización con respecto al pie de la presa y máxima profundidad de socavación.

De esta manera se puede determinar que el tamaño del material presente en el cuenco amortiguador incide directamente en la conformación final del foso socavado, ya que al realizar las pruebas con un mismo caudal para los diferentes escenarios, los resultados son distintos en cada uno de ellos.

En el desarrollo del análisis dimensional se determina que la profundidad de socavación tiene relación directa con dos parámetros fundamentales, el caudal unitario (q) y la energía disponible (H). Por lo que al momento de adimensionalizarlos y al compararlos con la profundidad de socavación adimensional $((Y_s + Y_o)/\phi)$ se tienen gráficos en donde se puede evidenciar que existe una tendencia creciente a medida que el caudal se incrementa.

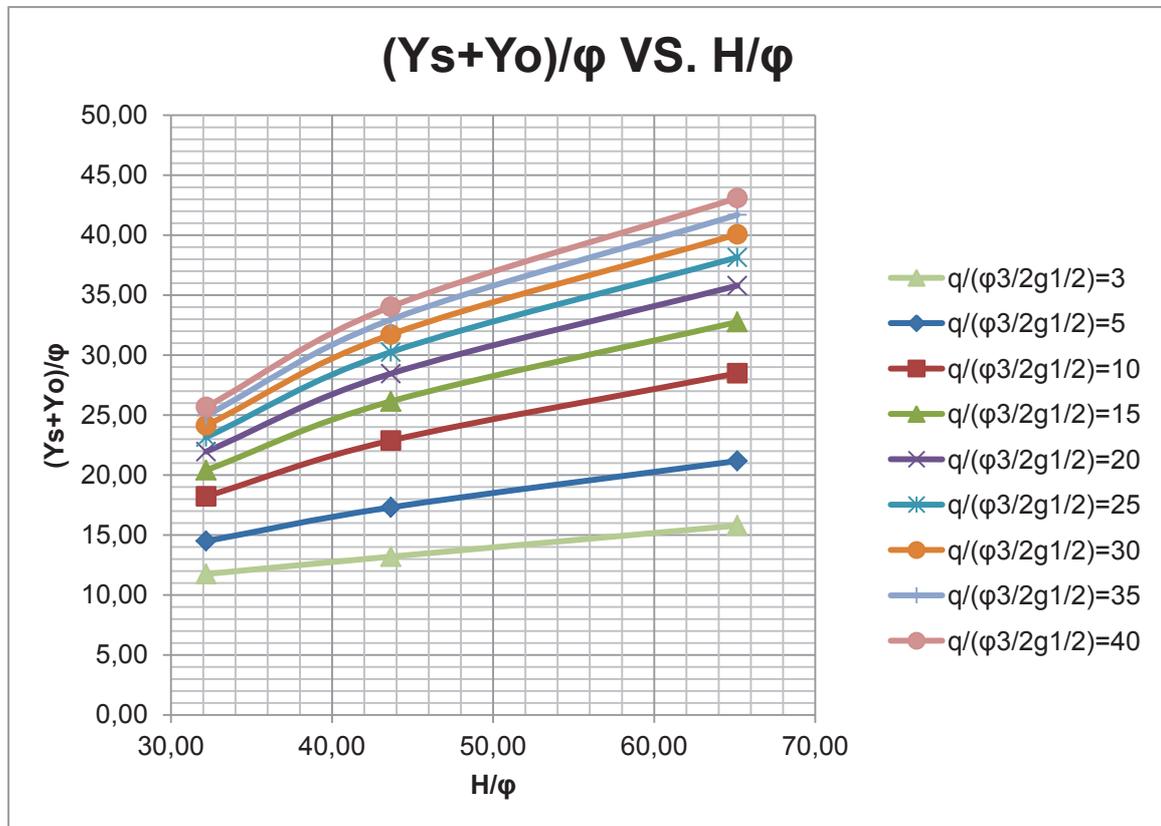
En los gráficos que se presentan a continuación se nota que la profundidad de socavación aumenta a medida que el parámetro adimensional de las abscisas se incrementa, así también se puede observar que las líneas de tendencia representativas de cada escenario, al ser funciones logarítmicas, van a tener una asíntota en el eje de las ordenadas, es decir que para caudales muy grandes la profundidad de socavación se mantiene prácticamente constante.

Gráfico 7.1: Comparación adimensional entre profundidades de socavación y caudales



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

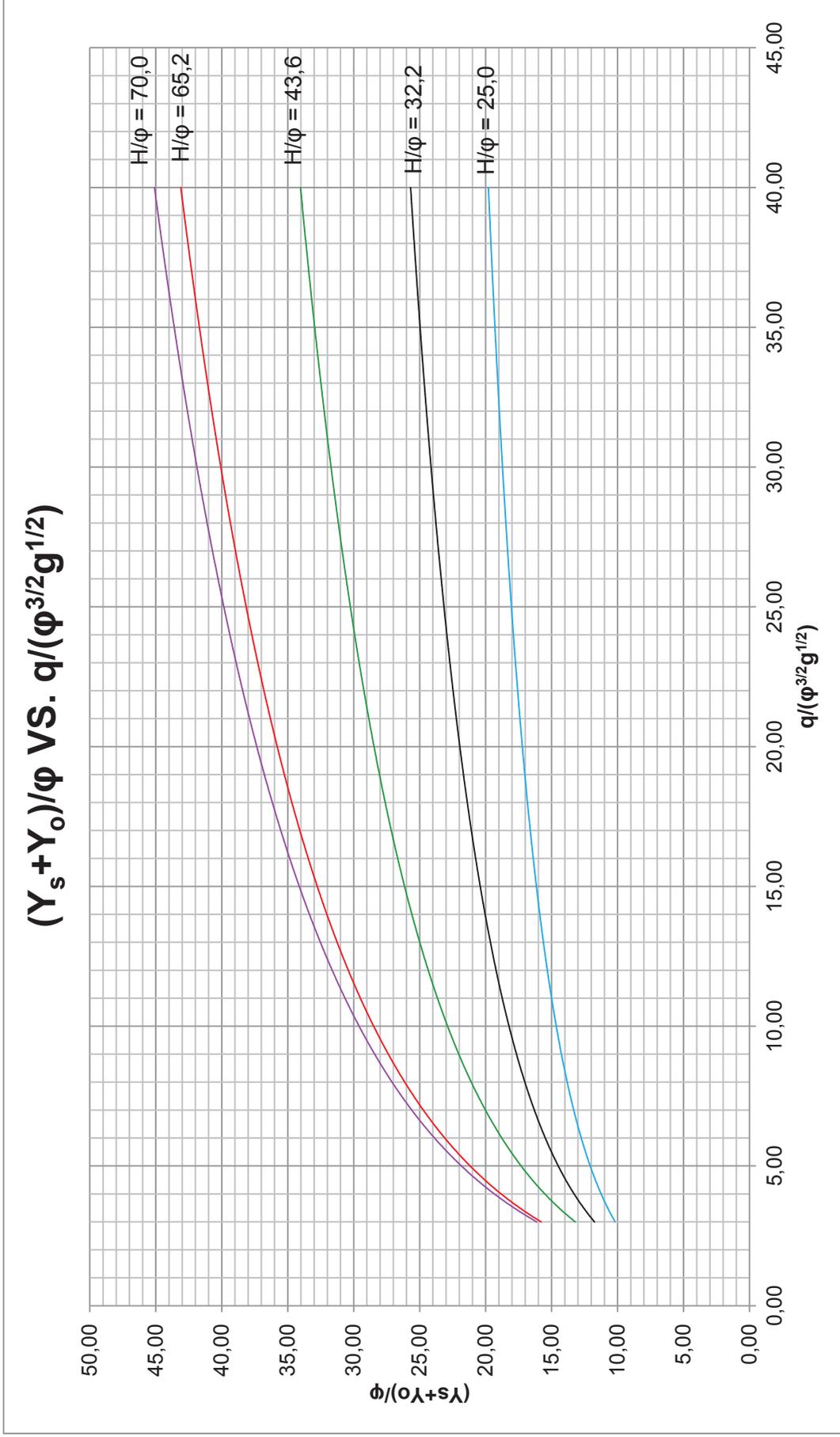
Gráfico 7.2: Comparación adimensional entre profundidad de socavación y energía disponible



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

Para la aplicación en diseño de los resultados obtenidos en la investigación en modelo físico de la presa Toachi, se presenta el siguiente gráfico, en el cual se han extrapolado las curvas obtenidas, para cubrir el rango de cargas y tamaños de material pétreo en el cuenco de disipación de energía que resultan más frecuentes en los proyectos.

Gráfico 7.3: Curvas extrapoladas para diseño de cuencos de disipación de energía



Elaborado por: Daniel Hermosa Hidalgo

7.2 CONCLUSIONES SOBRE EL ESTUDIO EXPERIMENTAL

- La diferente profundidad registrada para el foso izquierdo y derecho en un mismo caudal se explica por la influencia de los flujos de recirculación producidos por la asimetría en la geometría de la transición.
- La distancia registrada desde el pie de los vertederos de excesos hasta el punto más profundo del foso, depende del tamaño del material pétreo presente en el cuenco amortiguador. Se pudo observar que para un mismo caudal propuesto en cada escenario, las distancias antes mencionadas son mayores en presencia de un material pétreo de menor diámetro.
- Se observó que tanto el ancho como la longitud de los fosos socavados varían de acuerdo al material que se encuentra en el cuenco, con los caudales pequeños se obtienen menores valores de los parámetros antes mencionados, en presencia de material pétreo de diámetro nominal igual a 2 cm, al contrario, con los caudales mayores, los valores del ancho y largo de los fosos son menores con material pétreo de 1 cm de diámetro.
- Los resultados experimentales obtenidos en el modelo, con los tres diámetros de material pétreo ensayados, permiten un ajuste cuyo factor de correlación es superior a 0,90, con las expresiones logarítmicas obtenidas, lo que resulta totalmente aceptable.
- Se seleccionaron once ecuaciones propuestas en la literatura técnica para estimar la profundidad de socavación producida por el impacto de los chorros lanzados por saltos de esquí sobre cuencos de disipación de energía con material pétreo granular, con los siguientes criterios: caudal unitario, diferencia entre superficie libre en el embalse y en el cuenco amortiguador, diámetro medio de material pétreo, tamaño de las partículas de las cuales el 85 y 90 % del material es más fino y la diferencia entre el nivel del embalse y el labio del esquí. Tomando en cuenta estos parámetros se determina el valor de la profundidad de socavación.
- Los resultados determinados experimentalmente muestran una mejor aproximación con las ecuaciones propuestas por Schoklitsch (1932) y Machado (1980). Entre los resultados experimentales y los calculados con las ecuaciones mencionadas, se puede observar un rango de variación que

corresponde aproximadamente a $\pm 20\%$, esta dispersión es aceptada, ya que al medir los caudales que ingresan al embalse se tiene un error probable admitido. Al realizar la corrección de los caudales mediante el análisis de sensibilidad, se ratifica la consistencia de los resultados de profundidad obtenidos.

- En los gráficos adimensionales realizados se puede observar que para los mayores valores de caudal adimensional, las profundidades de socavación adimensionales experimentales son menores que los calculados con las ecuaciones empíricas propuestas, para los tres tamaños de material pétreo, esto se explica a partir de que las condiciones a la salida de la transición aguas abajo, en el modelo de la presa Toachi, imponen la condición de control para el cuenco de disipación de energía al pie de la presa, es por esto que se tiene un calado (Y_o) mayor y por ende una menor afectación de los chorros, es decir, una menor socavación (Y_s).
- Los gráficos que representan el resultado del análisis dimensional realizado para definir la profundidad de socavación adimensional en función del caudal unitario adimensional y de la energía disponible adimensional, muestran que la profundidad de socavación es mayor a medida que estos dos parámetros se incrementan. A partir de esto se concluye que para el mismo rango de caudales ensayados, se tiene menor profundidad de socavación adimensional para los mayores tamaños de material pétreo.
- Los resultados obtenidos en la experimentación no se pueden transferir directamente a prototipo, debido a que en la presente investigación se utilizó material pétreo con un peso específico igual al que se tiene en prototipo, y esta propiedad dinámica de los materiales no puede ser escalada, pero a partir de los gráficos adimensionales definitivos, se puede obtener la profundidad de socavación para un proyecto determinado, conociendo únicamente el caudal unitario, la energía disponible y el tamaño del material presente en el cuenco amortiguador.

7.3 CONCLUSIONES SOBRE EL PROYECTO DE TITULACIÓN

- Con la ayuda del análisis dimensional se pueden identificar los parámetros fundamentales que inciden en el fenómeno de socavación producida por el impacto de los chorros de agua provenientes de un salto en esquí, dentro de un cuenco amortiguador con material pétreo de un cierto diámetro nominal.
- Al elegir la similitud restringida de Froude se determina que, en el fenómeno hidráulico investigado, la fuerza gravitacional es preponderante debido a que se trata de un flujo a superficie libre, es por esto que se desprecia el efecto de la viscosidad y la tensión superficial, dando lugar a que la profundidad de socavación sea función de dos parámetros adimensionales, que corresponden a la energía disponible relacionada con el tamaño del material pétreo en el cuenco y al caudal unitario con el diámetro del material y la aceleración gravedad.
- La forma, ubicación y profundidad de los fosos se encuentran directamente influenciadas por el efecto de recirculación de flujo presente en el cuenco amortiguador, éste ocurre debido a la asimetría de la transición de salida y a que las paredes laterales del cuenco no se encuentran simétricamente situadas respecto al eje de la presa. Es por esto que el calado o profundidad de agua, presente en el cuenco amortiguador al momento de realizar cada ensayo, cobra gran importancia, ya que influirá directamente en la profundidad que alcanza el chorro y por ende en la socavación máxima producida. Se puede observar además, que con los tres tamaños de material pétreo ensayado, la máxima profundidad de socavación no ocurre con el caudal máximo.
- Mediante la representación a escala del material pétreo, en el modelo físico, se pueden observar tendencias que resultan de gran importancia y utilidad en el diseño hidráulico de cuencos de disipación de energía, además al conocer la ubicación, forma, ancho, longitud y profundidad de los fosos socavados en diferentes pruebas, para una geometría definida, se pueden determinar criterios que permitan orientar al diseñador sobre la

solución óptima, tal que garantice la disipación de energía requerida en un cierto proyecto.

- La modelación física es una herramienta fundamental para el diseño de cuencos de disipación de energía, debido a que mediante ésta se pueden determinar los principales aspectos que se deben tomar en cuenta al momento de diseñar la geometría del cuenco amortiguador.

7.4 RECOMENDACIONES

- Para la aplicación en diseño de los resultados experimentales obtenidos en la presente investigación, se recomienda analizar en primer lugar si las condiciones de control aguas abajo del cuenco amortiguador al pie de la presa son similares a los que se tienen en el modelo de la presa Toachi, pues este control y la geometría del cuenco definen la forma de los flujos de recirculación, que son los responsables de la forma, ubicación y profundidades máximas de los fosos de socavación.
- Se recomienda continuar la investigación ensayando materiales con diámetros nominales más finos en el cuenco amortiguador al pie de la presa, para verificar la extrapolación realizada, con el fin de ofrecer al diseñador una ayuda efectiva en la estimación de profundidades máximas de socavación en función de los tamaños de material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alias, N., Mohamed, T., Ghazali, A., y Megat Mohd. (2008). "Impact of Takeoff Angle of Bucket Type Energy Dissipater on Scour Hole". American Journal of Applied Sciences: pp. 117-121.

Bormann, N., Pierre Julien. (1991). "Scour Downstream of Grade-Control Structures". Journal of Hydraulic Engineering: Vol. 117, No. 5, pp 579-594.

Creager, W., Justin, J., y Julian Hinds. (1945). Engineering for Dams. New York : John Wiley & Sons. Inc.

Domingo, R. (2003). Estudio teórico-experimental de un sistema de disipación de energía poco habitual al pie de una caída de agua. Tesis de Grado. Barcelona, España: Universidad de Cataluña.

Elevatorski, E. (1959). Hydraulic Energy Dissipators. New York : McGraw-Hill.

Escuela Politécnica Nacional, Hidrotoapi E.P. (2011). Estudio en modelo hidráulico. Presa Toachi y sus obras complementarias. Informe Técnico Fase I. Quito.

Escuela Politécnica Nacional, Hidrotoapi E.P. (2012). Estudio en modelo hidráulico. Presa Toachi y sus obras complementarias. Informe Técnico Fase II. Quito.

Escuela Politécnica Nacional, Hidrotoapi E.P. (2012). Modelo hidráulico de la presa Toachi. Análisis experimental de la modificación en los deflectores del salto en esquí. Informe técnico No. 1. Quito.

Escuela Politécnica Nacional, Hidrotoapi E.P. (2013). Estudio experimental en modelo hidráulico. Escala 1:50. Verificación experimental del diseño definitivo de la presa Toachi y obras complementarias. Informe Técnico Fase IV. Quito.

Hidalgo, Marcelo. (2007). Introducción a la teoría de modelos hidráulicos y aplicaciones básicas. Quito : Departamento de Hidráulica-Escuela Politécnica Nacional.

Hidrotoapi E.P. (2010). Documentos de licitación. Información técnica general. Proyecto Hidroeléctrico Toachi- Pilatón. Quito.

Hidrotoapi E.P. (2010). Informe 6256.0-R-18. Presa Toachi. Hidráulica. Memoria de cálculo. Quito.

López R., y José Álvarez. (2005) "Erosión local aguas debajo de diques para el control de torrentes: Metodología de cálculo". Universidad de Lleida. Foresta: pp. 68-77.

Pan, G., y Chun Tian. (1988). "Research on the free jet ultimate scour below dams". The International Symposium on Hydraulics for High Dams: pp. 239-245.

Pardo-Gómez, R. (2008). "Método propuesto para el diseño hidráulico de trampolines empleados como disipadores de energía en aliviaderos para presas, considerando la ocurrencia del cono de socavación al pie del mismo". Ingeniería hidráulica en México: Volúmen XXIII, pp. 111-121.

Pemberton, E., y Joseph Lara. (1984). Computing Degradation and Local Scour. Denver, Colorado.

Universidad del Cauca. Metodología para procesar datos experimentales. Departamento de Hidráulica. Colombia.

Velasco, C., Vera, P. (2012). Estudio en modelo físico de la disipación de energía aguas debajo de los vertederos de excesos y desagües de fondo de la Presa Toachi Proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón. Tesis de Grado. Quito : Escuela Politécnica Nacional-Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental.

Vischer, Daniel., y William Hager. (1998). Dam Hydraulics. Switzerland: Wiley.

Vischer, Daniel., y William Hager. (1995). Energy Dissipators. I.A.H.R. Rotterdam: A.A. Balkema.

Whittaker, Jeffrey, y Anton Schleiss. (1984). Scour Related to Energy Dissipators for Head Structures. Zürich.

Zúñiga, J. (2003/2004). Técnicas experimentales de Física General. España.

ANEXOS

- **ANEXO No. 1: FOSOS SOCAVADOS**
- **ANEXO No. 2: RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS**
- **ANEXO No. 3: REGISTRO DE DATOS EXPERIMENTALES**
- **ANEXO No. 4: HOJA DE CÁLCULO PARA LA EVALUACIÓN DE LA PROFUNDIDAD MÁXIMA DE SOCAVACIÓN**

Nota: Adjunto se encuentran anexos digitales.