

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **CÁLCULO DE FLUJO PERMANENTE, GRADUALMENTE VARIADO CON LECHO DE MATERIAL GRUESO EN UN TRAMO DEL RÍO PAO, ADYACENTE A LA ESTACIÓN DE BOMBEO N° 2 DE HIDROCENTRO.**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela

Por el Br.:

Zapata Medina, Augusto Ramón

Para optar al Título de  
Ingeniero Civil

Caracas, 2010

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **CÁLCULO DE FLUJO PERMANENTE, GRADUALMENTE VARIADO CON LECHO DE MATERIAL GRUESO EN UN TRAMO DEL RÍO PAO, ADYACENTE A LA ESTACIÓN DE BOMBEO N° 2 DE HIDROCENTRO.**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Marco Falcón.

COTUTOR: M Sc. Edgar Marrero.

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela

Por el Br.:

Zapata Medina, Augusto Ramón

Para optar al Título de

Ingeniero Civil

Caracas, 2010

### ACTA DE APROBACION

El día 06 /12/2010 se reunió el jurado formado por los profesores:

Yuri Medina

Mario Dubois

Marco Falcón

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: "CÁLCULO DE FLUJO PERMANENTE, GRADUALMENTE VARIADO CON LECHO DE MATERIAL GRUESO EN UN TRAMO DEL RÍO PAO, ADYACENTE A LA ESTACIÓN DE BOMBEO N° 2 DE HIDROCENTRO".

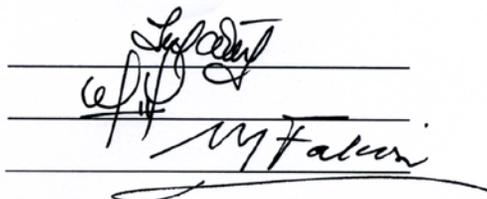
Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al Título de **INGENIERO CIVIL**.

Una vez oída la defensa oral que el bachiller hizo de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió las siguientes calificaciones:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Números	Letras
Br. Augusto R. Zapata M.	19	DIECINUEVE

Recomendaciones:

### FIRMAS DEL JURADO



Caracas, 06 de Diciembre de 2010

## **DEDICATORIA**

Con todo mi amor a mi preciosa madre, mi maravilloso padre y a mi querido hermano. A mi gran familia y amigos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a mi maravillosa familia y grandes amigos, por la confianza y apoyo depositado en mi en todo momento.

A la respetable Universidad Central de Venezuela por el conocimiento y crecimiento personal que me ha obsequiado. Orgulloso estoy de ser hijo de la “Casa que vence las sombras”.

Un agradecimiento especial al Prof. Marco Falcón y al Ingeniero Edgar Marrero por la confianza depositada en mí y por los conocimientos aportados en el desarrollo de este trabajo especial de grado.

A toda la grandiosa gente del Laboratorio Nacional de Hidráulica por el apoyo brindado. En especial a los ingenieros Olegario Alcalá, Jacinto Artigas, David Montero, y al Director Enrique García por la amistad y confianza mostrada en todo momento. A mis compañeros de trabajo y amigos Jhann Carrillo, Luis Machado y Eleazar Castillo por su apoyo incondicional durante este trabajo especial de grado.

Gracias a la cooperación y atención del personal de HIDROCENTRO en Cojedes quienes permitieron al Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH) efectuar una breve campaña de aforo en abril de 2009.

“A todas esas personas que han estado presente en mi vida, momentáneamente o las que aun perduran. Gracias a todos.”

**Zapata M., Augusto R.**

**CÁLCULO DE FLUJO PERMANENTE, GRADUALMENTE VARIADO  
CON LECHO DE MATERIAL GRUESO EN UN TRAMO DEL RÍO  
PAO, ADYACENTE A LA ESTACIÓN DE BOMBEO N° 2 DE  
HIDROCENTRO.**

**Tutor Académico: Prof. Marco Falcón. CoTutor: M Sc. Edgar Marrero.**

**Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.**

**Escuela de Ingeniería Civil. 2010, nº pág. 134.**

**Palabras Clave:** Cauces naturales, Coeficiente de Resistencia, HEC-RAS, Macrorugosidad, Aguirre-Pe y Fuentes.

**Resumen.** Se calcula la capacidad del cauce del río Pao en un tramo adyacente a la estación de bombeo N° 2 de HIDROCENTRO y aguas abajo del aliviadero del embalse Pao-La Balsa, estado Cojedes. Para ello, se obtienen los coeficientes de rugosidad de Manning del lecho y de las márgenes a través de la calibración de la rugosidad un modelo numérico unidimensional. A partir de la profundidad de agua en cada sección transversal, extraída de los perfiles de flujo para el valor de  $n$  de Manning calibrado, se aplica la fórmula de Aguirre-Pe y Fuentes (1990) para lechos macrorugosos para calcular el tamaño del material grueso presente en el cauce del río en el tramo seleccionado, y el resultado se compara con lo observado en campo (cantos de diámetros que varían entre 1.0 y 3.0 m).

## INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO I .....	3
EL PROBLEMA .....	3
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
1.2. OBJETIVOS .....	5
Objetivo General .....	5
Objetivos específicos .....	5
1.3. APORTES .....	6
1.4. ALCANCE .....	7
CAPITULO II .....	8
MARCO TEÓRICO .....	8
2.1. ANTECEDENTES .....	8
2.2. FLUJO GRADUALMENTE VARIADO .....	11
2.2.1. Fundamento teórico .....	11
2.2.2. Ecuación dinámica del flujo gradualmente variado .....	14
2.2.3. Tipos de perfiles de flujo .....	17
2.2.4. Controles y perfiles de flujo .....	20
2.2.5. Cálculo de perfil de flujo .....	20
2.2.5.1. Método directo por etapas .....	20
2.2.5.2. Procedimiento de cálculo .....	22
2.3. ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH .....	23
2.4. ECUACIÓN DE CHEZY .....	23
2.5. ECUACIÓN DE MANNING .....	24
2.5.1. Factores que afectan el coeficiente de rugosidad de Manning .....	26
2.6. RESISTENCIA AL FLUJO EN CAUCES ALUVIALES .....	28
2.6.1. Resistencia en lechos de arena .....	29
2.6.2. Resistencia en lechos de grava .....	34

2.6.3. Factor de fricción en lechos con macrorugosidad.....	36
2.7. SIMULACIÓN HIDRÁULICA CON HEC-RAS.....	42
CAPITULO III .....	44
MÉTODO.....	44
3.1. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN BÁSICA.....	44
3.1.1. Levantamiento Topo-batimétrico de la zona en estudio.....	45
3.1.1.1. Objetivo .....	45
3.1.1.2. Objetivos específicos.....	45
3.1.1.3. Descripción de la zona de estudio.....	46
3.1.1.4. Linderos y superficie de trabajo.....	47
3.1.1.5. Equipos utilizados.....	50
3.1.1.6. Método usado durante el levantamiento topo-batimétrico.....	53
3.1.1.7. Procedimiento del Levantamiento Topográfico.....	55
3.1.1.8. Procedimiento del Levantamiento Batimétrico.....	56
3.1.1.9. Plan de procesamiento.....	59
3.1.2. Caracterización de los materiales del lecho del río Pao, a lo largo y ancho del lecho, en el tramo seleccionado .....	63
3.1.2.1. Objetivo .....	63
3.1.2.2. Descripción de la zona objeto de estudio .....	63
3.1.2.3. Método para recolección de muestras para el análisis granulométrico del material del lecho del río Pao.....	64
3.1.2.4. Método de análisis.....	76
3.1.2.5. Equipos.....	76
3.1.2.6. Análisis de la fracción gruesa .....	77
3.1.2.7. Análisis de la fracción fina .....	78
3.2. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD HIDRÁULICA DEL CAUCE DEL RÍO PAO .....	82
3.2.1. Método.....	82
3.2.2. Modelación matemática .....	83

3.2.3.	Establecimiento de la longitud del tramo .....	84
3.2.4.	Geometría.....	87
3.2.5.	Caudales transitados por el cauce del río Pao en el tramo en estudio .	90
3.2.5.1.	Mediciones de cotas de superficie de agua.....	92
3.2.6.	Valores de coeficiente de rugosidad “n” de Manning y coeficientes de contracción/expansión .....	94
3.2.7.	Aplicación del modelo matemático HEC-RAS.....	96
3.3.	VERIFICACIÓN DE LA FORMULACIÓN DE AGUIRRE-PE Y FUENTES (1990) .....	105
3.4.	Modelo físico del río Pao.....	107
3.4.1.	Descripción .....	107
3.4.2.	Modelo hidráulico.....	107
3.4.2.1.	Sistema de suministro .....	108
3.4.2.2.	Estanque reservorio.....	109
3.4.2.3.	Modelo río Pao .....	110
3.4.2.4.	Sistema de control de tirantes a la salida del modelo.....	111
3.4.2.5.	Tanque de retorno a la capacidad del laboratorio.....	112
3.4.3.	Instrumentación del Modelo físico.....	112
3.4.3.1.	Caudales .....	112
3.4.3.2.	Niveles de superficie.....	113
3.4.4.	Ensayos y mediciones .....	114
CAPITULO IV .....		118
ANALISIS DE LOS RESULTADOS.....		118
CONCLUSIONES.....		121
RECOMENDACIONES .....		123
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		124
ANEXOS .....		126

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de estaciones de la poligonal.....	55
Tabla 2. Coordenadas de los puntos de Control. ....	55
Tabla 3. Características físicas observadas en el río Pao.....	72
Tabla 4. Peso mínimo de la muestra según las partículas más grandes del material. ....	77
Tabla 5. Diámetros correspondientes al 50% de material más fino, en cada muestra. ....	80
Tabla 6. Coeficientes “n” de Manning asignados según Ven te Chow, a cada sección. ....	81
Tabla 7. Cotas de la superficie de agua medidas a lo largo de diferentes ubicaciones del río Pao correspondientes a las aperturas de 10, 25 y 75% de la válvula reguladora Howell-Bunger.....	93
Tabla 8. Valores de los diámetros calculados por la fórmula de Aguirre-Pe y Fuentes aplicada al lecho del cauce. ....	106
Tabla 9. Mediciones en modelo de los niveles de agua para los caudales combinados de la válvula reguladora y el canal del aliviadero. ....	114

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Deducción de la ecuación de flujo gradualmente variado. ....	14
Figura 2. Clasificación de los perfiles de flujo.....	19
Figura 3. Tramo del canal para la deducción de los métodos de paso. ....	21
Figura 4. Distribución de velocidad y movimiento de una partícula en un canal rugoso en pendiente.....	40
Figura 5. Ubicación del Embalse Pao-La Balsa, Municipio El Pao, Estado Cojedes. ....	48
Figura 6. Zona de estudio para el levantamiento topográfico donde se muestra la estación de bombeo, adyacente al río Pao, que puede ser afectada por algún evento extremo. También, se observa la válvula reguladora Howell-Bunger y embalse Pao-La Balsa. ....	49
Figura 7. Vista de la válvula reguladora Howell-Bunger descargando un caudal de 5 m <sup>3</sup> /s, usada para la descarga de fondo del embalse Pao La Balsa, principalmente para mantener el caudal ecológico del río Pao aguas abajo de la presa. ....	50
Figura 8. Estación Total LEICA TC-305. ....	51
Figura 9. Ecosonda modelo GPSMAP 298 SONDA marca GARMIN. ....	52
Figura 10. Vista de los puntos de control monumentados. (a) Punto MA7. (b) Punto MA11. ....	54
Figura 11. Ubicación aproximada de los puntos de control en el sitio de presa. ....	54
Figura 12. Vista de la estación total estacionada en un monumento, se observa el trípode nivelante sosteniendo un prisma. ....	56
Figura 13. Se observa al personal del LNH en proceso de levantamiento de coordenadas y profundidades en el río Pao La Balsa. ....	58
Figura 14. Se observa al personal del FLNH en pleno proceso de levantamiento de coordenadas y profundidades en el embalse Pao La Balsa en las cercanías del aliviadero. ....	59

Figura 15. Plano topográfico de la zona objeto de estudio, ubicada en el Embalse Pao-La Balsa, Estado Cojedes. Se muestra la posición de las secciones transversales obtenidas a partir de las curvas de nivel. ....	60
Figura 16. Plano donde se muestra las secciones transversales del río en el tramo comprendido desde la progresiva 0+000 a la progresiva 0+225, obtenidas a partir de las curvas de nivel resultantes del levantamiento topo-batimétrico del cauce..	61
Figura 17. Plano donde se muestra las secciones transversales del río en el tramo comprendido desde la progresiva 0+250 a la progresiva 0+475, obtenidas a partir de las curvas de nivel resultantes del levantamiento topo-batimétrico del cauce..	62
Figura 18. Tramo del río entre las progresivas 0+000-0+025. (a) Margen izquierda (b) Margen derecha. ....	65
Figura 19. Tramo del río entre las progresivas 0+025-0+175. (a) Margen Izquierda, (b) Margen derecha. ....	65
Figura 20. Tramo del río entre las progresivas 0+175-0+225. (a) Margen Izquierda, (b) Margen derecha. ....	66
Figura 21. Tramo del río entre las progresivas 0+225-0+310 (a) Margen Izquierda, (b) Margen derecha. ....	66
Figura 22. Tramo del río entre las progresivas 0+310-0+425 (a) Margen Izquierda, (b) Margen derecha. ....	67
Figura 23. Tramo del río entre las progresivas 0+425-0+475 (a) Margen Izquierda, (b) Margen derecha. ....	67
Figura 24. Tramo del río entre las progresivas 0+475-0+525 (a) Margen Izquierda, (b) Margen derecha. ....	68
Figura 25. Tramo del río entre las progresivas 0+525 y 0+725 (a) Margen izquierda. (b) Margen derecha. ....	68
Figura 26. Vista en planta del río Pao entre las progresivas 0+200 y 0+725, donde se pueden observar la ubicación de las secciones transversales (líneas rojas) en las cuales se recogieron las muestras. ....	70

Figura 27. Margen izquierda del río Pao en la progresiva 0+125, donde se observa gran proporción por peñones de $D = 1.00$ a $3.00$ m aproximadamente. ....	71
Figura 28. Margen derecha, progresiva 0+125. Los cantos rodados y peñones que componen ambas márgenes del río llegan a abarcar parte del lecho reduciendo la sección transversal en este sub-tramo. ....	71
Figura 29. Margen Izquierda, progresiva 0+040. El enrocado de protección es visible para ambas márgenes en la zona próxima a la válvula reguladora Howell Bunger y continúa por el talud de la margen izquierda del río adyacente a la estación de bombeo. ....	73
Figura 30. Enrocado de protección en el lecho y en el talud de las márgenes en el río Pao, que va desde el lecho hasta la cota de la terraza donde está ubicada la estación de bombeo de Pao-La Balsa. ....	73
Figura 31. (a) Barra central ubicada entre las progresivas 0+175 y 0+185, (b) Detalle del sedimento grueso observado en la misma barra. ....	74
Figura 32. Se observa la magnitud del diámetro del enrocado de protección emplazado en las riberas del río adyacente a la estación de bombeo. ....	74
Figura 33. Salida de la piscina de disipación de la válvula reguladora Howell Bunger hacia el río. Las márgenes y el lecho están compuestas de rocas con una granulometría uniforme, con rocas de gran diámetro. ....	75
Figura 34. Margen derecha, progresiva 0+285. La vegetación es abundante en las márgenes del cauce. ....	75
Figura 35. Vista aguas abajo de la progresiva 0+175. Al final del tramo se nota un flujo que tiende a ser uniforme para caudal descargado de la válvula reguladora de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....	76
Figura 36. Ubicación de los controles hidráulicos identificados en el tramo de estudio. También se muestra el transito de caudales por el cauce del río Pao, considerando el caudal de alivio y el caudal descargado por la válvula reguladora Howell-Bunger. ....	86
Figura 37. Sección transversal típica del río Pao en el tramo de estudio. ....	87

Figura 38. Secciones transversales ubicadas en las progresivas 0+400 (38.a), 0+425 (38.b), 0+450 (38.c) y 0+475 (38.d) respectivamente. Se muestra el cambio gradual en la geometría entre secciones consecutivas y la forma irregular en cada sección. ....	88
Figura 39. Perfil longitudinal del río Pao, en un tramo de 500 m aguas abajo de la válvula reguladora Howell-Bunger.....	89
Figura 40. Vista de planta del alineamiento y secciones transversales del río Pao introducido en el modelo numérico HEC-RAS.....	90
Figura 41. Datos de flujo combinado introducidos en HEC-RAS, donde se incluye el caudal correspondiente al evento de 2005. ....	92
Figura 42. Data de flujo para caudales medidos introducida en HEC-RAS.....	94
Figura 43. Se muestra la variación altimétrica del flujo en función del coeficiente de rugosidad total, obtenida modelando el cauce del río Pao para diferentes caudales con el modelo unidimensional HEC–RAS. ....	97
Figura 44. Perfil de fondo del lecho del río Pao y perfil del nivel de agua (línea azul) obtenidos en el modelo matemático unidimensional HEC-RAS para un caudal de 120 m <sup>3</sup> /s al cual le corresponde un coeficiente de rugosidad = 0.143. .	98
Figura 45. Nivel de agua en la sección transversal, progresiva 0+250, para un caudal de 120 m <sup>3</sup> /s.....	99
Figura 46. Nivel de agua en la sección transversal ubicada en la progresiva 0+410, para un caudal de 120 m <sup>3</sup> /s.....	99
Figura 47. Curva de gasto de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+250 para un coeficiente de rugosidad $n = 0.143$ .....	100
Figura 48. Curva de gasto de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+410 para un coeficiente de rugosidad $n = 0.143$ .....	100
Figura 49. Vista 3D generada por el modelo matemático HEC-RAS, donde se muestra el transito de 120 m <sup>3</sup> /s por el cauce del río Pao en el tramo estudiado.	101

Figura 50. Error asociado al valor de coeficiente de rugosidad de Manning. El coeficiente de rugosidad correspondiente al mínimo error es: (a) 0.069 para un caudal de 7 m <sup>3</sup> /s, (b) 0.025 para un caudal de 17 m <sup>3</sup> /s. y (c) 0.022 para un caudal de 31.5 m <sup>3</sup> /s. ....	103
Figura 51. Perfiles del nivel de agua (línea azul) obtenido en el modelo matemático unidimensional HEC-RAS para un caudal de: (a) 31.5 m <sup>3</sup> /s, $n = 0.022$ , y (b) 17.0 m <sup>3</sup> /s, $n = 0.025$ .....	104
Figura 52. Modelo físico del río Pao y componentes del sistema hidráulico para suministro y desalojo de agua durante los ensayos. ....	107
Figura 53. Vista del tanque reservorio durante la prueba de carga y la estructura del mismo. ....	109
Figura 54. Modelo físico del río Pao construido en construido en plástico acrílico transparente. ....	110
Figura 55. Sistema de control de tirantes ubicado al final del tramo en estudio; compuerta vertical de pared delgada. ....	111
Figura 56. Sobre el cauce del río del modelo, en la zona donde confluyen las aguas provenientes del aliviadero y las del río (entre progresivas 0+200 y 0+250), se hicieron pasar diferentes caudales y las cotas asociadas a los mismos fueron medidas y son presentadas en esta gráfica. ....	115
Figura 57. Perfiles del río correspondiente a los caudales descargados por la válvula reguladora Howell-Bunger (en prototipo), medidos en campo, y ubicación de los limnímetros utilizados en el modelo físico. ....	116
Figura 58. Perfiles de agua generados por los caudales controlados por la válvula reguladora Howell-Bunger. ....	117

## INTRODUCCIÓN

En este trabajo especial de grado se calcula la capacidad de un tramo del cauce del río Pao aguas abajo del aliviadero del embalse Pao-La Balsa, ubicado en el estado Cojedes, de modo que los niveles de agua producidos por el nuevo sistema de alivio diseñado por la División de Estudios y Proyectos (DEYP) del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MPPpA) para aumentar la capacidad de descarga, no inunden las instalaciones de la estación de bombeo N° 2 de HIDROCENTRO. Dicha estación está ubicada sobre una planicie adyacente a la margen izquierda del río Pao, frente al aliviadero del embalse, y es la encargada de abastecer de agua al estado Aragua y parte de los estados Carabobo y Cojedes.

El cauce del río Pao en el tramo objeto de estudio, actualmente se caracteriza por la presencia de cantos y peñones que fueron colocados en el lugar para evitar erosiones en la margen izquierda del cauce y proteger así la explanada donde se ubican las estaciones de bombeo (Manuel V. Méndez, 1992), generándose una macrorugosidad del lecho y a su vez un aumento en la resistencia al flujo. Es por ello que uno de los objetivos de este trabajo especial de grado es verificar la aplicabilidad del método propuesto por Aguirre-Pe y Fuentes (1990), en el cual la resistencia variable del lecho macrorugoso se expresa en términos de un  $D_{50}$  representativo del material que compone el lecho del cauce.

Para este estudio, la selección de un valor adecuado del coeficiente de Manning ( $n$ ) del cauce para determinar la capacidad de conducción del cauce se hizo con base en una primera fase en lo observado en varias visitas a la zona, que permitió ponderar diferentes condiciones de diseño que podrían afectar el tránsito de crecientes por el canal. Posteriormente, se determinó los coeficientes de

rugosidad del lecho y márgenes por calibración, tal que se ajustaran a las características físicas actuales del cauce en el tramo en estudio.

Los perfiles de la superficie de agua para el caudal establecido (Laboratorio Nacional de Hidráulica, 2008) se obtuvieron a través del modelo matemático unidimensional HEC-RAS desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. Para ello, la data del terreno con la cual se trabajó fue ajustada a las condiciones topográficas del lugar y levantada para este trabajo de grado tomando en consideración el área de influencia del estudio, y los posibles puntos de control que permitieran una extensión lateral del tramo de acuerdo a la topografía, y los niveles máximos a esperar en el cauce.

## **CAPITULO I**

### **EL PROBLEMA**

#### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El embalse Pao-La Balsa perteneciente al Sistema Regional del Centro, uno de los sistemas de producción de la Hidrológica del Centro C.A., esta ubicado en la zona Galeras del Pao en el estado Cojedes y es el principal reservorio de agua destinada a abastecer a los estados Aragua, Carabobo y Cojedes.

En el año 2005, se presentó un evento de creciente extrema que amenazó la estabilidad del embalse ya que sobrepasó el nivel de aguas máximas (NAM) correspondiente al diseño de la presa inundando zonas aledañas. Por esta razón, el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MPPpA) se abocó al estudio del sistema de alivio del embalse de Pao-La Balsa, generando el proyecto “Nuevo Aliviadero para el Embalse del río Pao” donde se plantea optimizar la capacidad de descarga del aliviadero actual mediante un vertedero de laberinto.

Para llevar a cabo dicho proyecto, el MPPpA encomienda al LNH el estudio del comportamiento de la estructura del nuevo sistema de alivio del embalse Pao-La Balsa diseñado por la División de Estudios y Proyectos (DEYP) del MPPpA, mediante la observación de su comportamiento hidráulico en un modelo físico reducido en escala geométrica única de 1:25, que representara el nuevo sistema de alivio y zonas aledañas.

En el LNH este proyecto se denominó ESTUDIO A TRAVÉS DE MODELO FÍSICO DEL ALIVIADERO DEL EMBALSE PAO-LA Balsa, ESTADO COJEDES. En el marco de este proyecto, surge el tema del presente trabajo especial de grado en el cual se calcula la capacidad actual del cauce del río Pao para asimilar

las crecientes desalojadas por el aliviadero, y se generan los perfiles de superficie de agua para ser usados en la calibración del modelo físico.

La zona objeto de estudio comprende el tramo del cauce río Pao adyacente a la estación N° 2 de HIDROCENTRO, partiendo desde la válvula reguladora Howell-Bunger hacia aguas abajo. En este tramo, los taludes del cauce de ambas márgenes del río se caracterizan principalmente de cantos y peñones de areniscas de hasta 3 m de diámetro que fueron colocados en el lugar para evitar erosiones y proteger la explanada donde se ubican las estaciones de bombeo (Manuel V. Méndez, 1992).

## **1.2. OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Calcular la capacidad hidráulica de un tramo del cauce del río Pao, tal que los niveles producidos por el nuevo sistema de alivio no inunden las instalaciones de la estación de bombeo N° 2 de HIDROCENTRO, ubicada sobre una planicie adyacente a la margen izquierda del río.

### **Objetivos específicos**

1. Establecer cuantitativamente la longitud del tramo a estudiar.
2. Levantar la información plani-altimétrica del río Pao en el tramo seleccionado.
3. Generar un perfil longitudinal y de secciones transversales del río Pao en el tramo seleccionado.
4. Establecer las granulometrías del material a lo largo y ancho del lecho, del río Pao en el tramo seleccionado.
5. Obtener los coeficientes de resistencia al flujo, del lecho móvil y de las márgenes, para el perfil de la superficie libre del flujo en el tramo objeto de estudio.
6. Verificar la fórmula de Aguirre-Pe y Fuentes para lechos macrorugosos.
7. Obtener los datos de niveles de superficie de agua correspondiente a los caudales combinados de la Válvula reguladora Howell-Bunger y el proveniente del aliviadero del embalse Pao-La Balsa, para calibrar la rugosidad del modelo físico reducido a escala 1:25 del sistema de alivio Pao-La Balsa.

### **1.3. APORTES.**

Se calcula la capacidad hidráulica del cauce del río Pao ubicado aguas abajo del aliviadero del Embalse Pao-La Balsa, con lo cual se obtiene el caudal máximo de alivio y se proponen soluciones para reducir el riesgo de inundación de las Estaciones de bombeo de HIDROCENTRO adyacentes al cauce. Con esto último, se logrará asegurar la continuidad de abastecimiento de agua a los estados Aragua, Carabobo, y parte de Cojedes en caso de producirse un evento extremo de igual o mayor intensidad al ocurrido en el 2005.

Se verifica la aplicabilidad del método propuesto por Aguirre-Pe y Fuentes (1990) para lechos macrorugosos, despejando el tamaño del peñón que ofrece resistencia equivalente al coeficiente de rugosidad calibrado con el método HEC-RAS (flujo gradualmente variado y permanente con energía y continuidad) para un evento extremo, y se compara con los tamaños de peñones existentes en el lecho y parte de las márgenes. Además, se obtiene información acerca del tamaño predominante del material grueso del río Pao en el tramo objeto de estudio.

Se elaboran los planos de la zona objeto de estudio a partir del levantamiento topográfico y batimétrico del tramo establecido del río, y terrenos adyacentes (incluyendo las edificaciones de las estaciones de bombeo). Esta información topográfica de la zona, que era inexistente, servirá de apoyo para futuros estudios en la zona.

#### **1.4. ALCANCE.**

Se realiza un estudio hidráulico por medio del cual se genera un perfil de la superficie del agua en el tramo adyacente a las estaciones de bombeo del sistema Pao-La Balsa, a partir del cálculo de la capacidad del cauce natural tomando en cuenta la rugosidad del lecho y márgenes, para el pico de la creciente de diseño proveniente de un estudio hidrológico realizado por el Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH) en el 2008.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES

El cauce río Pao en el tramo adyacente a la estación de bombeo N°2 de HIDROCENTRO, transporta el caudal proveniente de la válvula reguladora Howell-Bunger y aproximadamente a 150 m aguas abajo de esta, se incorpora el cauce proveniente del aliviadero del Embalse Pao-La Balsa.

El cálculo de la capacidad hidráulica del cauce del río Pao en el tramo antes mencionado, requiere primeramente la estimación de los coeficientes de rugosidad de Manning que además, varían a lo largo de una sección transversal cualquiera del cauce. Tradicionalmente, el valor de coeficiente  $n$  de Manning asignado al canal en estudio se extrae de tablas elaboradas sobre la base de experiencias profesionales que, generalmente van acompañadas de fotografías que facilitan al diseñador la selección del valor más apropiado para las condiciones reales del canal, mediante comparación de las características del canal que se estudia con las de los casos mostrados en las fotografías (Chow, 1959).

Sin embargo, el problema de la escogencia de un valor de coeficiente de resistencia al flujo se incrementa en lechos compuestos de material granular móvil ya que se debe tomar en cuenta que el flujo deforma al lecho y que estas deformaciones alteran o afectan la profundidad y velocidad media del flujo. Además de estos factores también interacciona con ellos otra variable que es la tasa de transporte de sedimentos.

En el caso de ríos de baja pendiente con material del lecho relativamente pequeño, los factores que definen en mayor medida la resistencia al flujo son el

arrastre de superficie desarrollado por el contorno del curso y el arrastre de forma, vinculado al efecto de las formas de lecho en el canal. Además de estos, existen otros factores que incrementan la resistencia al flujo: las irregularidades en la forma de la sección transversal, que producen pérdidas de energía por contracción y expansión, y la presencia de vegetación u obstrucciones (naturales o hechas por el hombre) en el curso del río. Para el caso de lechos de arena, existen formulaciones propuestas por investigadores tales como Einstein y Barbarossa (1952), Engelund y Hansen (1967), Karim y Kennedy (1983) y Van Rijn (1984).

Por otro lado, a medida que la pendiente y el tamaño del material de lecho se van incrementando, el efecto de los factores y procesos mencionados anteriormente son menos dominantes y otros son los que adquieren mayor preponderancia. Así, en ríos con materiales de lecho de tamaño considerable con respecto a la profundidad, como ocurre en ríos de alta montaña, el arrastre de forma alrededor de los elementos individuales y la alteración de la superficie libre llegan a ser más importantes (Simons & Sentürk, 1992). Este caso ha sido estudiado por autores tales como Limerinos, (1970), Bathurst (1978, 1985), Thompson y Campbell (1979), Griffiths (1981), Jarret (1984) y Aguirre-Pe y Fuentes (1990) quienes han desarrollado diversas formulaciones para lechos macrorugosos y se basan en la integración Keulegan (1938), a partir de la ley de distribución media de velocidades del flujo turbulento, permanente y uniforme de Prandtl-Von Kármán, en canales rectos de fronteras rígidas y rugosas.

En el cauce del río Pao en un tramo de 500 m desde la válvula reguladora Howell-Bunger aguas abajo, los taludes de ambas márgenes del río están formados por un material coluvial caracterizado por una matriz arcillosa de color gris amarillento, con abundantes fragmentos de areniscas y lentes aislados de arena gravosa marrón cementada, sobre el cual se pueden observar en muchos sectores del cauce y sus taludes, la presencia de grandes bloques peñones de

areniscas de hasta 3 m de diámetro colocado como protección de las márgenes. Subyaciendo al coluvio, se encuentran suelos residuales arcillosos y/o lutitas que descompuestas de alta plasticidad, muy duras (Manuel Vicente Méndez, Septiembre de 2008).

En general, el cauce del río Pao se caracteriza por la presencia de cantos y peñones que fueron colocados como protección de la margen izquierda del río, aguas abajo de la presa, con el objeto de evitar eventuales acciones erosivas del agua en las márgenes, protegiéndose, por lo tanto, la explanada donde finalmente se ubicaron las estaciones Bombeo. En el estudio realizado por Manuel Vicente Méndez (1992), los cálculos hidráulicos se establecieron por las combinaciones de los flujos a través de la válvula de descarga de fondo, y sobre el aliviadero, considerando controles hidráulicos impuestos por las condiciones aguas abajo, aplicando conceptos y procedimientos de cálculo característicos del régimen gradualmente variado. El coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning fue estimado en base a inspecciones visuales, complementadas con el proceso de calibración hidráulica donde resultó valores coeficientes de Manning 0.025, 0.030 y 0.035 para las diferentes condiciones de flujo descritas en su trabajo.

En este trabajo especial de grado, los cálculos hidráulicos se realizan considerando la descarga de la válvula reguladora Howell-Bunger a máxima capacidad combinado con los caudales de alivio y suponiendo una sección de control aguas abajo.

Por otro lado, la presencia de estos materiales de gran tamaño en el tramo adyacente las estaciones de bombeo, genera un problema de macrorugosidad en el cauce de este río. Sin embargo, el caso de la macrorugosidad en canales con régimen torrencial considerando estos grandes tamaños de material fue estudiado por Aguirre-Pe y Fuentes (1990).

Aguirre-Pe y Fuentes desarrollaron una teoría de resistencia al flujo en pendiente, en cauces naturales, que toma en cuenta la existencia de una zona de estela altamente turbulenta cerca del lecho de una frontera rugosa y dieron una expresión para el factor  $f$ .

En su trabajo, dos zonas están identificadas en el campo de flujo:

La primera (zona de estela), muy cerca de la parte superior del lecho, contiene superposición de estelas generados por elementos de rugosidad salientes. En la segunda zona (zona logarítmica), localizada por encima de la primera, la distribución de velocidad es descrita en términos de un perfil logarítmico.

Otros autores, mencionados en párrafos anteriores, han estudiado la macrorugosidad pero es el trabajo de Aguirre-Pe y Fuentes que considera el tamaño del material en el rango de los cantos y peñones, como los observados en el cauce de río Pao. Es por ello, que se utiliza en este trabajo especial de grado para verificar el diámetro del material del lecho observado en campo, y lo que se explica más adelante.

## **2.2. FLUJO GRADUALMENTE VARIADO**

En un flujo de superficie libre, unidimensional, permanente y gradualmente variado la profundidad, al área, la rugosidad del lecho y márgenes, la pendiente de fondo, y el radio hidráulico cambian muy lentamente (si lo hacen) a lo largo del canal.

### **2.2.1. Fundamento teórico**

El flujo gradualmente variado, es un flujo permanente cuya profundidad varía de manera gradual a lo largo del canal.

Esta definición establece 1) El flujo es permanente; es decir, las características hidráulicas de flujo permanecen constantes para el intervalo de tiempo bajo consideración, y 2) las líneas de corriente son paralelas; es decir, prevalece la distribución hidrostática de presiones sobre la sección del canal.

Todas las teorías del flujo gradualmente variado en general giran alrededor de la siguiente suposición básica:

A. *La pérdida de energía en una sección es la misma que para un flujo uniforme que tiene la velocidad y el radio hidráulico de la sección.* De acuerdo con esta suposición, la ecuación de flujo uniforme puede utilizarse para evaluar la pendiente de energía de un flujo gradualmente variado en una sección del canal determinada, y el correspondiente coeficiente de rugosidad desarrollado en principio por flujo uniforme se aplica al flujo variado.

Además de la anterior suposición básica, también se utilizan las siguientes suposiciones donde se necesite una simplificación adicional en los análisis subsecuentes:

B. *La pendiente del canal es baja (<10%); esto significa que:*

1. La profundidad de flujo es la misma sin importar si se utiliza la dirección vertical o normal (al fondo del canal).

2. El factor de corrección de presiones  $\cos \theta$  (aplicado a la profundidad de la sección de flujo) es igual a la unidad.

3. No ocurre atrapamiento de aire. En caso de que exista un notable atrapamiento de aire, los cálculos deben llevarse a cabo, suponiendo que no existe atrapamiento y después deben corregirse utilizando la ecuación:

$$u = 10 \sqrt{\frac{0.2V^2}{gR} - 1},$$

donde  $u$  es el porcentaje de aire atrapado por unidad de volumen,  $V$  es la velocidad del flujo y  $R$  es el radio hidráulico.

C. *El canal es prismático*; es decir, el canal tiene alineamiento y forma constantes.

D. *La distribución de velocidad en la sección de canal es fija*. Luego los coeficientes de distribución de velocidades son constantes.

E. *La conductividad  $K$  (capacidad de transporte de un canal definida como  $K = Q/S^{1/2}$ ) y el factor de sección  $Z$  son funciones exponenciales de la profundidad de flujo*.

F. El coeficiente de rugosidad es independiente de la profundidad de flujo y constante a través del tramo del canal bajo consideración.

## 2.2.2. Ecuación dinámica del flujo gradualmente variado

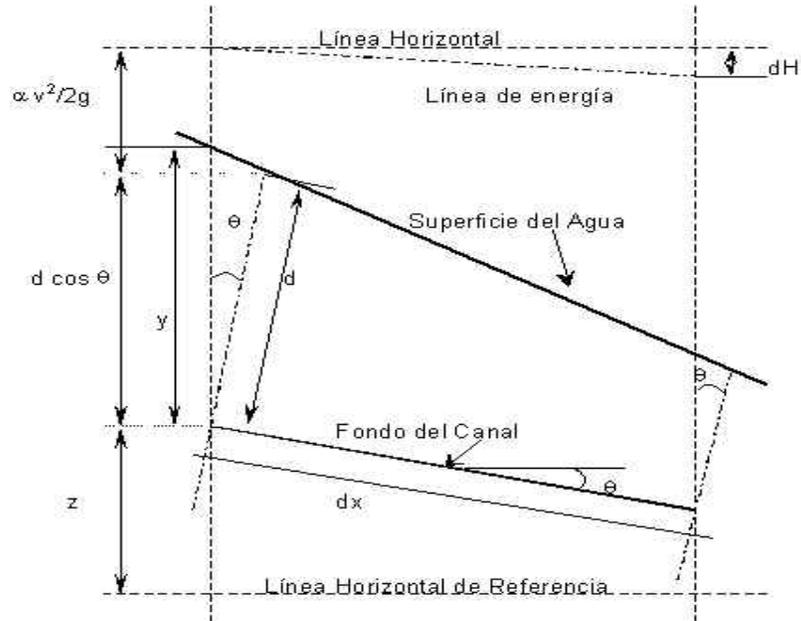


Figura 1. Deducción de la ecuación de flujo gradualmente variado.

La Figura 1 muestra el perfil de un flujo gradualmente variado en una longitud elemental  $dx$  de un canal abierto. La altura de la línea de energía en la sección aguas arriba, con respecto a la línea de referencia es

$$Z = Z + d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad [1],$$

Donde  $H$ ,  $Z$ ,  $d$  y  $\theta$  son según se muestran en la Figura 1,  $\alpha$  es el coeficiente de energía y  $V$  es la velocidad media del flujo a través de la sección.

Se asume que  $\theta$  y  $\alpha$  son constantes en el tramo del canal.

Tomando el piso del canal como el eje  $x$  y  $y$  derivando la ecuación [1] con respecto a  $x$  se obtiene,

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dZ}{dx} + \cos \theta \frac{dd}{dx} + \alpha \frac{d}{dx} \left( \frac{V^2}{2g} \right) \quad [2],$$

Si  $S_f$  es la pendiente de la línea de energía ( $S_f = -\frac{dH}{dx}$ )

$S_0$  la pendiente del piso del canal ( $S_0 = -\frac{dZ}{dx}$ ) y

$S_w$  la pendiente de la superficie del agua ( $S_w = \frac{dd}{dx}$ ),

Sustituyendo estas expresiones en la ecuación [2] y resolviendo para  $S_w$  se tiene:

$$S_w = \frac{S_0 - S_f}{\cos \theta + \alpha \frac{d}{dd} \left( \frac{V^2}{2g} \right)} \quad [3],$$

La ecuación [3] representa la pendiente de la superficie del agua con respecto al fondo del canal y se conoce como la ecuación dinámica del flujo gradualmente variado. Para pendientes pequeñas  $\cos \theta \approx 1$ ,  $d \approx y$ ,  $dd/dx \approx dy/dx$  y la ecuación [3] puede escribirse:

$$S_w = \frac{S_0 - S_f}{1 + \alpha \frac{d}{dy} \left( \frac{V^2}{2g} \right)} \quad [4],$$

Si se tiene un canal rectangular ancho, se puede calcular la superficie del piso del canal para que ocurra flujo uniforme utilizando la ecuación de Manning:

$$V = \frac{R^{2/3} S_0^{1/2}}{n}$$

Dadas las características del canal, vale la aproximación  $R = \frac{by}{b+2y} \approx y_n$

Y expresando

$$V = \frac{q}{y_n}$$

Donde  $q$  es el caudal por unidad de ancho y  $y_n$  es la profundidad normal, se obtiene

$$\frac{dV}{dx} = 0 \quad [5],$$

La suposición A nos permite usar la fórmula de flujo uniforme para calcular la pendiente de energía. Es decir:

$$S_f = \frac{n^2 q^2}{y^{10/3}} \quad [6],$$

donde  $y$  es la profundidad del flujo gradualmente variado.

El término  $\alpha \frac{d}{dy} \left( \frac{V^2}{2g} \right)$ , de la ecuación [4] puede desarrollarse así:

$$\alpha \frac{d}{dy} \left( \frac{V^2}{2g} \right) = \alpha \frac{d}{dy} \left( \frac{Q^2 A^2}{2g} \right) = \alpha \frac{Q^2}{2g} \frac{dA^{-2}}{dy} = -\frac{\alpha Q^2}{gA^3} \frac{dA}{dy}$$

Como  $\frac{dA}{dy} = T$  (ancho superior igual a  $b$  para canal rectangular,

$$\alpha \frac{d}{d_y} \left( \frac{V^2}{2g} \right) = -\frac{\alpha Q^2}{gA^3} b = -\alpha \frac{V^2}{2y} = -\alpha F^2 = -\alpha \left( \frac{y_c}{y} \right)^3 \quad [7],$$

La ecuación [4] puede expresarse según las ecuaciones [5], [6] y [7] como

$$S_w = S_0 \frac{1 - (y_n/y)^{10/3}}{1 - \alpha (y_c/y)^3} \quad [8]$$

### 2.2.3. Tipos de perfiles de flujo

Los perfiles de flujo se clasifican con base en dos criterios básicos:

1. Según su profundidad.
2. Según la pendiente del canal.

El primer criterio divide la profundidad del canal en varias zonas:

Zona 1: Sobre la profundidad normal (en pendiente subcrítica) ó sobre la profundidad crítica (en pendiente supercrítica).

Zona 2: Entre las profundidades crítica y normal.

Zona 3: Bajo la profundidad crítica (en pendiente subcrítica) ó bajo a profundidad normal (en pendiente supercrítica).

El segundo criterio considera cinco condiciones de la pendiente:

H: Horizontal.

M: Moderada o subcrítica.

C: Crítica.

S: Pronunciada o supercrítica.

A: Adversa.

Estos dos criterios permiten hacer la clasificación como H2, H3; M1, M2, M3; C1, C2, C3; S1, S2, S3; A2 y A3, donde la letra se refiere a la pendiente y el número a la zona de profundidad. En la figura 2 se describen los diferentes perfiles de flujo.

		Perfiles en la Zona 1 $Y > Y_n$ ; $S_0 > S_f$ $Y > Y_c$ ; $F^2 < 1$	Perfiles en la Zona 2 $Y_n = Y = Y_c$ ; $S_0 = S_f$ $F^2 = 1$ $Y_c = Y = Y_n$ ; $S_0 = S_f$ $F^2 = 1$	Perfiles en la Zona 3 $Y < Y_n$ ; $S_0 < S_f$ $Y < Y_c$ ; $F^2 > 1$
Pendiente Positiva $S_0 > 0$	Subcrítica: $Y_n > Y_c$	$\frac{dy}{dx} = \frac{+}{+} = +$ 	$\frac{dy}{dx} = \frac{-}{+} = -$ 	$\frac{dy}{dx} = \frac{-}{-} = +$ 
	Crítica: $Y_n = Y_c$	$\frac{dy}{dx} = \frac{+}{+} = +$ 	$\frac{dy}{dx} = 0$ 	$\frac{dy}{dx} = \frac{-}{-} = +$ 
	Supercrítica: $Y_n < Y_c$	$\frac{dy}{dx} = \frac{+}{+} = +$ 	$\frac{dy}{dx} = \frac{+}{-} = -$ 	$\frac{dy}{dx} = \frac{-}{-} = +$ 
	Pendiente Horizontal $S_0 = 0$ $Y_n > Y_c$	$\frac{dy}{dx} = \text{no existe}$ Ninguno 	$\frac{dy}{dx} = \frac{-}{+} = -$ 	$\frac{dy}{dx} = \frac{-}{-} = +$ 
Pendiente Negativa $S_0 < 0$	$\frac{dy}{dx} = \text{no existe}$ Ninguno 	$\frac{dy}{dx} = \frac{-}{+} = -$ 	$\frac{dy}{dx} = \frac{-}{-} = +$ 	

Figura 2. Clasificación de los perfiles de flujo.

#### **2.2.4. Controles y perfiles de flujo**

El perfil de agua de un canal determinado resulta, por lo general, de la unión de dos o más curvas de perfiles de flujo. Para realizar el análisis que conduzca a la selección de curvas es necesario establecer uno o más sitios de *control*.

Los controles son sitios, de partida o llegada, donde las profundidades son conocidas. Los tipos de control son:

*Controles de  $y_n$* . Todo canal que tiende al infinito tenderá a flujo uniforme. Asimismo, todo aquel que provenga de del infinito, vendrá de flujo uniforme.

*Controles de  $y_c$* . Todo sitio donde el flujo pase con su energía específica mínima, poseerá profundidad crítica. Los lugares donde esto puede ocurrir son: los escalones, los ensanchamientos, las caídas, y los cambios e pendiente de M a S.

*Controles artificiales*. Son mecanismos u obstáculos donde se obliga al líquido a tener una altura determinada que se fija a voluntad. Los más usuales son los vertederos, los orificios, las compuertas de fondo, etc.

*Controles de niveles*. Son sitios donde los niveles del líquido son conocidos para un gasto determinado, por ejemplo, una estación de aforos, o bien un cuerpo estacionario de agua como un embalse, un lago o el mar. (Bolinaga, 2002)

#### **2.2.5. Cálculo de perfil de flujo**

##### **2.2.5.1. Método directo por etapas**

Este es un método aplicable para el cálculo tanto de perfiles de flujo en canales prismáticos como en aquellos de geometría muy variada. Divide el canal en tramos cortos y desarrolla los cálculos para cada sección comenzando por una sección conocida (la sección de control por ejemplo). Si el flujo es subcrítico los

cálculos se inician desde aguas abajo y se desarrollan hacia aguas arriba y si es supercrítico se parte de aguas arriba continuándose hacia aguas abajo.

Tomando un tramo corto del canal, como lo ilustra la figura 3, se cumple que

$$S_0 \Delta x + y_1 + \alpha \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \alpha \frac{V_2^2}{2g} + S_f \Delta x \quad [9],$$

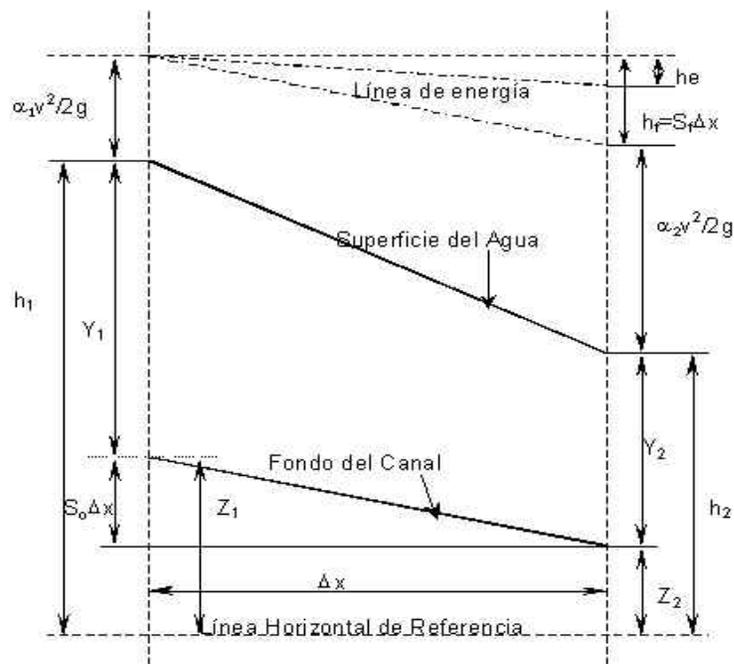


Figura 3. Tramo del canal para la deducción de los métodos de paso.

Definida la energía específica (E) como

$$E = y + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad [10],$$

Reemplazando [9] en [10] y despejando  $\Delta x$ :

$$\Delta x = \frac{E_1 - E_2}{S_0 - S_f} \quad [11],$$

La pendiente de la línea de energía en una sección puede calcularse según Manning,

$$S_f = \frac{n^2 V^2}{R^{2/3}} = \frac{n^2 q^2}{y^{10/3}} \quad [12],$$

y la pendiente de la línea de energía en un tramo se obtiene como

$$\bar{S}_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \quad [13],$$

#### 2.2.5.2. Procedimiento de cálculo

1. Conocidos  $Q$ ,  $b$  y  $y$  en la sección de control, se calcula la velocidad  $V$ , la carga de velocidad  $\frac{V^2}{2g}$  y la energía específica  $E = y + \alpha \frac{V^2}{2g}$
2. Se calcula la pendiente de la línea de energía ( $S_f$ ) según la ecuación [12].
3. Se asume una profundidad según el perfil de flujo que se presenta; se obtienen los valores de  $E$  y  $S_f$  para la sección con esta profundidad.
4. Se calcula  $\Delta E = E_2 - E_1$ , entre estas dos secciones y  $\bar{S}_f$  con la ecuación [13], con estos resultados se halla  $\Delta x$  según la ecuación [11]. Así se conoce la localización de la sección a lo largo del canal.
5. Se vuelve al paso 3.

### 2.3. ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH

Hemos visto que para expresar la pérdida de energía, se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach en su versión en función del radio hidráulico, como sigue:

$$\frac{\bar{\tau}_0 L}{\gamma R} = f \frac{L}{4R} \frac{V_n}{2g} = S_0 L,$$

o bien

$$\bar{\tau}_0 = \frac{f}{8} \rho V_n = \gamma R S_0 \quad [14],$$

que también puede expresarse como

$$V_n = \left( \frac{8gRS_0}{f} \right)^{1/2} \quad [15],$$

donde  $V_n$  es la velocidad media del flujo. La ecuación [15] permitirá calcular  $V_n$ , siempre que se conozca  $R$  (que equivale a conocer  $y_n$ ), la pendiente del fondo y el factor de fricción.

Antes que se generalizara el empleo de la ecuación de Darcy-Weisbach (desde el siglo XIX), se desarrollaron un conjunto de fórmulas empíricas para el cálculo de pérdidas de energía y caudales, tanto en tuberías como en canales con superficie libre.

### 2.4. ECUACIÓN DE CHEZY

En el año 1769 un ingeniero francés, Antoine Chezy, propuso una fórmula empírica para el cálculo del flujo en canales, que se conoce como la fórmula de Chezy, en sus dos formas

$$V = C\sqrt{RS} ; Q = CA\sqrt{RS} \quad [16],$$

donde  $C$  es el denominado coeficiente de Chezy. Para flujo uniforme ( $S = S_0$ ), se obtiene:

$$C = \frac{V_n}{R^{1/2}S_0^{1/2}},$$

que al unirse a la ecuación [15] indica que:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad [17],$$

aunque dimensional (unidades de  $L^{1/2}/T$ ); sin embargo, de la observación de la ecuación [16], se nota que en realidad  $C$  es un coeficiente de gasto. La determinación del coeficiente de Chezy conlleva entonces a la misma problemática de la determinación del factor de fricción.

## 2.5. ECUACIÓN DE MANNING

A lo largo de años se han propuesto un buen número de fórmulas empíricas para calcular el coeficiente de Chezy, siendo la más usada la fórmula de Manning que fue propuesta por el ingeniero irlandés Robert Manning a finales del siglo XIX. La fórmula de Manning fue desarrollada a partir de siete ecuaciones diferentes, basada en los datos experimentales de Bazin y además verificada mediante 170 observaciones. Esta se expresa así:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad [18]),$$

donde  $A$  y  $R$  vienen en  $m^2$  y  $m$  respectivamente,  $Q$  en  $m^3/seg$ , y  $n$ , denominada la  $n$  de Manning, es un coeficiente dependiente del material de los contornos del canal.

La ecuación anterior también puede escribirse como:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad [19]$$

Y recordando que en flujo uniforme  $S_0$  es la pérdida de fricción por unidad de longitud:

$$h_f = \frac{n^2 V^2 L}{R^{4/3}},$$

igualando esta última expresión con la ecuación de Darcy-Weisbach, para cualquier forma geométrica se obtiene:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{R^{1/6}}{\sqrt{8gn}} \quad [20]$$

Como el factor de fricción es adimensional,  $n$  debe tener dimensiones  $TL^{-1/3}$ . La comparación de la fórmula de Manning con la de Chezy permite establecer que:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \quad [21]$$

La apropiada aplicación de la formula radica en la acertada selección de l coeficiente  $n$ , para lo cual no existe método exacto. Con el nivel de conocimiento

actual esto significa estimar la resistencia al flujo en un canal determinado, lo cual realmente es un asunto de intangibles.

### **2.5.1. Factores que afectan el coeficiente de rugosidad de Manning**

En realidad el valor de  $n$  es muy variable y depende de cierto número de factores que ejercen influencia sobre el coeficiente de rugosidad tanto en canales artificiales como en canales naturales. Estos son:

- *Rugosidad superficial.* La rugosidad superficial se representa por el tamaño y la forma de los granos del material que forman el perímetro mojado y que producen un efecto retardador del flujo. Por lo general éste se considera como el único factor para la selección del coeficiente de rugosidad, pero en realidad es sólo uno de los varios factores principales. Cuando el material es fino, el valor de  $n$  es bajo y relativamente no se afecta por cambios en el nivel de flujo. Cuando el material consta de gravas y cantos rodados, el valor de  $n$  por lo general es alto. Los cantos rodados grandes a menudo se concentran en el fondo de la corriente, haciendo que el fondo del canal sea más rugoso que sus bancas e incrementando el valor de  $n$  para los niveles bajos. En niveles altos, una proporción de la energía del flujo se utiliza para mover los cantos rodados aguas abajo, lo cual incrementa el valor de  $n$
- *Vegetación.* La vegetación puede considerarse como una clase de rugosidad superficial, pero también reduce de manera notable la capacidad del canal y retarda el flujo. Este efecto depende por completo de la altura, la densidad, la distribución y del tipo de vegetación.
- *Irregularidad del canal.* Las irregularidades del canal incluyen irregularidades en el perímetro mojado y variaciones en la sección transversal, tamaño y forma de ésta a lo largo del canal. Estas

irregularidades introducen rugosidad adicional a la causada por la rugosidad superficial y otros factores.

- *Alineamiento del canal.* Curvas suaves con radios grandes producirán valores de  $n$  relativamente bajos, en tanto que curvas bruscas con meandros severos incrementarán el  $n$ .
- *Sedimentación y socavación.* En general, la sedimentación puede cambiar un canal muy irregular en un canal relativamente uniforme y disminuir el  $n$ , en tanto que la socavación puede hacer lo contrario en incrementar el  $n$ . Sin embargo, el efecto dominante de la sedimentación dependerá de la naturaleza del material depositado. Depósitos no uniformes, como barras de arena y ondulaciones de arena, constituyen irregularidades del canal e incrementan la rugosidad. Un lecho de arena o de gravas erosionará más uniformemente que un lecho de arcillas.
- *Obstrucción.* La presencia de obstrucciones de troncos, pilas de puentes y estructuras similares tiende a incrementar el  $n$ . La magnitud de este aumento depende de la naturaleza de las obstrucciones, de su tamaño, forma, número y distribución.
- *Tamaño y forma del canal.* Un incremento del radio hidráulico puede aumentar o disminuir el  $n$ , según la condición del canal.
- *Nivel y caudal.* En la mayor parte de las corrientes el valor de  $n$  disminuye con el aumento en el caudal. Cuando el agua es poco profunda, las irregularidades del fondo del canal quedan expuestas y sus efectos se vuelven pronunciados.
- *Cambio estacional.* Debido al crecimiento de plantas acuáticas, hierbas, malezas, sauces y árboles en el canal o en las bancas, el valor de  $n$  puede aumentar en la estación de crecimiento y disminuir en la estación inactiva.

- *Material en suspensión y carga de lecho.* El material en suspensión y la carga del lecho, ya sea en movimiento o no, consumirá energía e incrementará la rugosidad aparente del canal.

El cálculo del flujo uniforme por la ecuación de Manning, usa diferentes métodos para estimar el valor del coeficiente de rugosidad “ $n$ ”. Entre los más importantes figura el método del Ex-Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (S.C.S.) (Ven te Chow, 1959), hoy renombrado como servicio de conservación de los recursos Naturales (N.R.C.S.), cuyo objetivo es el de estimar la magnitud del coeficiente de rugosidad “ $n$ ” a partir de un valor básico tabulado al cual se le aplican una serie de modificaciones de acuerdo con las características del tramo que se analiza. Generalmente estas tablas van acompañadas de fotografías que facilitan al diseñador la selección del valor más apropiado para las condiciones reales del cauce mediante el proceso de similitud o comparación de las características del cauce que se estudia con la de los casos mostrados en las fotografías.

## **2.6. RESISTENCIA AL FLUJO EN CAUCES ALUVIALES**

Los flujos aluviales sobre lechos no cohesivos deforman el fondo y estas características de las deformaciones dependen de las características del flujo; éste a su vez depende de las deformaciones del lecho. Además de estos factores también interacciona con ellos otra variable que es la tasa de transporte de sedimentos.

En este sentido, la escogencia de un coeficiente de resistencia al flujo de un lecho de material granular móvil se dificulta, al tomar en cuenta que el flujo deforma al lecho y que estas deformaciones alteran o afectan la profundidad y velocidad media del flujo. Es decir, que hay una interacción entre las características hidráulicas del flujo y el coeficiente de resistencia del lecho. Este

problema ha sido estudiado por varios investigadores por lo que hoy en día no se justifica utilizar las fotografías presentadas por Ven Te Chow (1959) para seleccionar un coeficiente de Manning al tratar con ríos de importancia.

### **2.6.1. Resistencia en lechos de arena**

El método para incluir el efecto de las márgenes fue propuesto por Einstein (1950). Este método propone el cálculo de los radios hidráulicos del lecho y cada margen, para una velocidad constante, y con ello el área resistida por cada uno de estos componentes de la sección transversal, que corresponden a la componente de peso por unidad de longitud.

Einstein y Barbarossa (1952) fueron los primeros que tomaron en cuenta la influencia de la deformabilidad de los lechos al formular un predictor para la resistencia de cauces aluviales. Ellos propusieron la división de la sección transversal en dos partes. Luego supusieron que para el flujo uniforme, las componentes de peso son balanceadas por dos esfuerzos de corte;  $\tau_0'$  que es la resistencia de grano y  $\tau_0''$  la resistencia de forma.

Einstein y Barbarossa (1952) consideraron que la contribución de las deformaciones del lecho al factor de fricción, debe depender de las deformaciones, que a su vez dependen del transporte sólido, el cual según Einstein (1950) depende de un parámetro adimensional.

Posteriormente, otros autores han estudiado la resistencia al flujo en lechos de materiales no cohesivos. Engelund (1966, 1967) propuso un método que dividió la pendiente de la línea de energía en dos componentes  $S = S' + S''$ , en la cual  $S'$  es la pendiente de rugosidad del grano y  $S''$  es la pendiente adicional debido a la resistencia de forma en el lecho. Engelund aplicó dos hipótesis de similitud dadas como siguen:

1. En ríos dinámicamente similares, el parámetro de Shields  $\tau_*'$  (debido a la resistencia del grano) tienen igual valor y
2. En dos ríos dinámicamente similares, las pérdidas por expansión están en la misma fracción de la pérdida total de energía. De la definición del factor de fricción, esto es equivalente a:

$$\frac{\tau_{*1}}{\tau_{*2}} = \frac{\tau_{*1}'}{\tau_{*2}'} \quad [22]$$

Sin embargo, de acuerdo con el primer principio de similitud, el valor de  $\tau_*'$  son iguales; por lo tanto, los valores  $\tau_*$  deben ser iguales. Esto es cierto, solo si  $\tau_*$  es sólo función de  $\tau_*'$ . Engelund (1967) propuso para régimen inferior:

$$\tau_*' = 0.06 + 0.4\tau_*^2 \quad [23.a]$$

Y para regímenes superiores:

$$\tau_* = \tau_*' \quad \text{para } \tau_*' < 1 \quad [23.b]$$

$$\tau_* = \left(1.425\tau_*'^{-1.8} - 0.425\right)^{-1/1.8} \quad \text{para } \tau_*' > 1 \quad [23.c]$$

La ecuación [23.b] fue dada por Engelund (1967), mientras que la ecuación [23.c] fué propuesta por Brownlie (1983).

La aplicación del método de Engelund requiere el cálculo de la velocidad de una relación tipo Keulegan para un flujo totalmente turbulento brusco dada por Engelund como sigue:

$$\frac{V}{u_*'} = 6 + 5.75 \log \frac{R'}{2d_{65}} \quad [24],$$

en la cual  $V$  es la velocidad media de flujo;  $R$  es el radio hidráulico debido a la rugosidad del grano; y  $u_*'$  es la velocidad de corte del grano igual a  $(gR'S)^{1/2}$ . En la aplicación del método de Engelund esta implícito un cambio de la división de la pendiente de la línea de energía a la división del radio hidráulico dentro de los componentes de resistencia de grano y de forma. Para crear una relación profundidad-velocidad, se asume un valor de  $R'$  y se calcula la  $V$  con la ecuación [24] mientras que  $\tau_*'$  se calcula por  $R'S/[(SG-1)d_g]$ . Entonces de la ecuación [23], el valor de  $R$  es obtenido, con el cual se calcula el radio hidráulico como

$$R = \frac{\tau_*'(SG-1)d_g}{S} \quad [25],$$

basado en la definición de  $\tau_*$ . Para ríos muy anchos, el radio hidráulico es tomado como la profundidad  $d$ , lo cual es muy común en canales aluviales. Este método puede aplicarse a ríos con fondo plano o con dunas, y mayormente en lechos arenosos.

Otro enfoque dieron Karim y Kennedy (1983) al proponer un método recomendable para ríos grandes, con mayor alcance en cuanto al tamaño del grano ya que consideraron fondos de arena y grava. Este modelo es el resultado de una regresión múltiple no lineal basada en la velocidad del flujo, formas de fondo, tamaño de sedimentos y factor de fricción, para un conjunto de numerosos datos de ríos.

La resistencia al flujo fue formulada en términos de la proporción de los factores de fricción  $f/f_0$  en la cual  $f$  es el factor de fricción para un flujo en un lecho de sedimentos en movimiento, y  $f_0$  es un factor de fricción de referencia para flujo sobre un lecho de sedimento fijo dado por un tipo de relación Nikuradse-Keulegan como:

$$f_0 = \frac{8}{\left[ 5.75 \log \frac{12y_0}{2.5d_{50}} \right]^2} \quad [26],$$

en donde  $k_s = 2.5d_{50}$ . Este fue asumido, basado en el análisis de Engelund (1966) de flujo sobre lechos de régimen inferior, que  $f/f_0$  varía linealmente con la razón de la altura del rizo o la duna a una profundidad de flujo:

$$\frac{f}{f_0} = 1.20 + 8.92 \frac{\Delta}{y_0}, \quad [27],$$

donde los coeficientes han sido determinados de datos de ríos y canales de laboratorio. La relación de  $\Delta/y_0$ , fue desarrollada en el método original de Karim-Kennedy de los datos de Allen (1978) en términos del parámetro de Shields. La mejor relación fue dada por:

$$\frac{\Delta}{y_0} = 0.08 + 2.24 \left( \frac{\tau_*}{3} \right) - 18.13 \left( \frac{\tau_*}{3} \right)^2 + 70.9 \left( \frac{\tau_*}{3} \right)^3 - 88.33 \left( \frac{\tau_*}{3} \right)^4 \quad [28],$$

Para  $\tau_* \leq 1.5$  y  $\Delta/y_0 = 0$  para  $\tau_* > 1.5$ . Karim y Kennedy entonces aplicaron un análisis de regresión a su conjunto de datos para obtener una relación para velocidad adimensional como función de la rugosidad relativa, pendiente, y  $f/f_0$  la cual es dada por:

$$\frac{V}{\sqrt{(SG-1)gd_{50}}} = 6.683 \left( \frac{y_0}{d_{50}} \right)^{0.626} S^{0.503} \left( \frac{f}{f_0} \right)^{-0.465} \quad [29],$$

donde  $SG$  es la gravedad específica del sedimento;  $d_{50}$  es el tamaño medio del sedimento;  $S$  la pendiente del lecho;  $y_0$  la profundidad; y  $f/f_0$  es obtenido de las ecuaciones [27] y [28]. Para una profundidad dada, velocidad puede ser

calculada directamente por la ecuación [29]. Los regímenes son identificados como régimen inferior para  $\tau_* < 1.2$ , transición para  $1.2 < \tau_* < 1.5$ , y régimen superior  $\tau_* > 1.5$ .

Esto se hace interesante al comparar la ecuación [29] con la ecuación de Manning para un canal ancho al reordenarla para  $SG = 2.65$  y  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  para dar una expresión de Manning dada por:

$$n = 0.037 d_{50}^{0.126} \left( \frac{f}{f_0} \right)^{0.465} \quad [30],$$

en la que los exponentes muy pequeños en  $S$  y  $y_0$  han sido despreciados. La ecuación [30] esta en unidades SI y similar a la ecuación de Strickler con un exponente en  $d_{50}$  de 0.126, el cual esta cerca del valor de Strickler de 0.16, pero con la importante adición del termino  $f/f_0$ , que refleja la resistencia de forma del lecho.

Un enfoque alternativo para obtener relaciones profundidad-descarga fue presentado por Van Rijn (1984c) quien usó la altura prevista de la forma del lecho para inferir un componente de resistencia del equivalente a la rugosidad del grano de arena tal que  $k_s = k'_s + k''_s$ . El valor de  $k'_s$  es  $3d_{90}$ , el cual es un valor promedio tomado de una amplia variación de los datos de laboratorio y campo entre 1 y  $10d_{90}$  (Van Rijn 1982), es sustituido en la ecuación de Keulegan para definir  $u'_*$ , la velocidad de corte:

$$u'_* = \frac{V}{5.75 \log \frac{12R}{3d_{90}}} \quad [31],$$

en donde  $R$  es el radio hidráulico total. Esta es una definición algo distinta del de la  $u_*'$  en el método de Engelund, pero la velocidad final para una profundidad dada es calculada de la ecuación de Keulegan utilizando el valor total de  $k_s$  y  $u_*$ :

$$V = 5.75u_* \log \frac{12R}{3d_{90} + K_s''} \quad [32],$$

en donde  $u_* = (gRS)^{0.5}$  y  $k_s''$  para la rugosidad de forma es calculada de la altura de forma del lecho  $\Delta$  y pendiente  $\Delta/\lambda$  como:

$$k_s'' = 1.1\Delta(1 - e^{-25\Delta/\lambda}) \quad [33]$$

### 2.6.2. Resistencia en lechos de grava

En lechos de grava hay una relativa simplificación respecto al caso de los lechos de arena: el arrastre suspendido parece ser insignificante y las deformaciones de fondo son muy poco desarrolladas. Este podría deberse al fenómeno del acorazamiento, es decir, al recubrimiento de la capa superior del lecho con las partículas de grava más grandes. Por ser, entonces, la resistencia del grano la predominante, diversos autores han propuesto fórmulas de tipo logarítmico para calcular el factor de fricción del lecho de grava.

Hey (1979) introdujo el factor de forma para tomar en cuenta la forma de la sección transversal. Así derivó una ecuación de la forma:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \cdot \log_{10} \left( \frac{aR}{3.5D_{84}} \right) \quad [34],$$

donde  $a$  se encuentra en un rango de  $11.1 < a < 13.46$  y depende de la forma de la sección transversal. Rescribiendo la ecuación de Hey se obtiene:

$$V = \sqrt{32.97 gRS} \log_{10} \left( \frac{aR}{K_s} \right) \quad [35],$$

donde  $12.95 \leq a \leq 15.70$  depende de la forma de la sección transversal.

Simons et al (1979) muestran que ríos con lechos de grava, al pasar la creciente, tienen un coeficiente de Manning muy bajo. Esto se debe a que la creciente puede traer una carga de arena considerable que se deposita sobre la grava, haciendo disminuir notablemente el factor de fricción.

Parker y Peterson (1980) presentan un método de cálculo en el cual se separa la fricción de grano de la de las dunas y barras que pueden ocurrir.

Griffiths (1981) examinó muchos datos de campo de materiales gruesos y críticas previas disponibles y concluyó lo siguiente:

1. Para cauces con flujos que no mueven el material del lecho se recomienda:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0.760 + 1.981 \cdot \log \left( \frac{r_b}{d_{50}} \right) \quad [36],$$

Para tramos con rugosidad bien desarrollada, y donde  $d_{50}$  corresponde al material sobre la superficie del lecho.

2. Para canales con transporte sólido se recomienda:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.21 \left( \frac{V}{\sqrt{gd_{50}}} \right)^{0.34} \quad [37]$$

Estas fórmulas son el resultado de ajustes por regresión, esto implica considerar posibles errores antes de aplicarlas.

### 2.6.3. Factor de fricción en lechos con macrorugosidad

En el caso de lechos compuestos de cantos o peñones, se dice que existe macrorugosidad. El término se define como una rugosidad que afecta la superficie del flujo, lo cual ocurre, en promedio, cuando la altura promedio del elemento rugoso es mayor que  $\frac{1}{4}$  de la profundidad,  $d$ . Para los peñones involucrados se definen unas granulometrías por conteo:  $S_n$  es el tamaño del eje corto que es el mayor que el  $n\%$  de los ejes cortos; y  $D_n$  es definido similarmente pero para el eje mediano. De acuerdo a estos principios conceptos se tiene macrorugosidad cuando:

$$d/S_{50} < 4; d/D_{50} < 2; d/D_{84} < 1.2,$$

y rugosidad intermedia cuando

$$4 < d/S_{50} < 15; 2 < d/D_{50} < 7.5; 1.2 < d/D_{84} < 4$$

En condiciones naturales en los cauces naturales los flujos pueden ser supercríticos. Los resultados que siguen el efecto de atrapamiento de aire se considera despreciable.

Existen diversas formulaciones para estimar el coeficiente de rugosidad en el caso de flujos macrorugosos, cuyos fundamentos se basan en la integración de Keulegan (1938), a partir de la ley de distribución media de velocidades del flujo turbulento, permanente y uniforme de Prandtl-Von Kármán, en canales rectos de fronteras rígidas y rugosas.

Sin embargo, han propuesto muchas fórmulas para determinar la resistencia al flujo en lechos macrorugosos naturales también introduciendo el factor de textura en la ecuación de Keulegan:

$$\frac{U}{u^*} = C^* = \left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} = 5.75 \cdot \log\left(\frac{a \cdot R}{\alpha \cdot D}\right) \quad [38],$$

Limerinos (1970) propuso una ecuación empírica para determinar el coeficiente de Manning asociado a lechos compuestos por gravas y enrocados. El correlacionó valores de  $n$  con radio hidráulico y tamaño del sedimento de fondo. La ecuación resultante fue:

$$n = \left( \frac{a_1 \cdot d^{1/6}}{1.16 + 2.00 \cdot \log(d/D_{84})} \right) \quad [39],$$

$a_1$  es una constante igual a 0.0926 en el SI

Donde  $R$  : radio hidráulico total, ft. Los datos oscilaron desde 1 a 6 ft

$n$  : valore “n” de manning. Los datos oscilaron desde 0.02 a 0.10

$D_{84}$  : tamaño de la partícula, ft, para el cual el 84% de la muestra de sedimentos es más fino. Los datos oscilaron desde 1.5 a 250 mm

En el estudio los datos fueron relativamente amplios, con canales rectos con una simple forma trapezoidal y sin flujo en las planicies. Los resultados mostraron muy pocos incrementos en el ancho con la profundidad, y las márgenes fueron estables. Las irregularidades fueron mínimas. La cantidad de vegetación en el lecho y las márgenes fue despreciable.

Bathurst (1978) clasifica los mecanismos de resistencia al flujo sobre la base del concepto de sumergencia relativa  $d/D_m$ , donde  $d$  es la profundidad promedio de flujo y  $D_m$  es el tamaño característico de la partícula. Este propuso la expresión:

$$\left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} = \left(\frac{R}{0.365D_{84}}\right)^{2.34} \cdot \left(\frac{W}{d}\right)^{7L_e-0.56} \quad [40],$$

donde:

$W$  : Ancho superficial

$L_e$  : Razón entre el área transversal al flujo y del lecho.

$$L_e = 0.039 - 0.139 \cdot \log\left(\frac{R}{D_{84}}\right) \quad [41],$$

Thompson y Campbell (1979) efectuaron estudios sobre la estabilidad del enrocado en rápidos de alivio, obteniendo:

$$\left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} = 5.66 \cdot \log\left(1 - \frac{0.1K_w}{R}\right) \cdot \log\left(\frac{12R}{K_s}\right) \quad [42],$$

donde;  $K_w = 4.5D$

Aguirre-Pe y sus colaboradores han estudiado el caso de la macrorugosidad en canales con régimen torrencial desde los años 60. En 1980, estos demostraron que la fórmula de Keulegan, aunque se introdujese el factor de textura, era incapaz de representar la fricción y la velocidad crítica cuando el tamaño de las rugosidades era cercano al tirante sobre ellas (flujo macrorugoso).

Jarret (1984) reporta que los peñones mas grandes rara vez se mueven (en sentido general, es decir, exceptuando ocasionales movimientos aislados). Su data indica que hasta caudales de 25 años de periodo de retorno la fracción mas gruesa del material del lecho de diversos ríos del estado Colorado, USA, no se

movió. Jarret estima el coeficiente de Manning y la velocidad media en el cauce de acuerdo a:

$$n = 0.322S_f^{0.38}R^{-0.16} \quad [43],$$

$$V = 3.10R^{0.83}S_f^{0.12} \quad [44],$$

Para el cálculo del coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach, dicho autor propone la siguiente expresión:

$$\left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} = \frac{ng^{1/2}}{R^{1/6}} \quad [45],$$

Bathurst (1985) estudió especialmente en pendientes las condiciones de borde en la cual la relación  $d/D_{84} < 5$ . Se trata de una expresión válida para pendientes comprendidas entre 0.004 y 0.0364 (t.p.u) y un tamaño de sustrato de  $113mm \leq d/D_{84} \leq 740mm$ .

La ecuación que el derivó fué de la forma:

$$\left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} = 5.62 \log_{10}\left(\frac{d}{D_{84}}\right) + 4 \quad [46],$$

donde, luego de reorganizar se convierte en

$$V = \sqrt{31.6gRS} \log\left(\frac{15.44d}{k_s}\right) \quad [47]$$

Aguirre-Pe y Fuentes (1990) desarrollaron una teoría de resistencia al flujo en pendiente, en cauces naturales, que toma en cuenta la existencia de una zona de estela altamente turbulenta cerca del lecho de una frontera rugosa. Dos zonas

están identificadas en el campo de flujo. La primera, cerca de la parte superior del lecho, contiene superposición de estelas generados por elementos de rugosidad salientes (Figura 4). En la segunda zona, localizada por encima de la primera, la distribución de velocidad es descrita en términos de un perfil logarítmico. Los datos de canales artificiales son utilizados para verificar la validez de esta formulación.

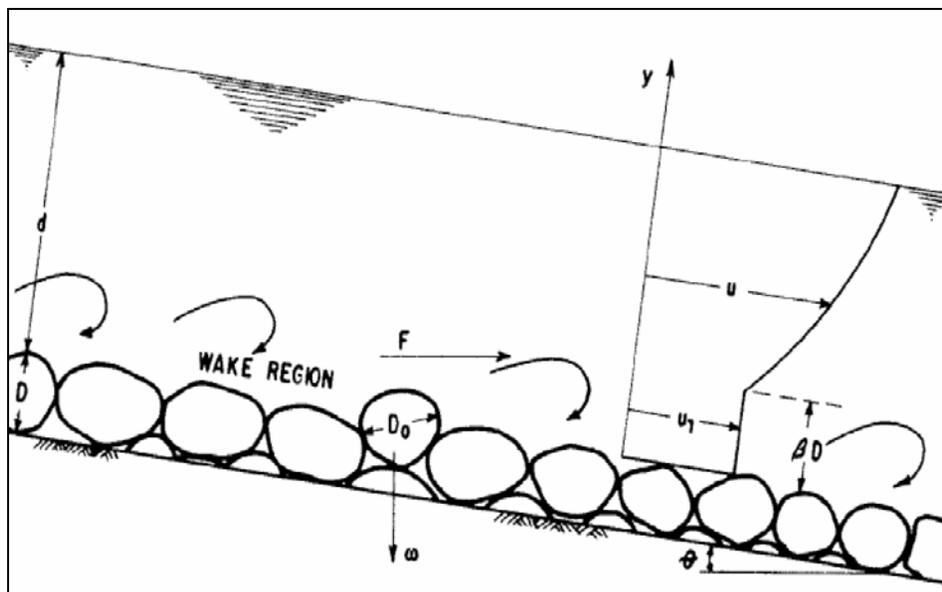


Figura 4. Distribución de velocidad y movimiento de una partícula en un canal rugoso en pendiente.

El perfil de velocidad compuesto permite para las ecuaciones obtener los factores de Darcy-Weisbach y Chezy. El enfoque propuesto es comparado con los resultados de cuatro teorías previas usando los datos de distintos ríos de montaña. Aunque el flujo real en ríos de montaña es más complicado que el caso idealizado tratado en este estudio, la formulación proporciona ecuaciones que permiten la predicción exacta de la resistencia al flujo con un error promedio de  $\pm 15\%$ .

Aguirre-Pe y Fuentes dieron una expresión para el factor  $f$ , como sigue:

$$C^* = \sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{1}{K} \times \ln\left(\frac{d}{\alpha \times D}\right) + B - \frac{1}{K} + \frac{1}{K} \times \frac{\beta \times D}{d} \quad [48],$$

donde,  $D$  es el diámetro del material.  $d$  es la profundidad del agua en la sección.  $K = 0.407$ , es la constante universal de Von Kármán.  $B$  es una función aditiva que se aproxima 8.5 para números de Reynolds con velocidad de corte alta.  $\alpha$  es un factor de textura relacionado al patrón de Nikuradse.  $\beta$  es un factor de estela.

Los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  no son fáciles de estimar de principios básicos, pero para propósitos prácticos esos valores  $\alpha = 6.8$  y  $\beta = 0.3$  interpretan bastante bien un amplio conjunto de datos de campo.

Maynord (1991) efectuó un análisis de la ecuación [38] y su aplicación para enrocados, encontrando una aproximación mejor a la constante 5.75 (propone 3.95).

García Flores (1996) establece que existen dos estados de resistencia al flujo para ríos de alta pendiente.  $R_b$  = radio hidráulico del fondo.

- Flujos rápidos: con movimiento del material de fondo.

$$C^* = 5.756 \cdot \log(d/D_{84}) + 3.698; \quad 0.3 \leq d/D_{84} \leq 100 \quad [49.a],$$

$$C^* = 5.756 \cdot \log(R_b/D_{50}) + 1.559; \quad 0.6 \leq R_b/D_{84} \leq 200 \quad [49.b]$$

Donde el coeficiente  $n$  esta dado por:

$$n = \frac{0.111d^{1/6}}{2 \log(d/D_{84}) + 1.2849},$$

- Flujos lentos: el material de fondo no se mueve y su rugosidad es de gran escala (macrorugosos).

$$C^* = 5.756 \cdot \log(d/D_{84}) + 2.2794 ; 0.3 \leq d/D_{84} \leq 100 \quad [50.a]$$

$$C^* = 5.756 \cdot \log(R_b/D_{50}) + 0.2425 ; 0.6 \leq R_b/D_{84} \leq 200 \quad [50.b]$$

Donde el coeficiente  $n$  esta dado por:

$$n = \frac{0.111d^{1/6}}{2.1 \log(d/D_{84}) + 0.7919}$$

## 2.7. SIMULACIÓN HIDRÁULICA CON HEC-RAS.

HEC-RAS es un modelo matemático unidimensional, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU, que permite el cálculo de perfiles de superficie de agua de un río en particular.

HEC-RAS es un paquete integrado de análisis hidráulica, programa en que el usuario actúa recíprocamente con el sistema a través del uso de una Interface Gráfica del Usuario (GUI). El sistema es capaz de realizar cálculos de los flujos de superficie de agua, cálculos de flujo uniforme, e incluirá Flujo .variado, transporte de sedimentos, etc.

En la terminología de HEC-RAS, un proyecto es un juego de archivos de datos asociados con un sistema de un río en particular. El modelador puede realizar cualquiera o varios tipos de análisis, incluido en el paquete de HEC-RAS, como parte del proyecto. Los archivos de datos para un proyecto se categorizan como sigue:

- Datos de planta
- Datos geométricos
- Datos de flujo uniforme
- Datos de flujo variado
- Datos de sedimentos y
- Los datos de diseño hidráulico.

Durante el curso de un estudio el calculista puede desear formular varios Planes diferentes.

Cada plan representa una simulación específica de datos geométricos y datos de flujo. Una vez introducidos los datos básicos en HEC-RAS, el proyectista puede formular nuevos planes fácilmente. Después de que las simulaciones son hechas para los varios proyectos, los resultados pueden compararse simultáneamente en la forma tabular y gráfica.

## **CAPITULO III**

### **MÉTODO**

A continuación se describen cada una de las fases que dieron como resultado el conjunto de datos numéricos que hicieron posible el estudio de la capacidad hidráulica del cauce del río Pao en un tramo adyacente a las instalaciones de la Estación de bombeo N° 2 de HIDROCENTRO.

#### **3.1. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN BÁSICA**

La recopilación de información básica se fue desarrollando a medida que se iba dimensionando el alcance del proyecto ESTUDIO A TRAVÉS DE MODELO FÍSICO DEL ALIVIADERO DEL EMBALSE PAO-LA Balsa, de la cual forma parte esta tesis de grado. De este modo, el estudio de la capacidad hidráulica del río Pao realizado en este trabajo de grado está basado en el estudio hidrológico realizado por el LNH (2008), donde se suministran los caudales de diseño a considerar en el desarrollo del estudio de soluciones que son aportados por esta tesis.

La revisión de la información disponible de la zona, suministrada por DEYP arrojó como resultado que la información existente esta basada principalmente en las obras de embalse. Los mapas, cartas y planos son los correspondientes al proyecto original, donde no se representan la totalidad del tramo pertinente del río Pao aguas abajo de la presa.

Por lo antes expuesto, y en vista a la poca información disponible para la evaluación de la capacidad hidráulica del cauce aguas abajo del sitio de presa, el LNH a través de esta tesis de grado asume la generación de la data necesaria realizando los siguientes estudios:

- Levantamiento topo-batimétrico del cauce del río Pao aguas abajo de la presa.
- Caracterización de los materiales del lecho del río Pao.

### **3.1.1. Levantamiento Topo-batimétrico de la zona en estudio**

En esta parte se describen las actividades ejecutadas en un lapso de 4 semanas que dieron como resultado el conjunto de datos de campo imprescindibles para disponer de los valores numéricos, necesarios para la confección de la topografía. Incluye el procedimiento seguido para establecer la ubicación de las estaciones desde las que se midió, mediante radiaciones desde la estación total LEICA TC 305 (figura 8), la totalidad de los puntos.

#### **3.1.1.1. Objetivo**

Levantar la información plani-altimétrica del terreno en una superficie de aproximadamente 10 ha, tomando los datos necesarios en el terreno, para representar sobre un plano a escala, su forma y accidentes con el fin de ser usados tanto para el cálculo de niveles en el modelo matemático unidimensional del río Pao en un tramo aguas abajo del aliviadero como en la construcción del modelo físico reducido.

#### **3.1.1.2. Objetivos específicos**

- Levantar las secciones transversales del tramo del río Pao en estudio.
- Levantar la batimetría de la zona de aproximación al aliviadero desde el embalse Pao-La Balsa.

### 3.1.1.3. Descripción de la zona de estudio.

- *Ubicación geográfica.* La zona objeto de estudio para el levantamiento topo-batimétrico se ubica entre las coordenadas UTM E593.300 a E593.750 y N1059.250 a N1059.500.
- *Geología.* En el sitio donde se hizo el levantamiento, las capas de areniscas son de grano fino o medio con intercalaciones de lentes conglomerado fino. Toda la arena es cuarzosa con una cementación, por lo general pobre, que por efectos de la meteorización hacen que las areniscas sean fiables; esta roca es de color gris blanquecino con manchas de color pardo rojizo causadas por la oxidación. Los afloramientos de las capas de lutita son más escasos, ya que por su naturaleza arcillosa limosa están más afectadas por la meteorización que, prácticamente en la superficie del terreno se consiguen como suelos residuales arcillosos limosos hasta arcillosos arenosos.
- *Relieve.* La zona de estudio posee montañas y colinas con serranías de bajas alturas. En las zonas aledañas se observa predominancia de lomas alargadas de poca altura denominadas galeras.
- *Clima.* En esta zona dominan las condiciones del clima tropical lluvioso de sabana con altas temperaturas y períodos alternos de fuertes sequías e intensas lluvias. La temperatura media anual se sitúa entre 27C° y 28C°. Las precipitaciones en los paisajes sabaneros alcanzan un promedio de 1600 mm al año.
- *Vegetación.* La vegetación en la zona está constituida por grandes extensiones de llanuras y sabanas pobladas de bosques de galerías que dominan el paisaje.

#### **3.1.1.4. Linderos y superficie de trabajo.**

El área donde se realizó el estudio topo-batimétrico, se localiza en las Galeras del Pao, Municipio El Pao de San Juan Bautista, en el Estado Cojedes (figura 5), tiene una superficie aproximada de 10 ha, que está comprendida por un sector del vaso de almacenamiento de la presa, el aliviadero, las instalaciones de la estación de bombeo y el cauce del río Pao hasta 725 m aguas abajo de la válvula reguladora Howell Bunger <sup>1</sup>(figura 7).

El área de estudio limita por el norte con el embalse de Pao-La Balsa, por el este con la hacienda El Cañón, por el oeste con las formaciones que dan origen a las Galeras del Pao y por el sur con el cauce del río Pao, aguas abajo de la presa.

---

<sup>1</sup> **Válvula Howell Bunger.** Es un tipo de válvula de regulación de caudales desaguados. Producen un chorro cónico abierto que dispersa la energía en la atmósfera. Se utilizan generalmente en descargas de fondo de presas, o acopladas a turbinas para reducir el golpe de ariete en la tubería de presión. Esta válvula es usada en el embalse Pao-La Balsa principalmente para mantener el caudal ecológico del río Pao aguas abajo del aliviadero.



Figura 5. Ubicación del Embalse Pao-La Balsa, Municipio El Pao, Estado Cojedes.



**Figura 6.** Zona de estudio para el levantamiento topográfico donde se muestra la estación de bombeo, adyacente al río Pao, que puede ser afectada por algún evento extremo. También, se observa la válvula reguladora Howell-Bunger y embalse Pao-La Balsa.



**Figura 7. Vista de la válvula reguladora Howell-Bunger descargando un caudal de 5 m<sup>3</sup>/s, usada para la descarga de fondo del embalse Pao La Balsa, principalmente para mantener el caudal ecológico del río Pao aguas abajo de la presa.**

#### **3.1.1.5. Equipos utilizados**

El levantamiento topográfico y batimétrico, así como el posicionamiento de las secciones del río Pao llevadas a cabo en el área de estudio se hizo con los siguientes equipos:

- *Estación total marca LEICA modelo TC 305 (Figura 8).*

Este es un aparato electro-óptico utilizado en topografía y su funcionamiento se apoya en la tecnología electrónica. Consiste en la incorporación de un distanciómetro y un microprocesador a un teodolito electrónico.

Cuenta con una pantalla alfanumérica de cristal líquido (LCD), iluminación independiente de la luz solar, distanciómetro y la posibilidad de guardar

información en formato electrónico, lo cual permite utilizarla posteriormente en ordenadores personales. Viene provista de diversos programas sencillos que permiten, entre otras capacidades, el cálculo de coordenadas en campo y replanteo de puntos de manera sencilla.



**Figura 8. Estación Total LEICA TC-305.**

Para el estacionamiento y verticalización, la estación total cuenta con niveles electrónicos que facilitan la tarea. Los tres ejes y sus errores asociados también están presentes: el de verticalidad, que con la doble compensación ve reducida su influencia sobre las lecturas horizontales, y los de colimación e inclinación del eje secundario, con el mismo comportamiento que en un teodolito clásico, salvo que el primero puede ser corregido por software, mientras que en el segundo la corrección debe realizarse por métodos mecánicos.

Las lecturas de distancia se realizan mediante una onda electromagnética portadora con distintas frecuencias que rebota en un prisma ubicado en el punto a medir y regresa, tomando el instrumento el desfase entre las ondas.

Este instrumento permite la obtención de coordenadas de puntos respecto a un sistema local o arbitrario. Para la obtención de estas coordenadas el instrumento realiza una serie de lecturas y cálculos sobre ellas y demás datos suministrados por el operador. Las lecturas que se obtienen con este instrumento son las de ángulos verticales, horizontales y distancias. Otra particularidad de este instrumento es la posibilidad de incorporarle datos como coordenadas de puntos, códigos, correcciones de presión y temperatura, etc.

La precisión de las medidas es del orden de milímetros, pudiendo realizar medidas en puntos situados hasta 2 kilómetros.

- *GPSMAP 298 SONDA GARMIN* (Figura 9).

Este instrumento es usado para determinar la distancia vertical entre el fondo del lecho y una parte determinada del casco de una embarcación.



**Figura 9. Ecosonda modelo GPSMAP 298 SONDA marca GARMIN.**

A este tipo de sonda se le llama ecoica, que son dispositivos que constan de un emisor de señales ultrasónicas y un receptor. Midiendo el tiempo entre emisión y recepción, dado que la velocidad de propagación del sonido en el agua es un valor conocido, se puede determinar el camino recorrido por la onda y por tanto la distancia al punto de reflexión.

La velocidad del sonido en el agua varía de acuerdo a densidad, temperatura y presión, pero se adopta un valor medio en condiciones normales y en base a él se determina la profundidad.

La longitud de onda empleada en estos dispositivos se encuentra en la frontera entre las sónicas y ultrasónicas, dirigiéndose en un haz de aproximadamente 20°, de forma de garantizar un rebote en el fondo casi en la vertical de la embarcación.

Las mediciones de estos tipos de sonda pueden verse afectadas por: Ecos múltiples, fruto de sucesivos reflejos en el fondo y en el casco de la embarcación. Este fenómeno se da mucho más en aguas poco profundas y se disminuye reduciendo la sensibilidad del equipo.

#### **3.1.1.6. Método usado durante el levantamiento topo-batimétrico.**

Los trabajos ejecutados se concentraron en el levantamiento plani-altimétrico de la presa adyacente al aliviadero y el cauce del río Pao, donde descargan el aliviadero y la válvula reguladora Howell-Bunger, así como la batimetría en la zona de aproximación desde el embalse al aliviadero y la estación de bombeo adyacente la margen izquierda del cauce.

Para levantar la información topográfica, se utilizaron los puntos de orientación MA-7 y MA-11 (figuras 10.a, 10.b y 11), los cuales están monumentados en hormigón macizo, con una cabilla en su centro, con sus códigos de identificación impresos en el mismo. Las coordenadas, con proyección UTM-WGS-84 y datum horizontal PSAD-56 LA CANOA, fueron obtenidas del Levantamiento geológico y topográfico realizado por JVH Ofic. Técnica (tabla 1).



(a)



(b)

Figura 10. Vista de los puntos de control monumentados. (a) Punto MA7. (b) Punto MA11.

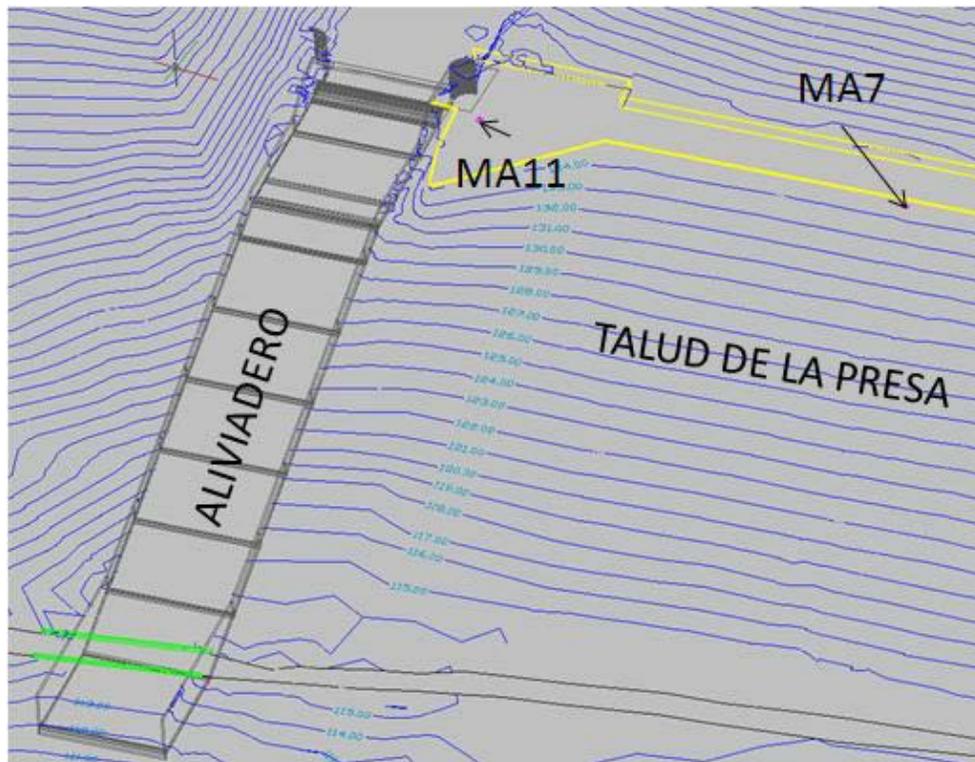


Figura 11. Ubicación aproximada de los puntos de control en el sitio de presa.

La poligonal realizada para determinar la posición plani-altimétrica de cada estación fue de tipo abierta, consta de 12 estaciones (tabla 1) cuyas coordenadas fueron obtenidas por triangulación con los puntos MA7 y MA11 (tabla 2), mediante el uso de trípodes nivelantes y monumentadas con cabillas de 30 cm. Esta técnica permitió que los errores obtenidos en la determinación de los puntos fuesen mínimos, ya que se utilizan prismas soportados en dichos trípodes. Por cada estación creada se tomaron los puntos de detalle por el método de radiación.

**Tabla 1. Coordenadas de estaciones de la poligonal.**

ESTACIÓN	ESTE	NORTE	COTA (msnm)
ST0	593536.416	1059357.452	114.071
ST1	593506.327	1059335.543	114.893
ST2	593473.385	1059317.056	115.264
ST3	593443.814	1059300.803	112.938
ST4	593424.476	1059247.937	109.014
ST5	593371,362	1059190,787	110.944
ST6	593334.428	1059184.280	108.698
ST7	593293.366	1059096.639	108.733
ST8	593268.544	1059033.071	108.803
ST9	593251.782	1058995.093	108.582
ST10	593223.935	1058871.659	108.611
ST11	593255.477	1058837.946	109.148

**Tabla 2. Coordenadas de los puntos de Control.**

Punto	Norte	Este	Cota (msnm)
MA7	1,059,456.00	593,473.00	135.412
MA11	1,059,449.14	593,421.51	135.718

### 3.1.1.7. Procedimiento del Levantamiento Topográfico.

Considérese MA-7 y MA-11 (figura 11) puntos de trabajo debidamente monumentados. Se estacionó el instrumento (figura 12) en el punto creado y denotado por las siglas “ALIV-1” y los prismas sobre los trípodes con bases

nivelantes en los puntos MA-7 y MA-11, se orientó el instrumento en el punto ALIV-1, y se determinaron las coordenadas del punto antes mencionado. Desde dicho punto se midió la primera estación (ST0) de la poligonal. Concluido esto se trasladó el equipo para la estación (ST0) y uno de los prismas con el trípode nivelante para el punto ALIV-1 para verificar la precisión de dicha estación continuando este proceso a lo largo del desarrollo de toda la poligonal.



Figura 12. Vista de la estación total estacionada en un monumento, se observa el trípode nivelante sosteniendo un prisma.

#### 3.1.1.8. Procedimiento del Levantamiento Batimétrico.

La batimetría del cauce del río Pao en el tramo considerado, se realizó a vado utilizando la Estación Total LEICA TC 305 y para lo que se procedió de la siguiente manera:

Se posicionó y orientó el instrumento en la estación STO, ubicada cerca de la progresiva 0+000. Se demarcó la sección a levantar en la progresiva mencionada,

usando una cuerda que es colocada desde una margen a otra y transversal al eje del cauce.

El mirero se introdujo con el prisma en el agua haciendo un recorrido por la sección transversal demarcada con la cuerda (figura 13), mientras es visado desde la estación total LEICA TC305 para obtener las coordenadas de la mayor cantidad de puntos que describen dicha sección

Luego se demarcó la próxima sección transversal a 25 m aguas abajo de la sección medida y de la misma manera se obtuvo las coordenadas respectivas visando desde la estación STO, mientras el alcance visual del aparato lo permitiera. En el momento que no se tuvo visual del punto a medir, se trasladó el instrumento a la próxima estación, en este caso ST1, ubicada aguas abajo de la estación anterior y desde la cual se realizó las mediciones de la mayor cantidad de secciones transversales vistas desde esta última estación.

El procedimiento se repite en cada estación hasta levantar las secciones transversales correspondientes al tramo de 725 m del río. Se contó con 12 estaciones (tabla 1) que permitieron la obtención de la información batimétrica del cauce en el tramo considerado.



**Figura 13. Se observa al personal del LNH en proceso de levantamiento de coordenadas y profundidades en el río Pao La Balsa.**

El trabajo de batimetría en el canal de aproximación del aliviadero del embalse se concentró en un área de 0.54 ha. El control sobre la profundidad se mantuvo mediante el registro continuo del ecosonda y la posición de la lancha en el plano horizontal.

Para el levantamiento de coordenadas y profundidades (figura 14), se procedió al trazado de las transversales siempre tomando cada transversal en dirección este-oeste y con una equidistancia de 10 m entre una y otra, visadas por medio del GPS incorporado al ecosonda en la dirección geográfica (este-oeste). Al finalizar el trabajo, el nivel de agua fue medido por medio de la Estación total LEICA TC 305.



**Figura 14. Se observa al personal del FLNH en pleno proceso de levantamiento de coordenadas y profundidades en el embalse Pao La Balsa en las cercanías del aliviadero.**

### **3.1.1.9. Plan de procesamiento.**

Una vez realizado el trabajo de campo se procedió al procesamiento e interpretación de los datos tanto de la topografía como de la batimetría. Con dichos datos se construyó el modelo de terreno digital usando un programa de dibujo asistido por computador y se dibujaron las curvas de nivel de la superficie en estudio. Con dichas curvas se realizaron los cortes del terreno, luego se elaboraron los planos.

Los resultados de esta fase se muestran en los planos, que contienen La topografía de la zona que comprende el cauce del río Pao y la representación gráfica de sus secciones transversales en el tramo aguas debajo del embalse Pao-La Balsa. También la batimetría de la zona adyacente al canal de aproximación del aliviadero del embalse. (Figuras 15 a la 17)

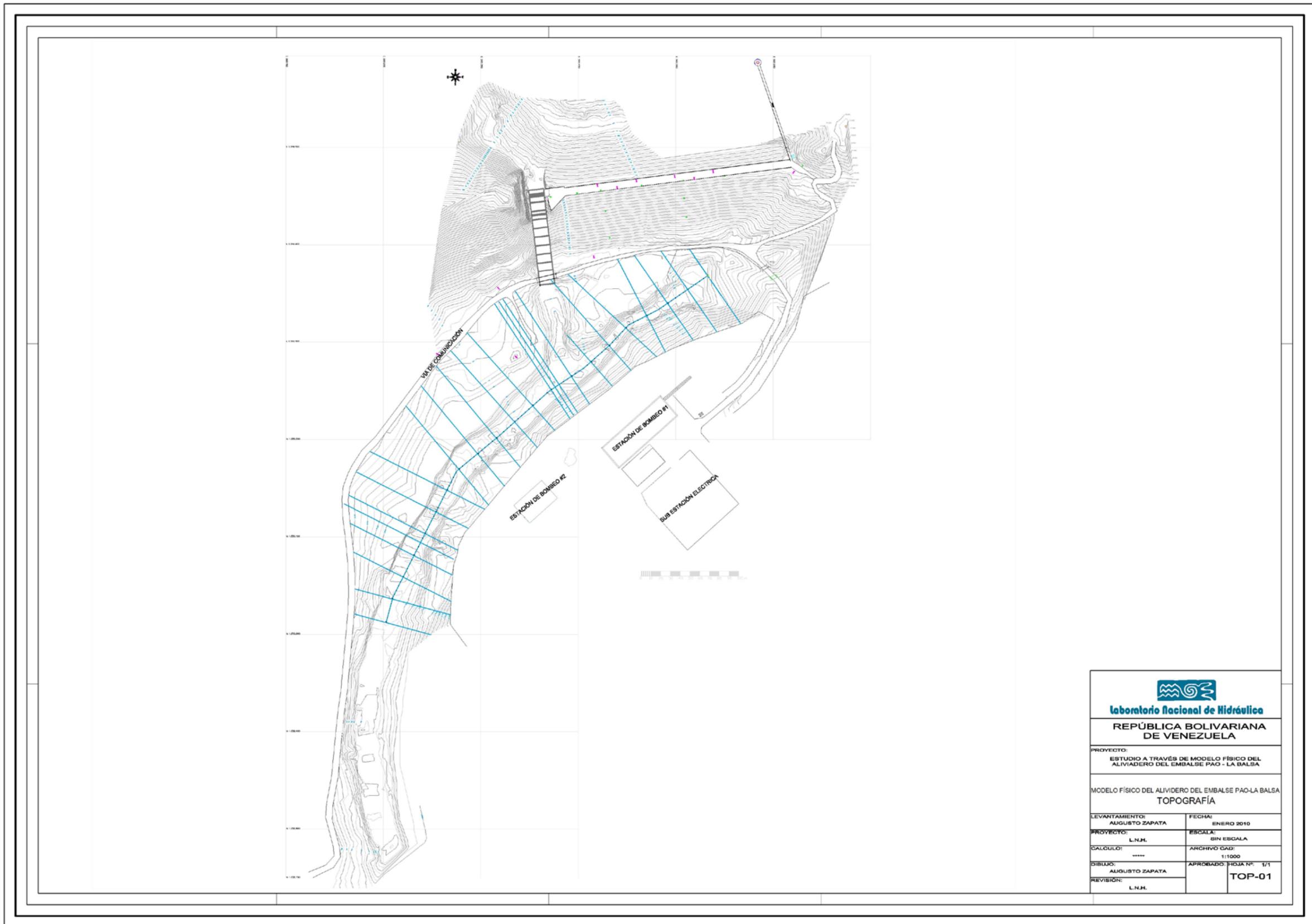
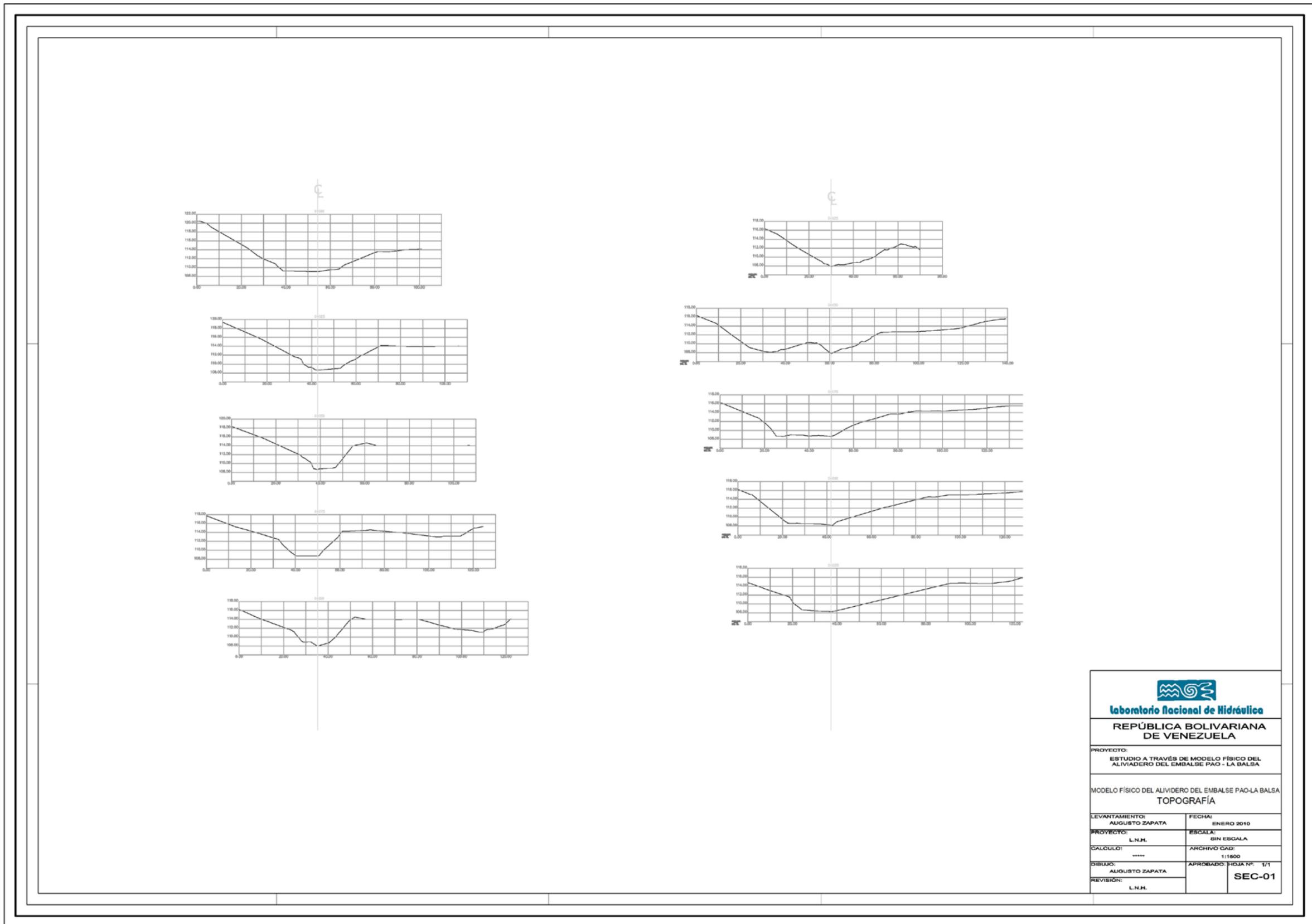
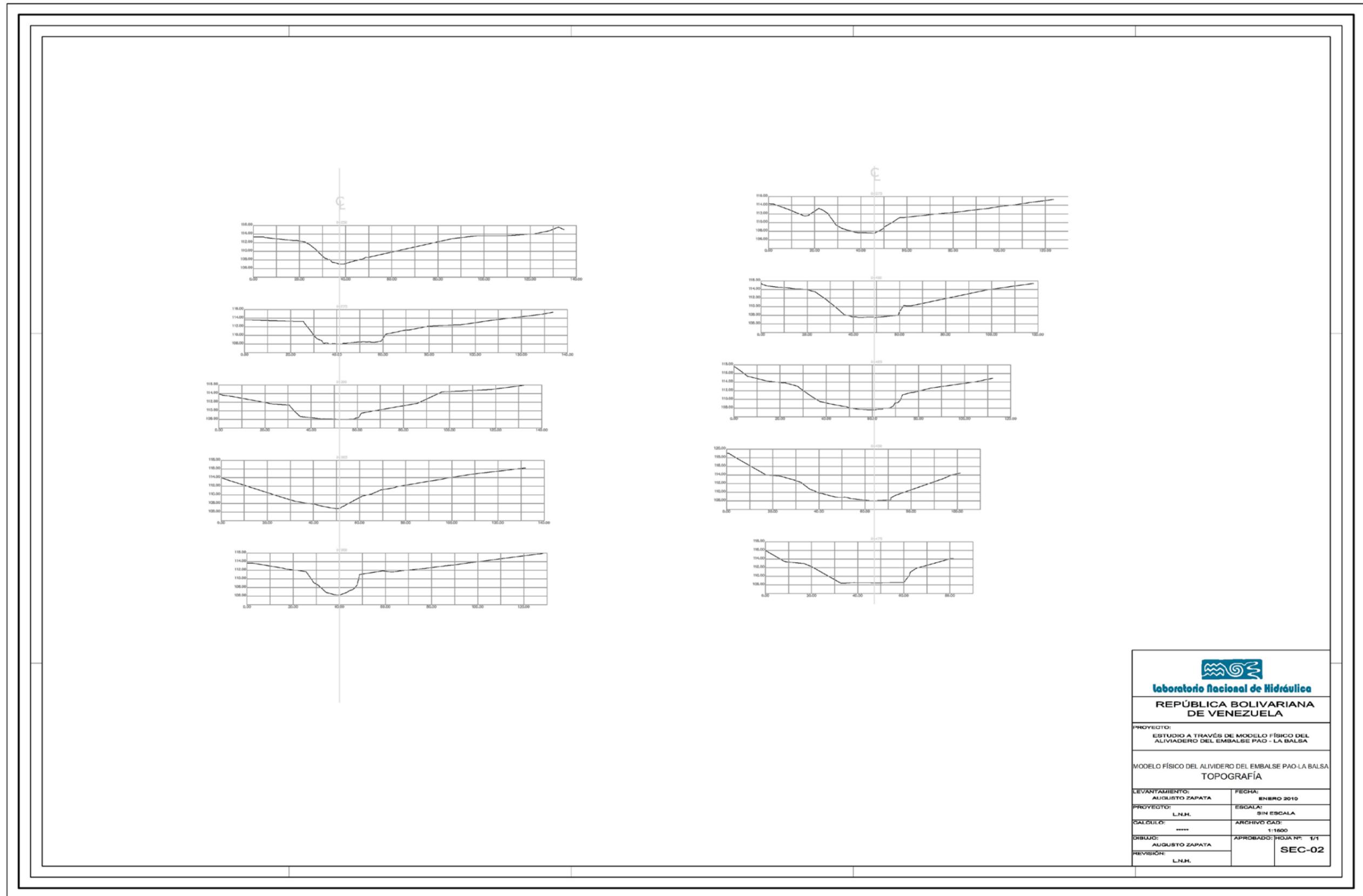


Figura 15. Plano topográfico de la zona objeto de estudio, ubicada en el Embalse Pao-La Balsa, Estado Cojedes. Se muestra la posición de las secciones transversales obtenidas a partir de las curvas de nivel.



 <b>Laboratorio Nacional de Hidráulica</b>	
<b>REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA</b>	
PROYECTO: ESTUDIO A TRAVÉS DE MODELO FÍSICO DEL ALIVIADERO DEL EMBALSE PAO - LA Balsa	
MODELO FÍSICO DEL ALIVIADERO DEL EMBALSE PAO-LA Balsa <b>TOPOGRAFÍA</b>	
LEVANTAMIENTO: AUGUSTO ZAPATA	FECHA: ENERO 2010
PROYECTO: L.N.H.	ESCALA: SIN ESCALA
CÁLCULO: *****	ARCHIVO CAD: 1:1500
DIBUJO: AUGUSTO ZAPATA	APROBADO: HOJA N°: 1/1
REVISIÓN: L.N.H.	<b>SEC-01</b>

Figura 16. Plano donde se muestra las secciones transversales del río en el tramo comprendido desde la progresiva 0+000 a la progresiva 0+225, obtenidas a partir de las curvas de nivel resultantes del levantamiento topobatemétrico del cauce.



 <b>Laboratorio Nacional de Hidráulica</b>	
<b>REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA</b>	
PROYECTO: ESTUDIO A TRAVÉS DE MODELO FÍSICO DEL ALIVIADERO DEL EMBALSE PAO - LA BALSA	
MODELO FÍSICO DEL ALIVIADERO DEL EMBALSE PAO-LA BALSA <b>TOPOGRAFÍA</b>	
LEVANTAMIENTO: AUGUSTO ZAPATA	FECHA: ENERO 2010
PROYECTO: L.N.H.	ESCALA: SIN ESCALA
CÁLCULO: ****	ARCHIVO CAD: 1:1600
DIBUJO: AUGUSTO ZAPATA	APROBADO: HOJA Nº: 1/1
REVISIÓN: L.N.H.	<b>SEC-02</b>

Figura 17. Plano donde se muestra las secciones transversales del río en el tramo comprendido desde la progresiva 0+250 a la progresiva 0+475, obtenidas a partir de las curvas de nivel resultantes del levantamiento topobatiométrico del cauce.

### **3.1.2. Caracterización de los materiales del lecho del río Pao, a lo largo y ancho del lecho, en el tramo seleccionado**

En esta fase se describen los procedimientos seguidos para la caracterización de los materiales del lecho del río Pao, incluyendo el método para la obtención de las muestras, el procesamiento de la información recolectada y el análisis de los resultados obtenidos para la modelación matemática unidimensional del río.

#### **3.1.2.1. Objetivo**

Obtener la caracterización de los materiales que conforman el lecho del río Pao en un tramo de 725 m aguas abajo de la válvula reguladora Howell Bungler, para estudiar factores tales como la rugosidad del cauce.

#### **3.1.2.2. Descripción de la zona objeto de estudio**

Esta zona comprende lo que se conoce como estructura de entrada del embalse (MOP 1997), la cual capta aguas para usos distintos a través de dos estructuras separadas.

La captación de la izquierda tiene como objetivo tomar las aguas del embalse para que a través de las estaciones de bombeo del sistema Pao-La Balsa abastecer a la zona central del país y en casos de emergencia también se pueda utilizar para el vaciado rápido del embalse.

La captación de la derecha (válvula reguladora Howell-Bunger), tiene como objeto la extracción de las aguas del embalse con fines de riego y suministro del gasto mínimo del río Pao, para el uso de estas aguas por los ribereños ubicados aguas abajo de las obras del embalse. Igualmente permite la descarga de los sedimentos depositados en las zonas próximas a las captaciones y en caso de

emergencia, o durante las operaciones de mantenimiento periódico, está destinada a operar como una descarga con el fin de lograr el vaciado del embalse.

La zona objeto de estudio comprende un tramo de 725 m de río de la denominada captación derecha medidos desde la válvula reguladora Howell-Bunger hacia aguas abajo. En este tramo el río fluye en dirección suroeste flanqueado a la derecha por la obras de captación izquierda (500 m) y en la otra margen se encuentran las obras del canal de descarga y el pozo disipador del embalse.

Los taludes del cauce de ambas márgenes del río están formados por un material coluvial caracterizado por una matriz arcillosa de color gris amarillento, con abundantes fragmentos de areniscas y lentes aislados de arena gravosa marrón cementada, sobre el cual se pueden observar en muchos sectores del cauce y sus taludes, la presencia de grandes bloques peñones de areniscas de hasta 1 m de diámetro. Subyaciendo al coluvio, se encuentran suelos residuales arcillosos y/o lutitas descompuestas de alta plasticidad, muy duras (Manuel Vicente Méndez Septiembre de 2008).

El área de descarga de la toma, así como un tramo de 500 m de longitud, presenta un enrocado de protección en el lecho y en el talud de las márgenes que va desde el lecho hasta la cota de la terraza donde está ubicada la estación de bombeo.

### **3.1.2.3. Método para recolección de muestras para el análisis granulométrico del material del lecho del río Pao**

Se graficaron las secciones transversales del río levantadas en campo y de acuerdo a lo observado en inspecciones efectuadas en el cauce documentado por fotografías, se clasificaron según su geometría y rugosidad.

En las figuras 18 a la 25, se muestra como referencia las márgenes de cada sección transversal levantada en campo y que sirvieron para asignar los valores de coeficiente  $n$  de Manning correspondientes según los valores propuestos en el libro de Chow (1953).



(a)

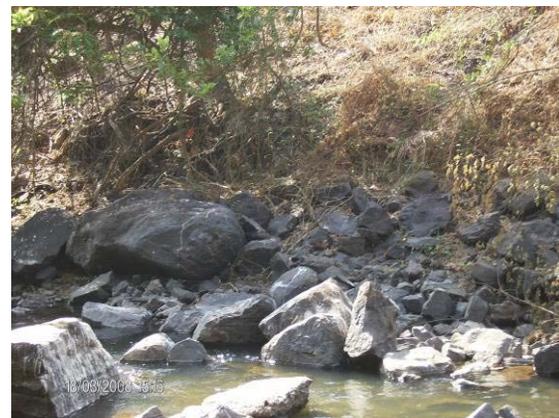


(b)

**Figura 18. Tramo del río entre las progresivas 0+000-0+025. (a) Margen izquierda (b) Margen derecha.**

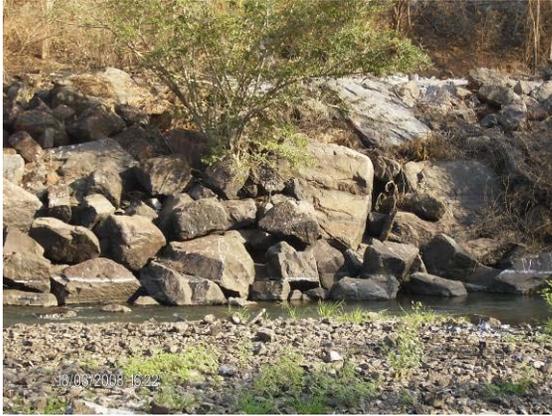


(a)

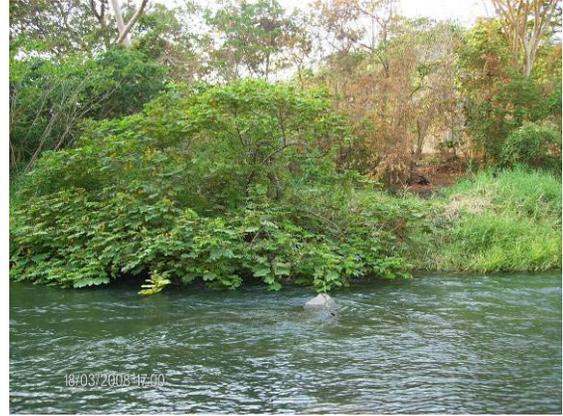


(b)

**Figura 19. Tramo del río entre las progresivas 0+025-0+175. (a) Margen izquierda, (b) Margen derecha.**



(a)

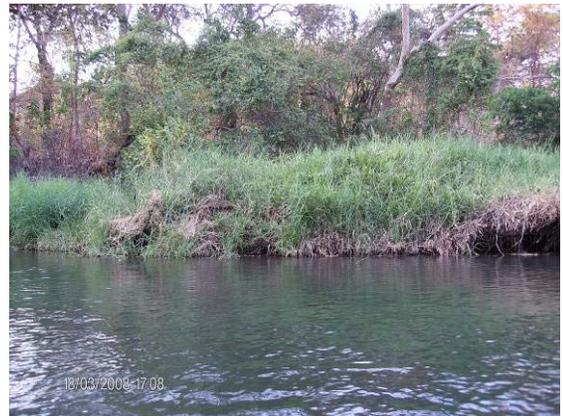


(b)

**Figura 20. Tramo del río entre las progresivas 0+175-0+225. (a) Margen Izquierda, (b) Margen derecha.**



(a)



(b)

**Figura 21. Tramo del río entre las progresivas 0+225-0+310 (a) Margen Izquierda, (b) Margen derecha.**



(a)



(b)

**Figura 22. Tramo del río entre las progresivas 0+310-0+425 (a) Margen Izquierda, (b) Margen derecha.**



(a)



(b)

**Figura 23. Tramo del río entre las progresivas 0+425-0+475 (a) Margen Izquierda, (b) Margen derecha.**



(a)



(b)

**Figura 24. Tramo del río entre las progresivas 0+475-0+525 (a) Margen Izquierda, (b) Margen derecha.**



(a)



(b)

**Figura 25. Tramo del río entre las progresivas 0+525 y 0+725 (a) Margen izquierda. (b) Margen derecha.**

En general y según las observaciones en campo (tabla 3), el lecho y las márgenes del río Pao adyacente a la estación de bombeo están compuestas en gran proporción por peñones de  $D = 1.0$  a  $3.0$  m aproximadamente (figuras 27, 30 y 32), colocados como protección. Los cantos y peñones que componen ambas márgenes del río llegan a abarcar el lecho reduciendo la sección transversal del canal (figura 29).

Por otra parte, las márgenes y lecho del río Pao presentan una variación de interés aguas abajo de la progresiva 0+175, debido a que se incorpora la descarga del aliviadero, y se observa en caudales bajos la presencia de barras en el centro del canal con cierta periodicidad. El material natural más grueso se observa depositado sobre las crestas de las barras, mientras que en algunos casos predomina el material fino sobre los valles (figuras 31.a y 31.b).

Debido a las consideraciones antes mencionadas, en cuanto a los cambios de rugosidad y geometría y también la presencia de barras centrales, se recolectaron muestras de materiales en las progresivas 0+200, 0+240, 0+425, 0+525, 0+625, 0+725 (figura 26). En cada sección transversal se tomaron tres (3) muestras; una en el centro y una a cada extremo del lecho. Se utilizó una calicata para la recolección del material, y las muestras se almacenaron en bolsas con cierre hermético con objeto de conservar su humedad natural, y posteriormente fueron transportadas en cajas refrigeradas al laboratorio de suelos para su posterior análisis granulométrico (anexos del 1 al 17).

Para considerar los materiales de mayor tamaño, cantos y peñones, el reconocimiento de campo fue soportado por fotografías correspondientes a cada margen y en cada sección transversal medida, considerando los puntos de interés observados en el tramo en estudio. Esto facilitó la asignación de los valores de  $n$  de Manning en cada sub-tramo, que posteriormente se introdujeron en el programa para iniciar el cálculo de los perfiles de superficie de agua.

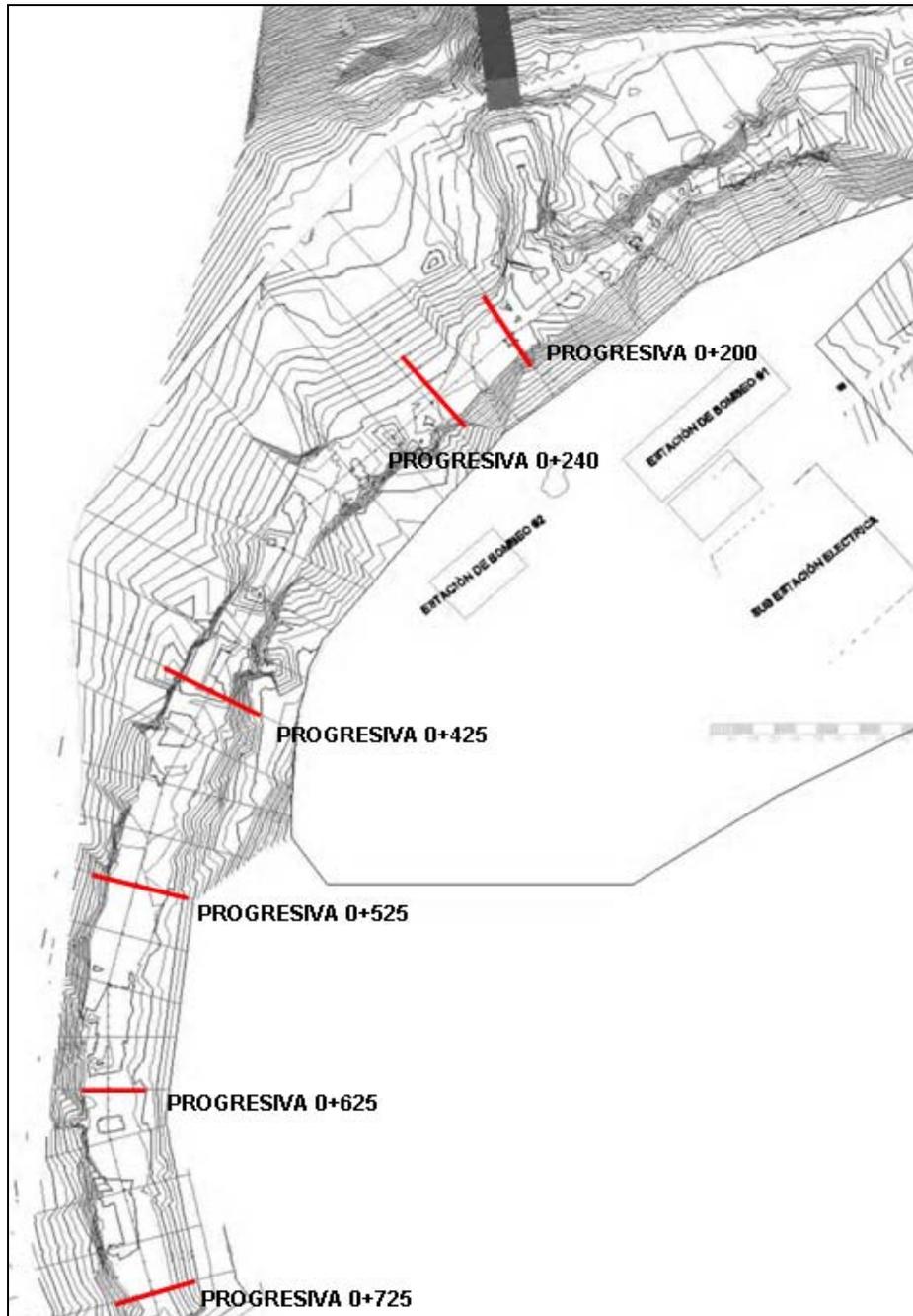


Figura 26. Vista en planta del río Pao entre las progresivas 0+200 y 0+725, donde se pueden observar la ubicación de las secciones transversales (líneas rojas) en las cuales se recogieron las muestras.



**Figura 27. Margen izquierda del río Pao en la progresiva 0+125, donde se observa gran proporción por peñones de  $D = 1.00$  a  $3.00$  m aproximadamente.**



**Figura 28. Margen derecha, progresiva 0+125. Los cantos rodados y peñones que componen ambas márgenes del río llegan a abarcar parte del lecho reduciendo la sección transversal en este sub-tramo.**

**Tabla 3. Características físicas observadas en el río Pao.**

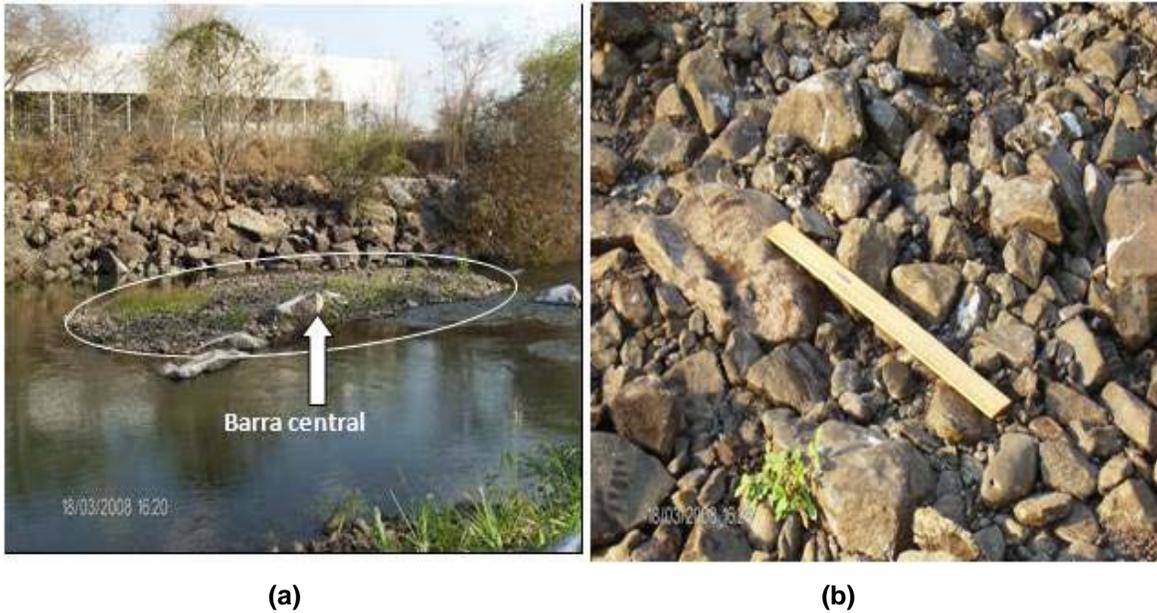
Tramo	Descripción
Desde la progresiva 0+000 a la 0+025	Las márgenes y el lecho están compuestas de rocas con una granulometría uniforme, con diámetros variados entre 1.00 y 3.00 m. En el lecho también se observó la presencia de rocas angulares, y con bordes redondeados entre 0.15 a 0.30 m de diámetro.
Desde la progresiva 0+025 a la 0+175	En la margen izquierda y lecho predominan las rocas con una granulometría uniforme de 1.00 a 3.00 m de diámetro aproximadamente. La misma distribución de granos predomina en la margen derecha pero con menor densidad de rocas, y con presencia de vegetación.
Desde la progresiva 0+175 a la 0+225	En la margen izquierda predominan las rocas con una granulometría uniforme de 1.00 a 3.00 m de diámetro aproximadamente. En esta sección por la margen derecha se incorpora un canal para la descarga del aliviadero. El fondo del cauce está compuesto de grava con menor densidad de rocas de 0.10 y 0.15 m de diámetro. A partir de esta sección se comienza a observar la presencia de barras de sedimentos compuestas por rocas que varían entre 0.10 y 0.15 m de diámetro aproximadamente. En la margen derecha se observa rocas dispersas de diámetros entre 0.50 y 1.50 m, así como vegetación densa y escombros
Desde la progresiva 0+225 a la 0+310	La margen izquierda está representada por rocas de 1.00 a 2.50 m de diámetro aproximadamente, mientras que en la margen derecha predomina la vegetación. El fondo del cauce está compuesto de grava, cubierto con una capa delgada de "limo-arcilloso".
Desde la progresiva 0+310 a la 0+425	En la margen izquierda se mantiene la misma distribución de granos $D = 1.00$ a $3.00$ m, con menor densidad, y con presencia de vegetación. El fondo del cauce está compuesto de gravas. La margen derecha está compuesta por mucha vegetación (árboles y vegetación de ribera).
Desde la progresiva 0+425 a la 0+475	Ambas márgenes presentan mucha vegetación (árboles y vegetación de ribera). En el lecho predomina la grava.
Desde la progresiva 0+475 a la 0+725	Presencia de barras conformadas por gravas. Ambas márgenes con presencia de abundante vegetación.



**Figura 29. Margen Izquierda, progresiva 0+040. El enrocado de protección es visible para ambas márgenes en la zona próxima a la válvula reguladora Howell Bunger y continúa por el talud de la margen izquierda del río adyacente a la estación de bombeo.**



**Figura 30. Enrocado de protección en el lecho y en el talud de las márgenes en el río Pao, que va desde el lecho hasta la cota de la terraza donde está ubicada la estación de bombeo de Pao-La Balsa.**



**Figura 31. (a) Barra central ubicada entre las progresivas 0+175 y 0+185, (b) Detalle del sedimento grueso observado en la misma barra.**



**Figura 32. Se observa la magnitud del diámetro del enrocado de protección empleado en las riberas del río adyacente a la estación de bombeo.**



**Figura 33. Salida de la piscina de disipación de la válvula reguladora Howell Bunger hacia el río. Las márgenes y el lecho están compuestas de rocas con una granulometría uniforme, con rocas de gran diámetro.**



**Figura 34. Margen derecha, progresiva 0+285. La vegetación es abundante en las márgenes del cauce.**



**Figura 35.** Vista aguas abajo de la progresiva 0+175. Al final del tramo se nota un flujo que tiende a ser uniforme para caudal descargado de la válvula reguladora de 5 m<sup>3</sup>/s.

#### **3.1.2.4. Método de análisis**

En el análisis de las muestras se usó el análisis por *tamizado en seco*, el cual consiste en un proceso mecánico mediante el cual se separan las partículas de un suelo en sus diferentes tamaños, realizado desde la fracción mayor, hasta la retenida en el tamiza N° 200, para la grava y arena. Se lleva a cabo utilizando tamices en orden decreciente de abertura de malla. La cantidad de suelo retenido indica la magnitud de la fracción de la muestra entre dos tamices sucesivos.

#### **3.1.2.5. Equipos**

- Tamices (3", 1 ½", ¾", 3/8", N° 4, N° 10, N° 20, N° 40, N° 100, N°200).
- Balanza con capacidad de 20 Kg.
- Horno eléctrico, envases apropiados para el manejo y secado de las muestras.

### 3.1.2.6. Análisis de la fracción gruesa

#### Procedimiento:

- Se secó el material en el horno a temperatura constante de  $105 \pm 5$  °C.
- Se tomó la muestra representativa del material, cuyo peso esta indicado en la tabla 4, en función del tamaño de sus partículas mas grandes.
- Se tamizó la muestra por los tamices de 3" al N° 10 arriba mencionados, durante 15 minutos a mano.
- Se peso la fracción retenida en cada tamiz.

Tabla 4. Peso mínimo de la muestra según las partículas más grandes del material.

Diámetro Nominal de las partículas más grandes (pulgadas)	Peso mínimo de la muestra (gr)
3/8	500
3/4	1000
1	2000
1 1/2	3000
2	4000
3	6000

### **Cálculos:**

El porcentaje retenido sobre un tamiz  $i$  se calculó así:

$$\% Ret_i = \frac{Pesoret}{pesototal} \times 100 \quad [60],$$

donde:

$\% Ret_i$ : es el porcentaje retenido en el tamiz  $i$ ;

$Pesoret$ : es el peso retenido en el tamiz  $i$ ;

$Pesototal$ : es el peso total de la muestra.

#### **3.1.2.7. Análisis de la fracción fina**

Este análisis se emplea en materiales arenosos que contengan muy poco limo y arcilla y cuyos terrones en estado seco se desintegren con facilidad.

#### **Procedimiento:**

- Se tomó de 100 a 200 grs (peso inicial) de la muestra seca que pasó por el tamiz N° 10 (2.00 mm).
- Se tamizó el material por los tamices del N° 10 al N° 200, y determinar los pesos retenidos en cada tamiz y se determinó los pesos retenidos en cada tamiz.

### **Cálculos:**

El porcentaje retenido sobre un tamiz  $i$  se calculó así:

$$\% Ret_i = \frac{Pesoret}{pesoinicial} \times (\% pasaN^{\circ}10) \quad [61],$$

donde:

$\% Ret_i$ : es el porcentaje retenido en el tamiz  $i$ ;

$Pesoret$ : es el peso retenido en el tamiz  $i$ ;

$Pesoinicial$ : es el peso de la muestra seca que pasó el tamiz N° 10 (2.00 mm).

$\% pasaN^{\circ}10$ : es el porcentaje del material pasante por el tamiz N° 10 (2.00 mm).

De las respectivas curvas granulométricas obtenidas para cada muestra, se identificó el tipo de sedimento grueso (grava o arena) representativo del material en estudio. Por lo tanto, para el análisis del sedimento que conforma el lecho del río Pao no fue necesario un análisis granulométrico detallado de la fracción fina ya que solo fue necesario conocer el tamaño del material que conforma el lecho; grava o arena.

Se obtuvo el  $D_{50}$  de la curva granulométrica de cada muestra y se calculó el  $D_{50}$  promedio del total de las muestras recolectadas en campo (tabla 5) con el objeto de obtener un  $D_{50}$  representativo del río Pao en el tramo en estudio.

**Tabla 5. Diámetros correspondientes al 50% de material más fino, en cada muestra.**

<b>Muestra N°</b>	<b>Lugar (Progresiva)</b>	<b>Margen</b>	<b>D<sub>50</sub> (mm)</b>	<b>D<sub>50</sub> promedio (mm)</b>	<b>Tipo de material</b>
1-2	0+200	Der	10.841	7.87	GRAVA
2-3		Centro	6.167		
3-2		Izq	6,616		
1-3	0+240	Der	0.264	1.39	ARENA
3-3		Izq	2.508		
1-7	0+425	Der	0.259	14.81	GRAVA
2-5		Centro	42.865		
3-5		Izq	1.301		
1-4	0+525	Der	23.656	9.92	GRAVA
2-4		Centro	4.519		
3-4		Izq	1.582		
1-1	0+625	Der	0.195	1.06	ARENA
2-1		Centro	2.272		
3-7		Izq	0.716		
1-6	0+725	Der	7.387	3.51	ARENA
2-2		Centro	3.034		
3-1		Izq	0.103		
			<b>D<sub>50</sub> total promedio(mm)</b>	<b>6.43</b>	<b>GRAVA</b>

De acuerdo con las características observadas en campo del cauce del río Pao en el tramo en estudio (tabla 3) y considerando los resultados del análisis granulométrico (tabla 5), se asignó un valor preliminar de coeficientes “*n*” de Manning en cada sección transversal, y para cada una de sus márgenes y lecho (tabla 6), según Ven Te Chow (1952).

**Tabla 6. Coeficientes “n” de Manning asignados según Ven Te Chow, a cada sección.**

Tramo	Valores de $n$ de Manning asignadas según el libro Ven Te Chow (1953)		
	Margen Izquierda	Lecho	Margen Derecha
Desde la progresiva 0+000 a la 0+025	0.10	0.10	0.10
Desde la progresiva 0+025 a la 0+175	0.10	0.10	0.10
Desde la progresiva 0+175 a la 0+225	0.09	0.06	0.06
Desde la progresiva 0+225 a la 0+310	0.08	0.08	0.06
Desde la progresiva 0+310 a la 0+425	0.075	0.053	0.030
Desde la progresiva 0+425 a la 0+475	0.070	0.053	0.030
Desde la progresiva 0+475 a la 0+725	0.030	0.053	0.030

## **3.2. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD HIDRÁULICA DEL CAUCE DEL RÍO PAO**

Se calcula la capacidad del cauce del río Pao en un tramo seleccionado mediante la aplicación de un modelo numérico unidimensional, considerando la rugosidad del lecho y márgenes del canal, para la creciente extrema proveniente del estudio hidrológico realizado por el LNH (2008). La información usada en el modelo matemático proviene del procesamiento de la información topo-batimétrica y la caracterización del material del lecho del río, referidas en las secciones 3.3.1 y 3.3.2 respectivamente.

### **3.2.1. Método**

El método empleado para llevar a cabo este estudio hidráulico consistió en:

- Visitas de campo para ponderar variables como coeficientes de rugosidad y granulometrías del lecho móvil, y otros parámetros necesarios, así como; condiciones particulares que pudiesen afectar el tránsito de crecientes por el canal de manera de poder representar en el modelo matemático en condiciones reales.
- Organización de la información topográfica de acuerdo a los requerimientos exigidos por el modelo matemático unidimensional utilizado (alineamiento del canal, perfil longitudinal y secciones transversales).
- Determinación del comportamiento del cauce en el tramo de estudio, transitando mediante el uso de un modelo unidimensional hidráulico matemático, los caudales combinados desalojados tanto por el aliviadero, y el caudal aportado por la válvula reguladora Howell Bungler.

### **3.2.2. Modelación matemática**

Para el cálculo de perfiles de superficie de agua del río Pao en el tramo en estudio se seleccionó y aplicó el programa HEC-RAS, en la hipótesis de régimen permanente y gradualmente variado.

El HEC-RAS es un modelo matemático unidimensional, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EEUU (US Army Corps of Engineers), que surge como evolución del HEC-2 pero con varias mejoras con respecto a éste, tales como el análisis con flujo no permanente, transporte de sedimentos, análisis de calidad de agua y capacidades de diseño hidráulico. Es el modelo matemático más usado por la comunidad de ingenieros hidráulicos, debido a que es un programa de dominio público, de fácil aplicación y disponibilidad, y está bien documentado.

Otros programas de dominio público, tales como el WSP2 (Water Surface Profile 2) y WSPRO (Water-Surface PROfile) que son capaces de calcular perfiles de superficie de agua y usan el método del paso estándar en la solución de la ecuación de la energía, fueron examinados pero presentaron desventajas con respecto al HEC-RAS.

El WSP2 se limita al análisis de flujo subcrítico. Hace 20 años fue uno de los programas más usados, pero su limitada aplicación hizo que su popularidad bajara y su documentación no esté fácilmente disponible. Fue creado como contraparte del HEC-2 por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) actualmente llamado Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (Natural Resources Conservation Service).

El WSPRO posee una interface gráfica poco amigable, lo que trae una desventaja de éste con respecto al HEC-RAS donde el usuario puede actuar de

forma fácil. Sin embargo, este programa desarrollado por la Federal Highway Administration (FHWA) del Departamento de Transporte de los EEUU (U.S. Department of Transportation), puede ser usado para análisis unidimensional, gradualmente variado, flujo permanente en canales abiertos, pero su uso ha sido orientado mayormente al diseño y análisis hidráulico de obras de paso.

Otros modelos unidimensionales para régimen permanente son los que resuelven las ecuaciones de Saint Venant pero manteniendo la hipótesis de unidimensionalidad (ISIS Steady de HR Wallingford, el MIKE 11 del Danish Hydraulics Institute y el SOBEK de Delft Hydraulics, entre otros), que a pesar de representar un salto cualitativo importante en cuanto a complejidad de sus esquemas numéricos, su principal desventaja es que son modelos comerciales y de uso más restringido, lo que limita su aplicación en este trabajo especial de grado.

### **3.2.3. Establecimiento de la longitud del tramo**

La data del terreno con la cual se trabajó fue adecuada a las condiciones topográficas actuales del lugar, la cual fue levantada tomando en consideración el área de influencia del estudio, y los posibles puntos de control que permitieran una extensión lateral del tramo de acuerdo a la topografía y de los niveles máximos a esperar en el cauce.

La identificación de controles hidráulicos *in situ* aunada a la información topobatómetrica referida en la sección 3.1.1, permitió establecer la longitud del tramo necesaria para calcular el perfil de agua en el cauce del río Pao mediante el modelo matemático. Esta longitud se estableció en 500 m a partir de la descarga de fondo ubicada en lo que se denominó para este trabajo de grado progresiva 0+000 (figura 36).

En la progresiva 0+025, se identificó un control hidráulico cercano a la válvula reguladora Howell-Bunger, a la salida de la piscina de disipación (figura 36). Adicionalmente, se identificaron controles hidráulico en la progresiva 0+100, donde se encuentra una contracción del canal del río y en la progresiva 0+410, cercano al final de la cerca perimetral que bordea la estación de bombeo N° 2 de HIDROCENTRO. Después de la progresiva 0+410 se observa una planicie de inundación con abundante vegetación y donde se fija el límite inferior para el modelo matemático.

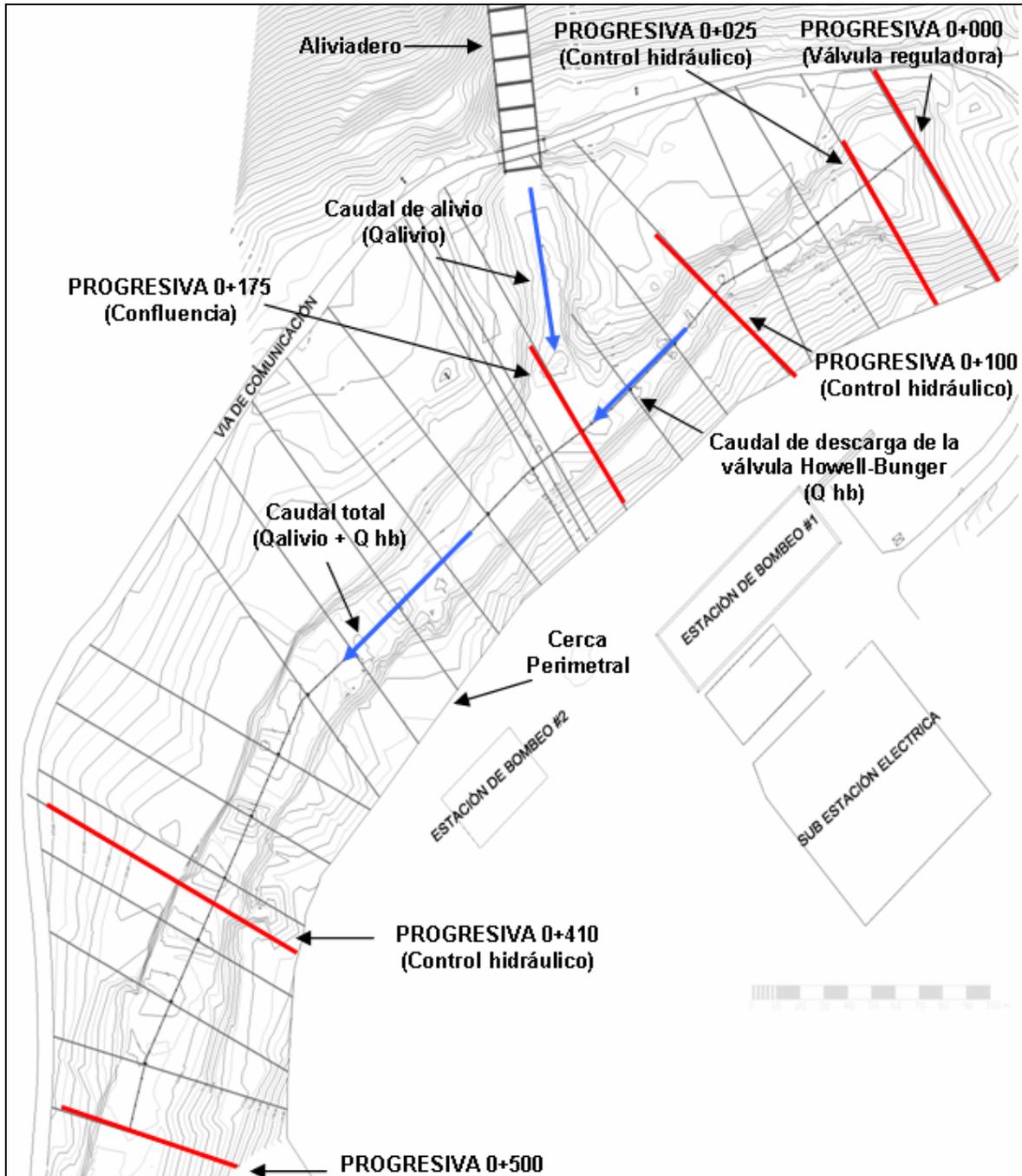


Figura 36. Ubicación de los controles hidráulicos identificados en el tramo de estudio. También se muestra el transito de caudales por el cauce del río Pao, considerando el caudal de alivio y el caudal descargado por la válvula reguladora Howell-Bunger.

### 3.2.4. Geometría

Para caracterizar el cauce del río Pao en el sector de interés para el modelo matemático, se obtuvieron 20 secciones transversales distribuidas a lo largo del tramo seleccionado con una separación de 25 m entre secciones consecutivas, lo que permitió obtener la mejor representación de los detalles necesarios para determinar la configuración del terreno en la zona de estudio, así como la información referente al perfil longitudinal y cota de los puntos clave, a partir del levantamiento topo-batimétrico referido en la sección 3.1.1.

Las secciones transversales del cauce tienen forma irregular (figura 37), aunque su forma varía gradualmente entre una sección y la siguiente (figura 38). La longitud de las márgenes en una sección transversal cualquiera del canal es mayor que la longitud del lecho en la misma sección.

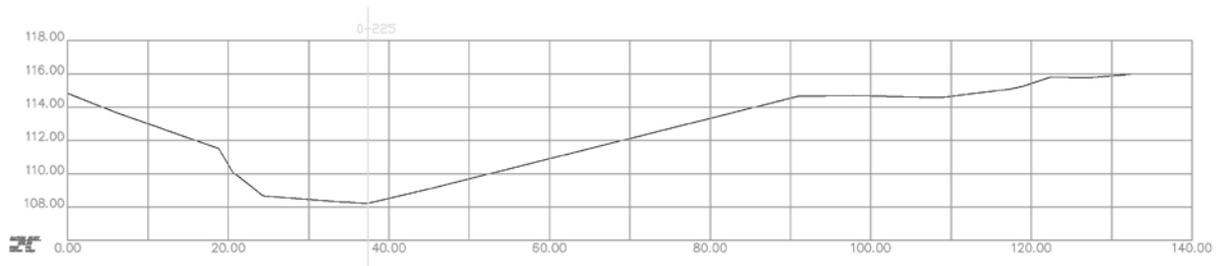
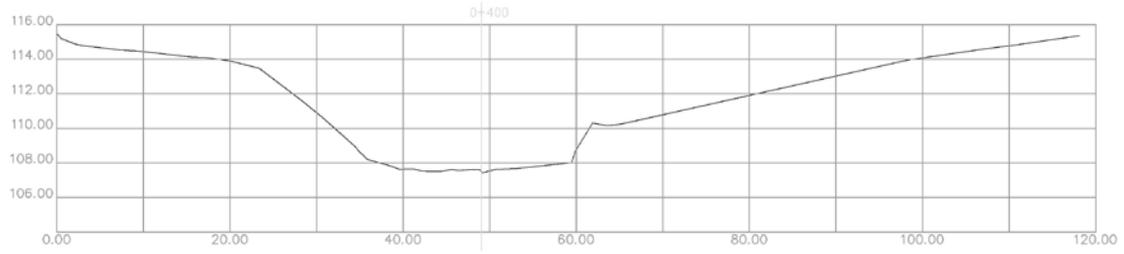
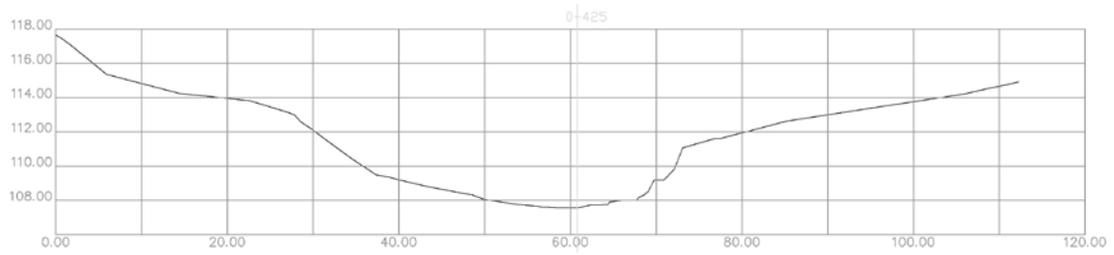


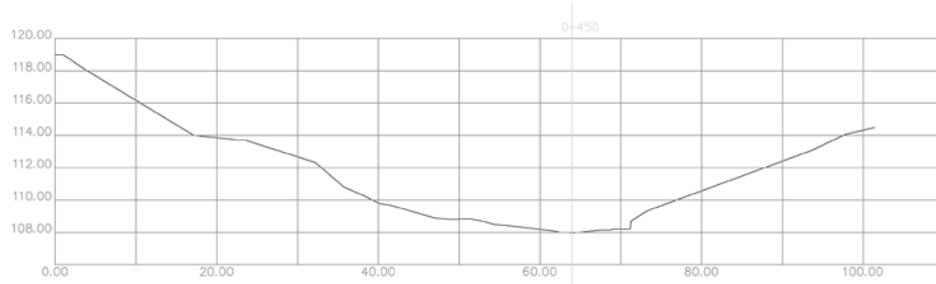
Figura 37. Sección transversal típica del río Pao en el tramo de estudio.



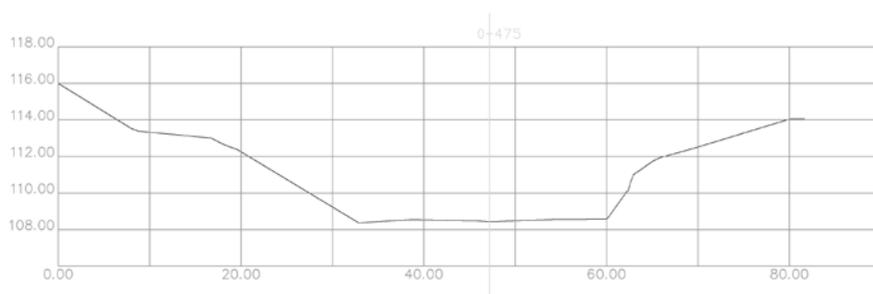
(a)



(b)



(c)

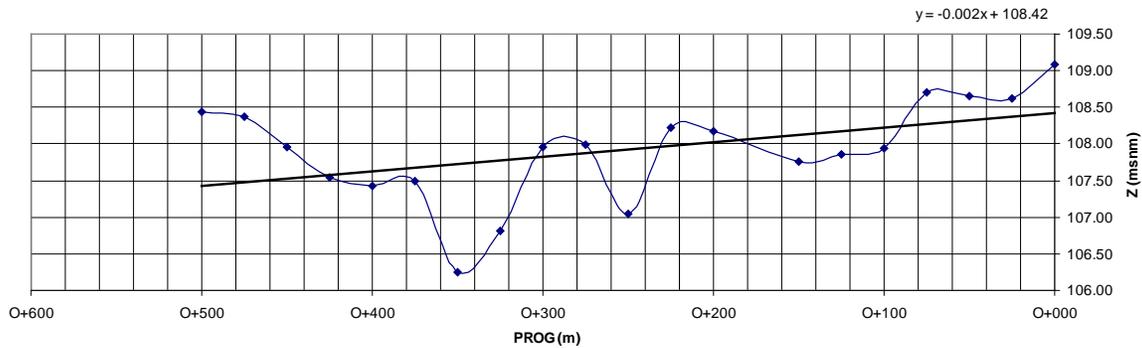


(d)

**Figura 38. Secciones transversales ubicadas en las progresivas 0+400 (38.a), 0+425 (38.b), 0+450 (38.c) y 0+475 (38.d) respectivamente. Se muestra el cambio gradual en la geometría entre secciones consecutivas y la forma irregular en cada sección.**

El lecho del tramo de 500 m es de forma irregular, lo cual se evidencia en la presencia de barras de sedimentos con cierta periodicidad.

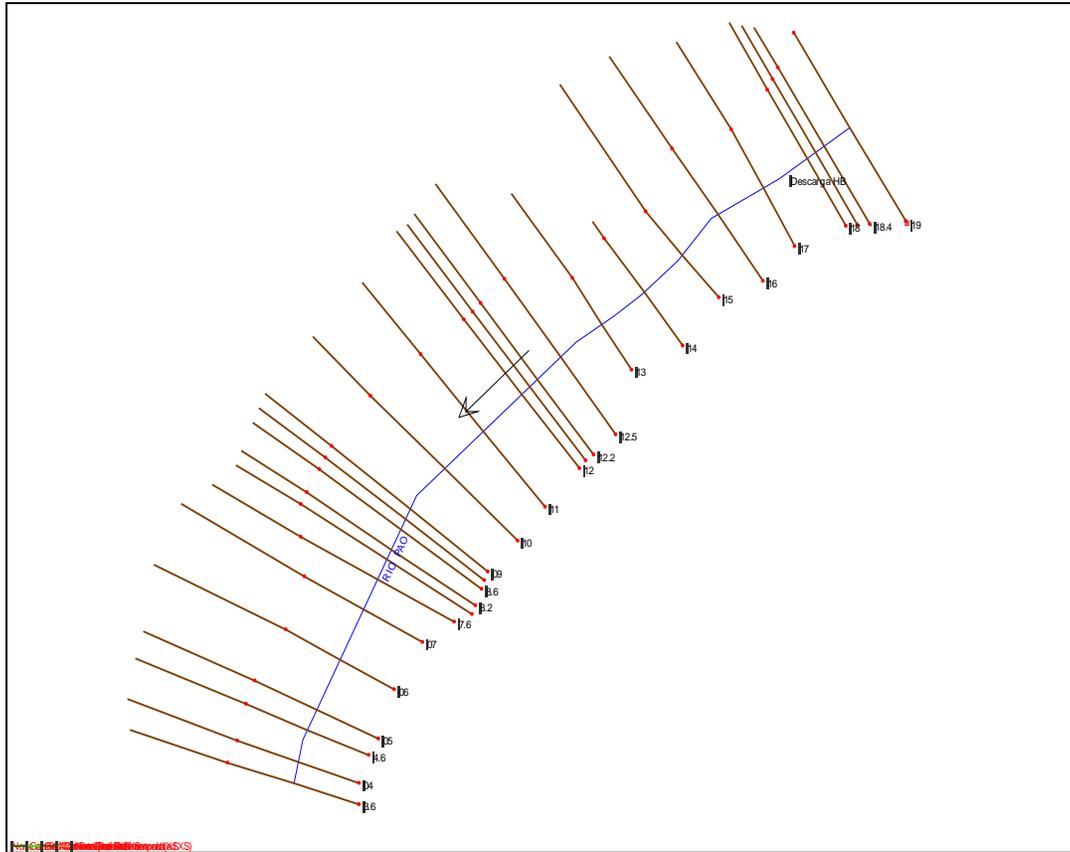
Las irregularidades de la forma del lecho a lo largo del tramo, implican fuertes variaciones en la pendiente del lecho entre dos secciones consecutivas. Sin embargo, para facilitar los cálculos se asumió una pendiente promedio del tramo de 0.2 % igual a la pendiente de la recta de mejor ajuste calculada por el método de los mínimos cuadrados, usando los puntos más bajos de cada sección transversal en los cálculos. (Figura 39)



**Figura 39. Perfil longitudinal del río Pao, en un tramo de 500 m aguas abajo de la válvula reguladora Howell-Bunger.**

El cauce presenta una ancho promedio total de 76.5 m que incluye márgenes y lecho. El lecho activo tiene un ancho promedio de 15 m.

La información geométrica introducida en el HEC-RAS, consistió en un alineamiento recto (figura 40) donde se incorporó el canal en la progresiva 0+175 que corresponde a la descarga proveniente del aliviadero, definido por las secciones transversales obtenidas mediante el levantamiento topo-batimétrico.



**Figura 40. Vista de planta del alineamiento y secciones transversales del río Pao introducido en el modelo numérico HEC-RAS.**

### **3.2.5. Caudales transitados por el cauce del río Pao en el tramo en estudio**

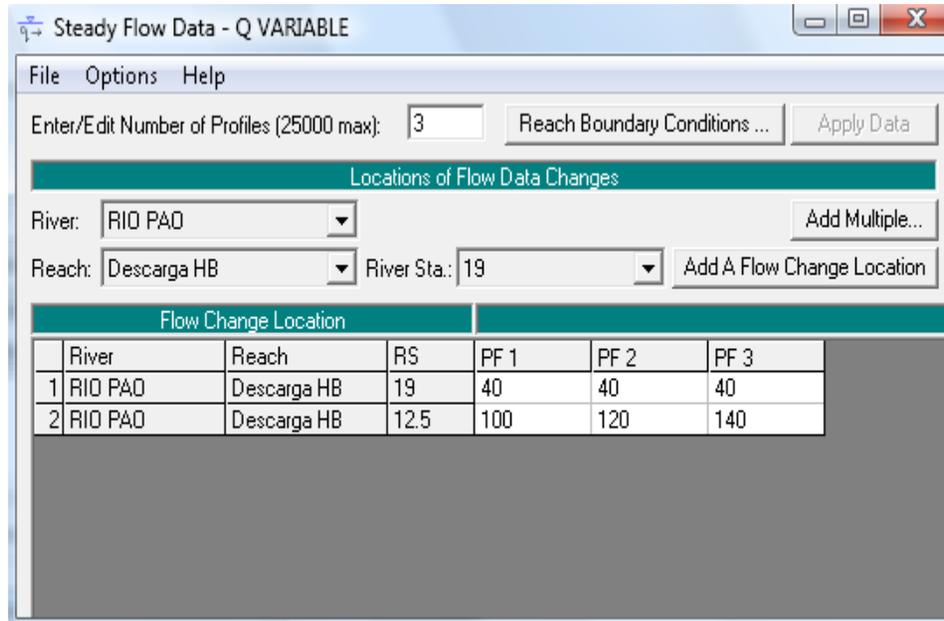
El caudal presente en el río Pao durante la creciente ocurrida en el 2005 se estimó en el orden de 110 m<sup>3</sup>/s (LNH, 2008), donde las aguas combinadas provenientes del aliviadero y la válvula reguladora Howell-Bunger llegaron muy próximas a la cerca perimetral de ALFAJOL que demarca la Estación de Bombeo N° 2 de HIDROCENTRO.

Para esa fecha, el personal que labora en la estación de bombeo reportó un nivel máximo de agua que llegó aproximadamente a la cota 113 msnm en la

Progresiva 0+250, por lo que se estableció la cota 113 msnm como limitante máxima del flujo en esta zona.

El caudal adoptado para los cálculos en este trabajo especial de grado fué de 120 m<sup>3</sup>/s como condición de flujo más desfavorable, para la cota antes mencionada. Los cálculos se efectuaron variando los caudales en un rango entre 100 y 140 m<sup>3</sup>/s para la cota 113 msnm, con el objeto de observar el comportamiento hidráulico del cauce al transitar dichos caudales y comparar con el caudal establecido como condición de flujo.

La data de flujo introducida en el modelo matemático HEC-RAS fue una descarga máxima de la válvula reguladora Howell-Bunger (progresiva 0+000) de 40 m<sup>3</sup>/s que fluye únicamente hasta la progresiva 0+175 donde se incorpora el caudal de alivio de 80 m<sup>3</sup>/s, para formar el caudal total de 120 m<sup>3</sup>/s que transitará el resto del tramo (figura 36). De forma similar, los caudales de 100 y 140 m<sup>3</sup>/s fluyen en el tramo seleccionado incluyendo en ellos la máxima descarga de la válvula Howell-Bunger (40 m<sup>3</sup>/s). (Figura 41)



**Figura 41. Datos de flujo combinado introducidos en HEC-RAS, donde se incluye el caudal correspondiente al evento de 2005.**

### **3.2.5.1. Mediciones de cotas de superficie de agua.**

Gracias a la colaboración de HIDROCENTRO se efectuó una breve campaña de aforo, donde se levantó información correspondiente a las cotas de los niveles de superficie de agua generados por los diferentes caudales 7, 17 y 31.5 m<sup>3</sup>/s que corresponden a las aperturas de la válvula reguladora Howell-Bunger de 10, 25, y 75% respectivamente.

El procedimiento comenzó con una apertura de 10 % de la válvula reguladora para descargar un caudal de 7 m<sup>3</sup>/s. Transcurrido un intervalo de tiempo de aproximadamente una hora, una vez estabilizado el flujo, se tomó mediciones de la cota de la superficie de agua en diferentes secciones transversales del río Pao con la estación total LEICA. Se repitió el procedimiento para los demás caudales arriba citados. (Tabla 7)

Estas relaciones entre niveles de agua y caudales (figura 42), fueron útiles para plantear las condiciones de borde necesarias para calibrar la rugosidad del canal, cuando el flujo de agua transitado es únicamente controlado por la válvula reguladora y donde la resistencia al flujo es causada por la grava que compone el lecho.

**Tabla 7. Cotas de la superficie de agua medidas a lo largo de diferentes ubicaciones del río Pao correspondientes a las aperturas de 10, 25 y 75% de la válvula reguladora Howell-Bunger.**

<b>CAUDAL</b>	<b>7 m³/s (10%)</b>	<b>17 m³/s (25%)</b>	<b>31.5 m³/s (75%)</b>
<b>Progresiva</b>	<b>COTA</b>	<b>COTA</b>	<b>COTA</b>
O+015	-	-	<b>110.619</b>
O+020	-	-	<b>110.514</b>
O+075	-	-	<b>110.378</b>
O+190	<b>108.875</b>	<b>109.178</b>	<b>109.634</b>
O+195	<b>108.890</b>	-	-
O+200	-	<b>109.142</b>	<b>109.642</b>
O+225	<b>108.752</b>	<b>109.068</b>	<b>109.583</b>
O+280	<b>108.687</b>	-	-
O+285	-	<b>108.992</b>	<b>109.472</b>
O+290	<b>108.685</b>	<b>108.990</b>	-
O+300	-	-	<b>109.487</b>
O+310	<b>108.648</b>	<b>108.973</b>	<b>109.490</b>
O+375	-	<b>108.970</b>	-
O+385	-	-	<b>109.490</b>
O+410	-	<b>108.949</b>	<b>109.488</b>

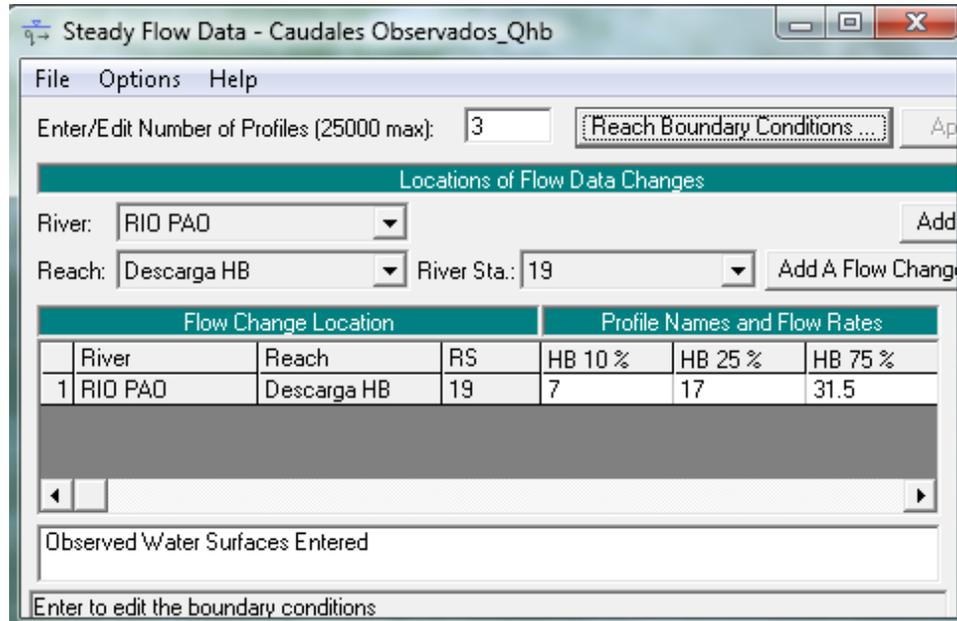


Figura 42. Data de flujo para caudales medidos introducida en HEC-RAS.

### 3.2.6. Valores de coeficiente de rugosidad “n” de Manning y coeficientes de contracción/expansión

La selección de un valor adecuado de coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning para este estudio se basó, en lo observado en varias visitas a la zona, donde fueron ponderadas diferentes condiciones de diseño que pudiesen afectar el tránsito de crecientes por el canal, de manera de poder representar en el modelo hidráulico en condiciones reales.

Se calibró la rugosidad considerando un valor único de  $n$  de Manning para el canal, tanto en el sentido longitudinal como transversal del tramo en estudio.

El lecho del cauce se caracteriza por la predominancia de gravas, según los resultados obtenidos del levantamiento de la información granulométrica referido en la sección 3.1.2 (tabla 5), el cual se limitó al análisis en el rango de las arenas y gravas. Sin embargo, se observó en campo cierta cantidad de limo presente en algunas muestras tomadas en las orillas del lecho, así como un enrocado de

protección compuesto por cantos de gran tamaño que predominan en las márgenes (figura 30).

La vegetación presente en las márgenes del río es densa (figuras 33, 34 y 35), el cauce presenta variaciones en la forma de sus secciones transversales así como a lo largo de su eje longitudinal, y su alineamiento presenta curvas suaves con radios grandes. También se observó la presencia de troncos de árboles y desechos como tuberías y piezas de concreto que pueden producir atascamientos y tener impacto sobre el valor del coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning. (Tabla 3)

La capa superficial de gravas observadas en barras alternadas de sedimentos que afloran en sentido longitudinal del canal y de cantos de diámetros entre 1 y 3 m presentes en las márgenes, son el límite rugoso que ofrece resistencia al flujo para los caudales transitados en el río Pao. Sin embargo, la longitud de las márgenes es mayor a la del lecho, lo que implica que estas aportan mayor resistencia al flujo que el lecho activo.

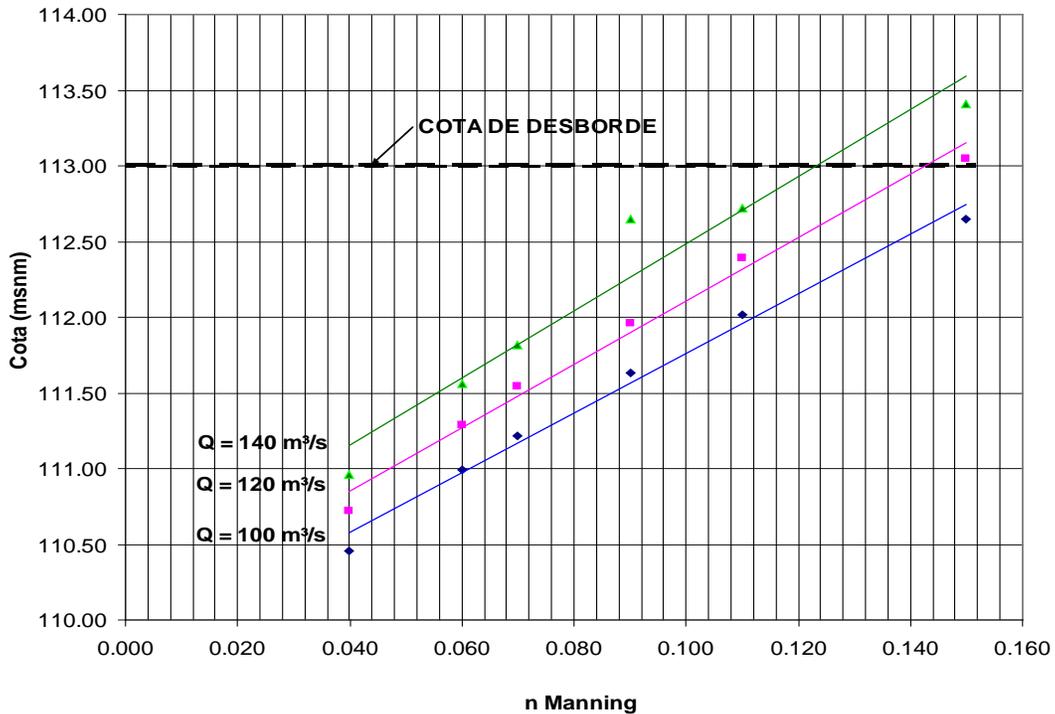
Debido a lo antes expuesto, el cauce en el tramo de estudio presenta una macrorugosidad para los caudales extremos transitados en el río Pao, generada por la presencia de cantos de gran tamaño en las márgenes.

Las pérdidas por contracción y expansión son calculadas con los coeficientes 0.1 y 0.3 respectivamente asumidos por defecto por el programa HEC-RAS, valores que corresponden a cambios graduales entre secciones consecutivas.

### 3.2.7. Aplicación del modelo matemático HEC-RAS

El procedimiento para calibrar de la rugosidad consistió principalmente en asignar al cauce un valor único de coeficiente  $n$  de Manning tanto transversal como longitudinalmente y variarla dentro de una banda entre 0.03 a 0.16 para los caudales 100,120 y 140 m<sup>3</sup>/s respectivamente, hasta lograr el nivel de aguas reportado por el personal de la estación de bombeo en la progresiva 0+250 durante el evento del 2005 (113 msnm), manteniendo fijo el caudal respectivo.

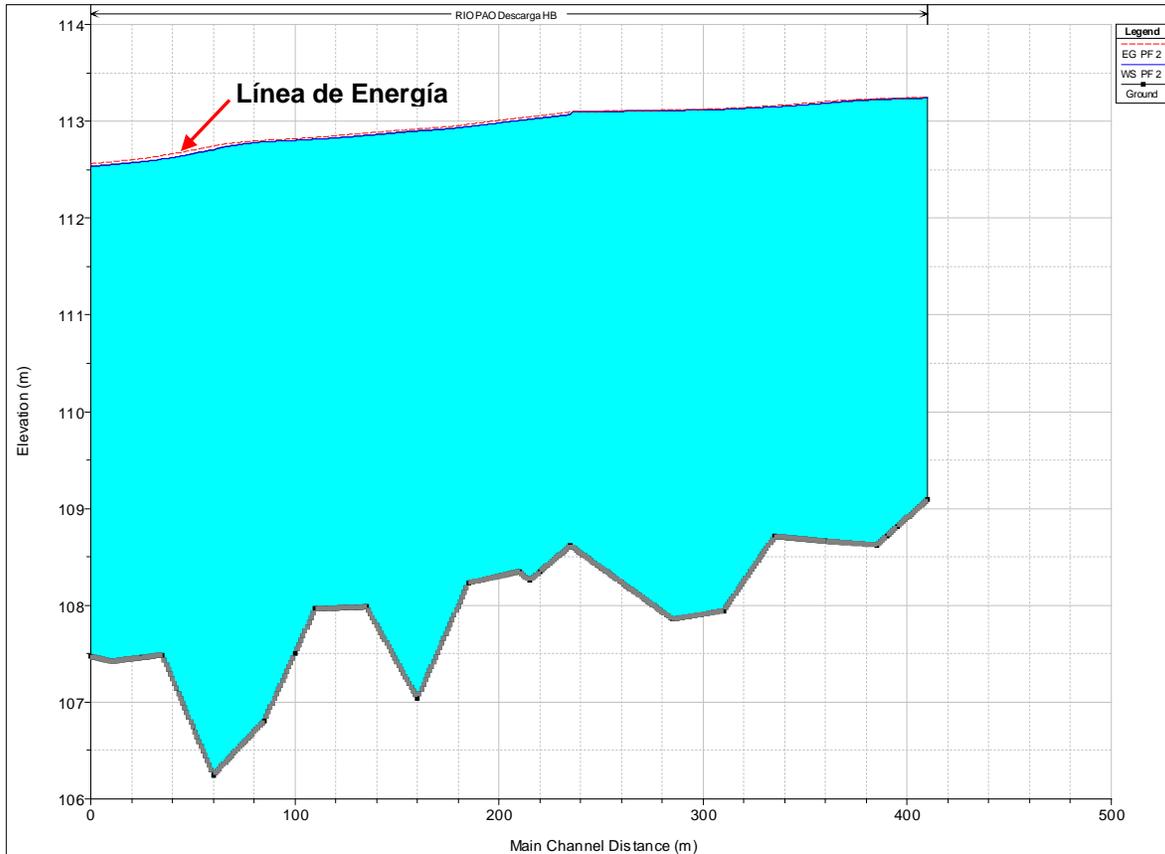
Se obtuvo el nivel de agua en la progresiva 0+250, con cada caudal fijo (100,120 y 140 m<sup>3</sup>/s), para cada  $n$  de Manning y con ello se construyó una gráfica donde el valor de coeficiente de rugosidad representa al eje de las abscisas y la cota de agua el eje de las ordenadas (figura 43). Una vez representados los puntos en la gráfica, se traza una línea recta de mejor ajuste para cada relación caudal- $n$  de Manning y se determinó el valor de  $n$  relacionado a un caudal fijo que aumenta el nivel de agua hasta alcanzar la cota 113 msnm. En la gráfica 43 se muestra el valor de la cota de desborde (113 msnm).



**Figura 43. Se muestra la variación altimétrica del flujo en función del coeficiente de rugosidad total, obtenida modelando el cauce del río Pao para diferentes caudales con el modelo unidimensional HEC-RAS.**

Los cálculos se realizaron bajo la hipótesis de que existe un control hidráulico casi al final del tramo, en la progresiva 0+410, donde se podría dar la condición de flujo uniforme. Asumiendo flujo uniforme en la sección correspondiente, la profundidad del agua es la normal y la pendiente de la línea de energía es paralela a la pendiente del lecho ( $S_f = S_0 = 0.002$ ). Se supone que el flujo tendrá un régimen subcrítico en el tramo estudiado.

En la figura 44 se muestra el perfil del nivel de agua obtenido en el modelo matemático unidimensional HEC-RAS, para un caudal de  $Q = 120 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 44. Perfil de fondo del lecho del río Pao y perfil del nivel de agua (línea azul) obtenidos en el modelo matemático unidimensional HEC-RAS para un caudal de  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  al cual le corresponde un coeficiente de rugosidad  $n = 0.143$ .**

A continuación se muestran en las figuras 45 y 46 los niveles de agua generados por el tránsito de  $120 \text{ m}^3/\text{s}$ , obtenidos para las secciones transversales de las progresivas 0+250 y 0+410, a aguas arriba y aguas abajo respectivamente que definen el tramo de interés. Luego, en las figuras 47 y 48 se muestra la curva de gasto de las secciones transversales 0+250 y 0+410 respectivamente.

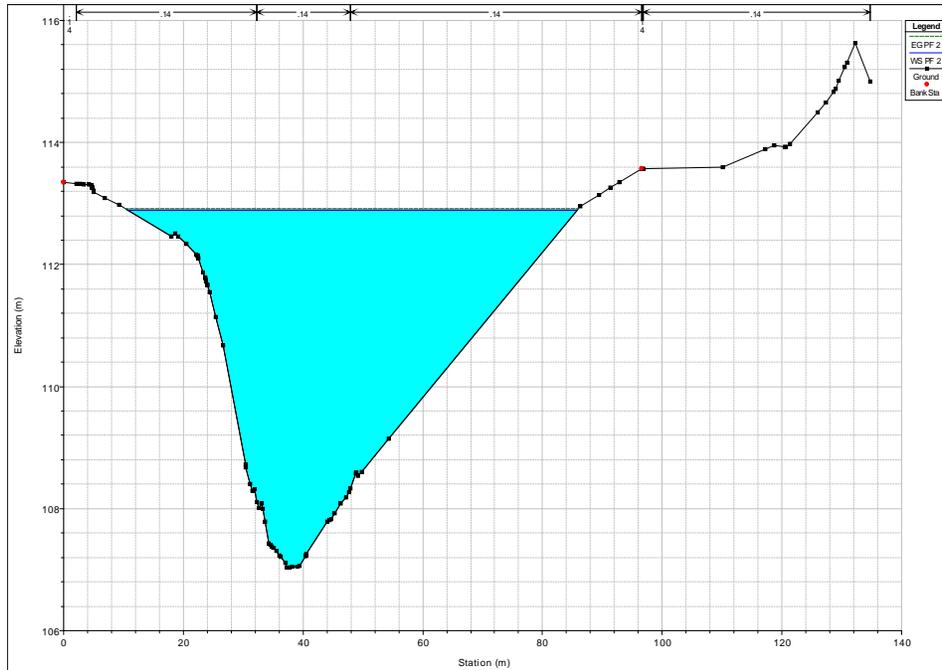


Figura 45. Nivel de agua en la sección transversal, progresiva 0+250, para un caudal de 120 m<sup>3</sup>/s.

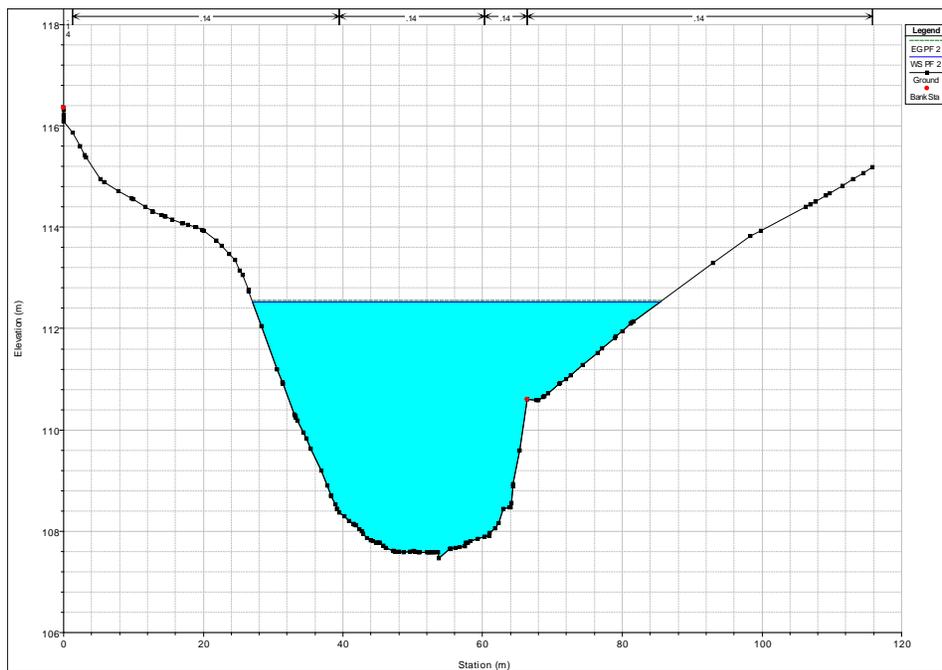
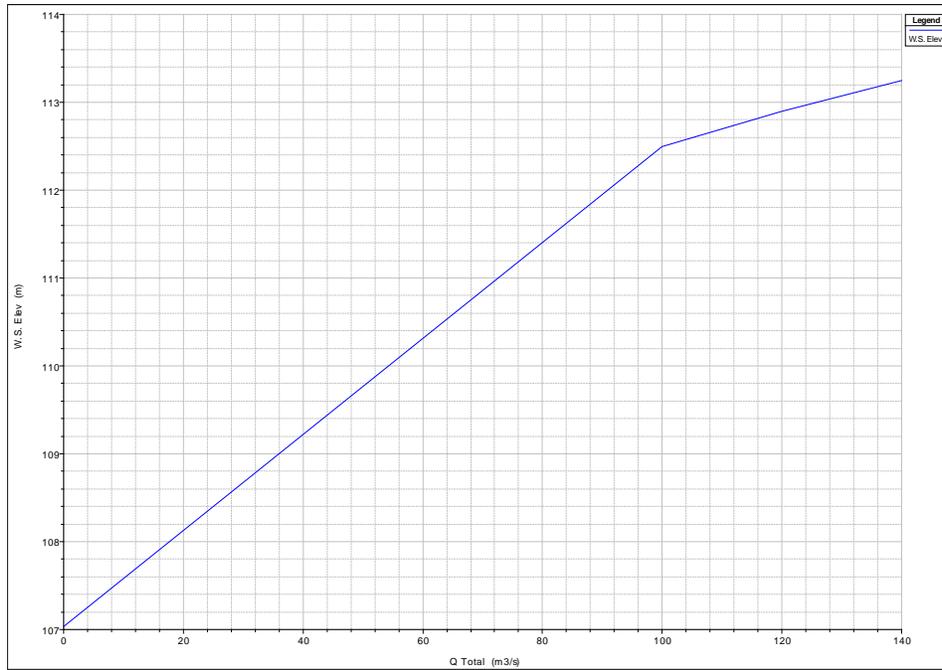
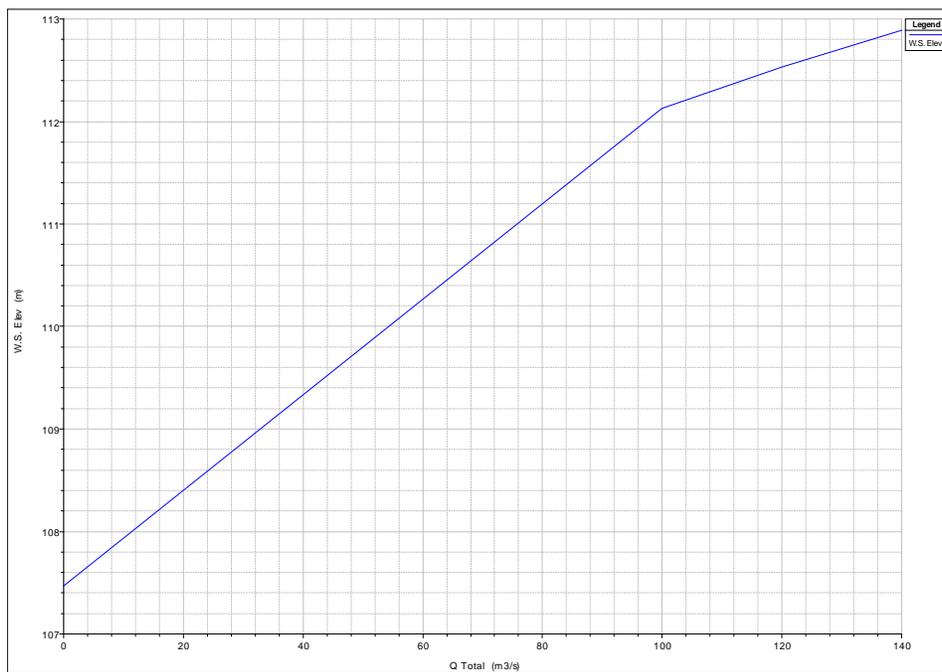


Figura 46. Nivel de agua en la sección transversal ubicada en la progresiva 0+410, para un caudal de 120 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 47. Curva de gasto de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+250 para un coeficiente de rugosidad  $n = 0.143$ .**



**Figura 48. Curva de gasto de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+410 para un coeficiente de rugosidad  $n = 0.143$ .**

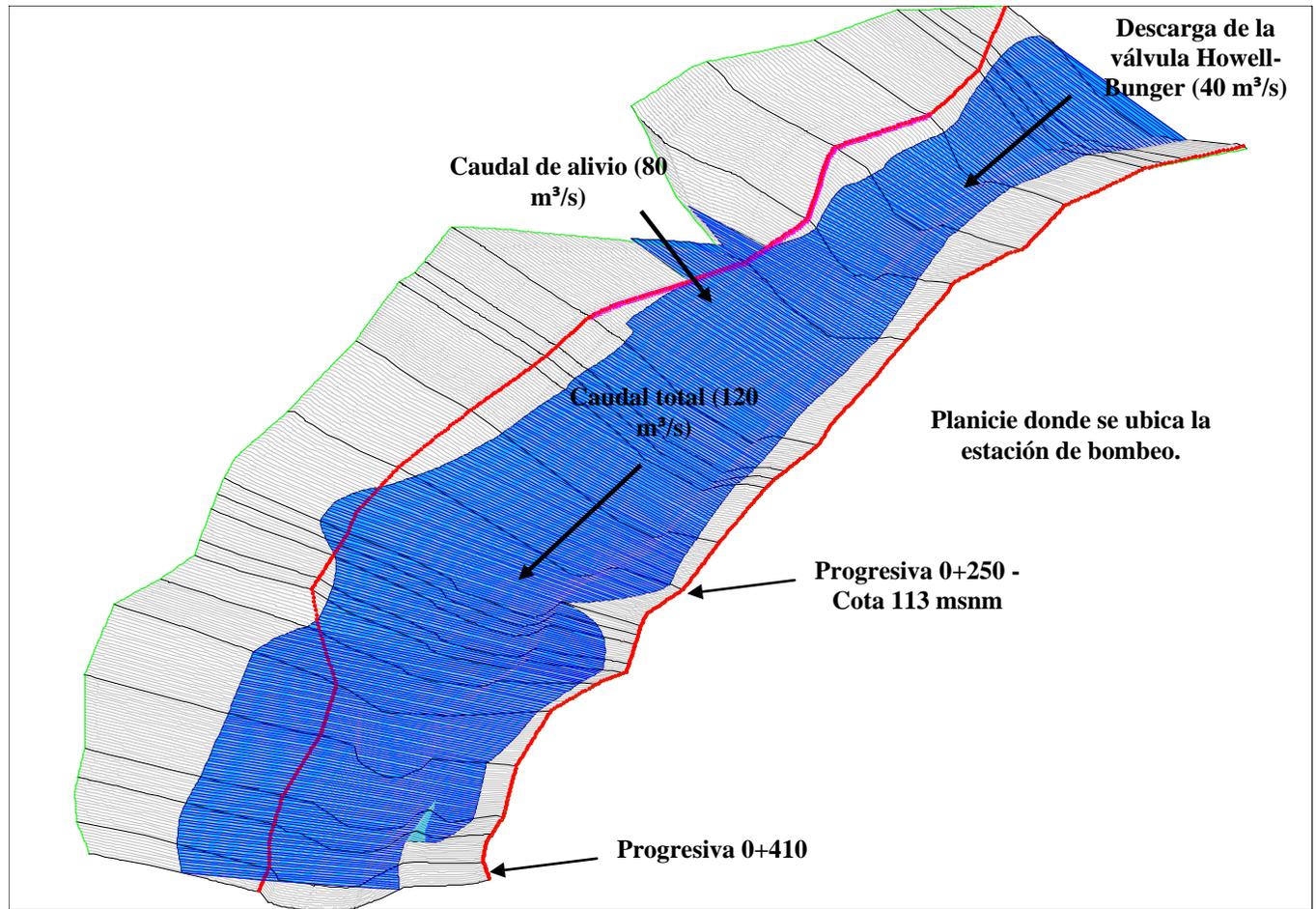


Figura 49. Vista 3D generada por el modelo matemático HEC-RAS, donde se muestra el tránsito de  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  por el cauce del río Pao en el tramo estudiado.

Para los caudales controlados por la válvula reguladora, se establecieron los valores de  $n$  de Manning de 0.020, 0.023, 0.025, 0.027, 0.030, 0.033 y 0.035 y para cada uno estos valores se calcularon los niveles de superficie de agua correspondiente a cada caudal aforado (tabla 7).

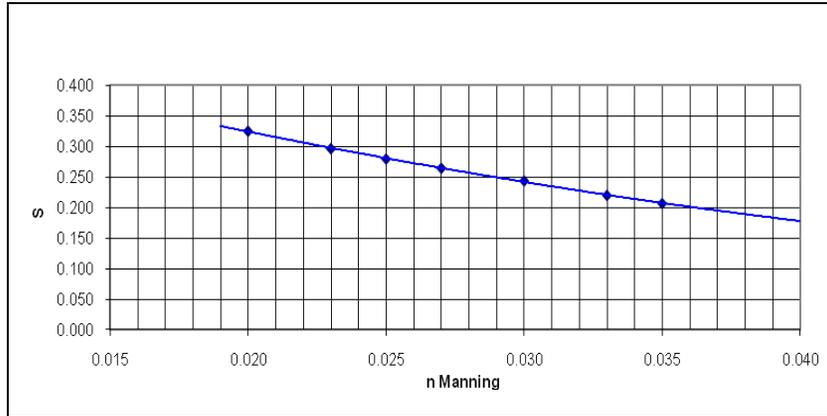
En este caso, las condiciones de borde fueron establecidas asumiendo flujo uniforme en la sección más aguas abajo de la válvula reguladora Howell-Bunger, tomando como dato las cotas del nivel de superficie de agua medidas para los diferentes caudales mostrados en la tabla 7.

Para un caudal fijo y para cada  $n$  de Manning se calculó la suma de los cuadrados de los errores como:

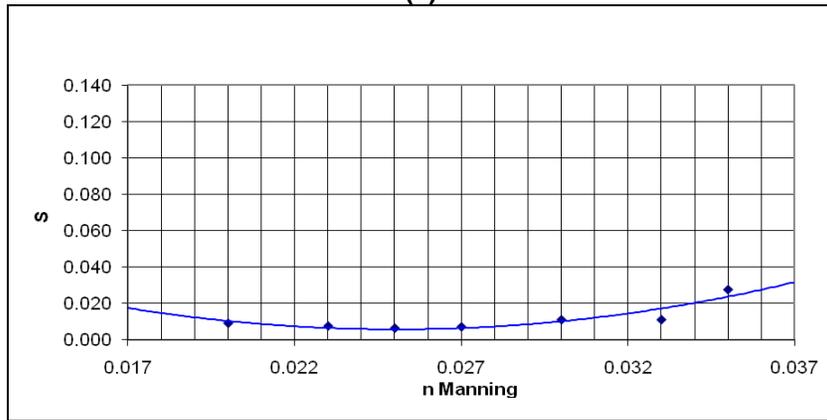
$$S = \sum (d_c - d_m)^2,$$

donde,  $d_c$  es la profundidad calculada, proveniente del perfil de aguas generado por el modelo numérico HEC-RAS, y  $d_m$  es la profundidad del agua medida en campo en la sección transversal correspondiente.

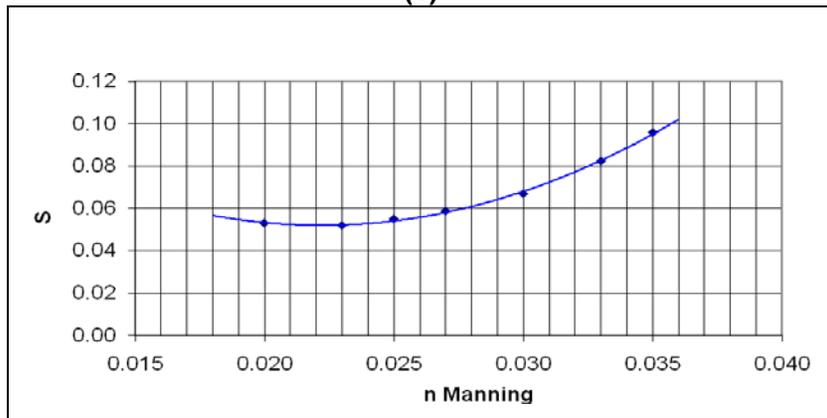
Posteriormente, se construyó una curva donde el eje de las abscisas representa el coeficiente de Manning y el eje de las ordenadas la suma de los cuadrados de los errores “ $S$ ”. Con esto, se hizo el mejor ajuste mediante una curva parabólica que permitió calcular el valor del coeficiente de rugosidad que correspondiera al mínimo error en la curva (figura 50).



(a)

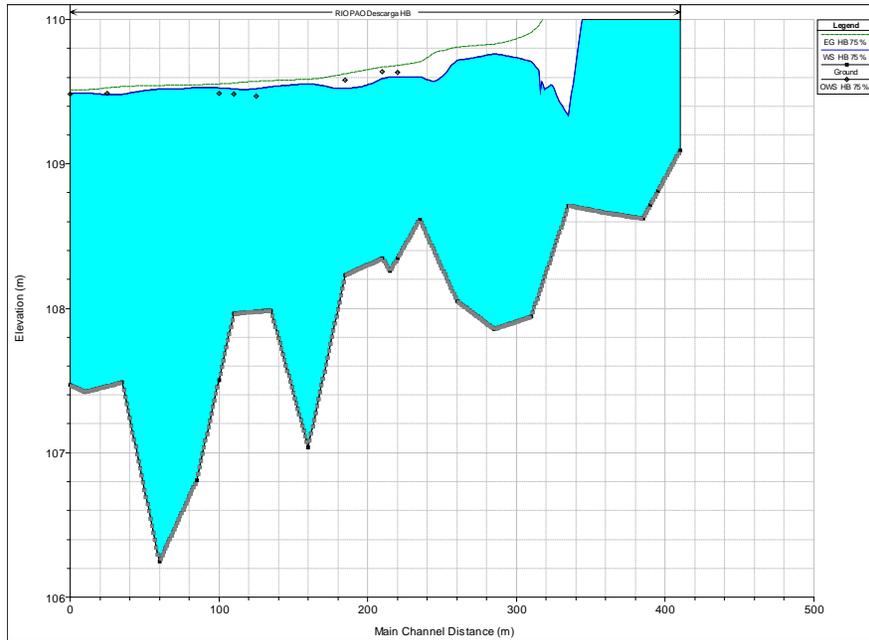


(b)

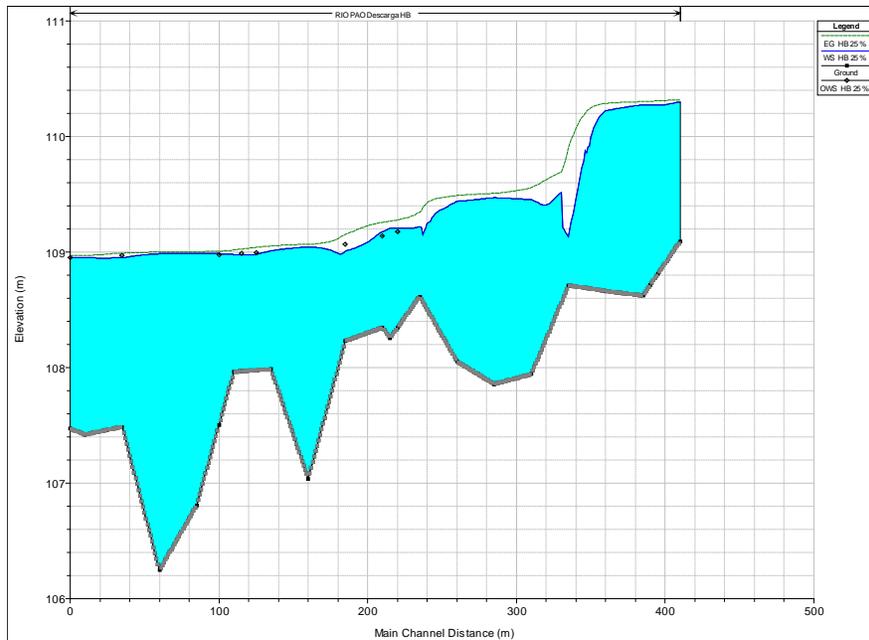


(c)

**Figura 50. Error asociado al valor de coeficiente de rugosidad de Manning. El coeficiente de rugosidad correspondiente al mínimo error es: (a) 0.069 para un caudal de 7 m<sup>3</sup>/s, (b) 0.025 para un caudal de 17 m<sup>3</sup>/s. y (c) 0.022 para un caudal de 31.5 m<sup>3</sup>/s.**



(a)



(b)

Figura 51. Perfiles del nivel de agua (línea azul) obtenido en el modelo matemático unidimensional HEC-RAS para un caudal de: (a)  $31.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $n = 0.022$ , y (b)  $17.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $n = 0.025$

### **3.3. VERIFICACIÓN DE LA FORMULACIÓN DE AGUIRRE-PE Y FUENTES (1990)**

De acuerdo a la ecuación [48], determinada por Aguirre Pe y Fuentes (1990), se verificó el valor de la rugosidad del cauce debido a que esta formulación toma en cuenta un rango más amplio del tamaño del material del lecho que otros métodos desarrollados para lechos con macro rugosidad (Limerinos; 1970; Bathurst; 1978; Thompson y Campbell; 1979; Jarret; 1984; Bathurst; 1985; Maynard; 1991; García Flores, 1996). Por lo tanto, el método de Aguirre-Pe y Fuentes resultó apropiado para aplicar en el caso del lecho del río Pao en el tramo estudiado, donde la resistencia al flujo para caudales extremos, está dada por los cantos y peñones de 1 a 3 m que componen las márgenes.

Cuando los caudales transitados por el cauce son bajos (por ejemplo los caudales controlados por la válvula reguladora Howell-Bunger), la resistencia al flujo está gobernada por las gravas y arenas que componen el lecho del río Pao en el tramo estudiado. En este caso, se pueden aplicar las ecuaciones que consideran los lechos de grava (Hey, 1979; Simons, 1979; Parker y Peterson, 1980; Griffiths, 1981) o de arena (Einstein y Barbarossa, 1952; Engelund, 1966 y 1967; Karim y Kennedy, 1983; Van Rijn, 1984), para verificar de forma debida el tamaño del grano correspondiente.

La formulación de Aguirre Pe y Fuentes (1990) [ecuación 48], se usó para calcular el tamaño del peñón que ofrece resistencia equivalente al coeficiente  $n$  de Manning calibrado y se comparó con los tamaños de peñones existentes en las márgenes y parte del lecho (tabla 3).

El tamaño del canto o peñón es despejado de la ecuación [48]. Al hacerlo, queda una ecuación [ecuación 51] donde el valor de  $D$  se obtiene por iteración la cual se realizó con el complemento de EXCEL llamado SOLVER. (Tabla 8)

$$\ln\left(\frac{d}{\alpha \times D}\right) + \frac{\beta \times D}{d} = K \sqrt{\frac{8}{f}} - KB + 1 \quad [51],$$

**Tabla 8. Valores de los diámetros calculados por la fórmula de Aguirre-Pe y Fuentes aplicada al lecho del cauce.**

Sección	Progresiva	d (m)	$\sqrt{8/f}$	D (m)	$d^{1/6}$
19	O+000	2.78	2.6489	1.922	1.186
18	O+025	2.70	2.6360	1.879	1.180
17	O+050	2.65	2.6278	1.852	1.176
16	O+075	2.76	2.6457	1.911	1.184
15	O+100	2.81	2.6536	1.938	1.188
14	O+125	2.72	2.6392	1.890	1.181
13	O+150	2.72	2.6392	1.890	1.181
12.5	O+175	2.91	2.6691	1.992	1.195
12	O+200	2.89	2.6660	1.981	1.193
11	O+225	2.64	2.6261	1.846	1.176
10	O+250	2.66	2.6294	1.857	1.177
9	O+275	2.50	2.6024	1.770	1.165
8	O+300	2.62	2.6228	1.835	1.174
7	O+325	2.93	2.6722	2.002	1.196
6	O+350	2.18	2.5437	1.590	1.139
5	O+375	2.11	2.5299	1.550	1.133
4	O+400	2.91	2.6691	1.992	1.195
3.6	O+410	2.91	2.6691	1.992	1.195

$$\begin{aligned} \bar{D} & \quad \mathbf{1.872} \\ \text{DesvSt} & \quad \mathbf{0.1241} \\ \text{DesvSt} / \bar{D} & \quad \mathbf{0.0663} \end{aligned}$$

### 3.4. Modelo físico del río Pao

#### 3.4.1. Descripción

El modelo está constituido por una representación topográfica de la zona del embalse cercana al canal de aproximación del aliviadero, el aliviadero y otra representación topográfica de la zona del río aguas abajo del embalse que incluyen el área donde se encuentra ubicado el pozo disipador del embalse y la válvula reguladora Howell Bunger, y que es adyacente a las estaciones de bombeo que conforman la etapa II del Sistema Regional del Centro. (LNH, 2010)

#### 3.4.2. Modelo hidráulico

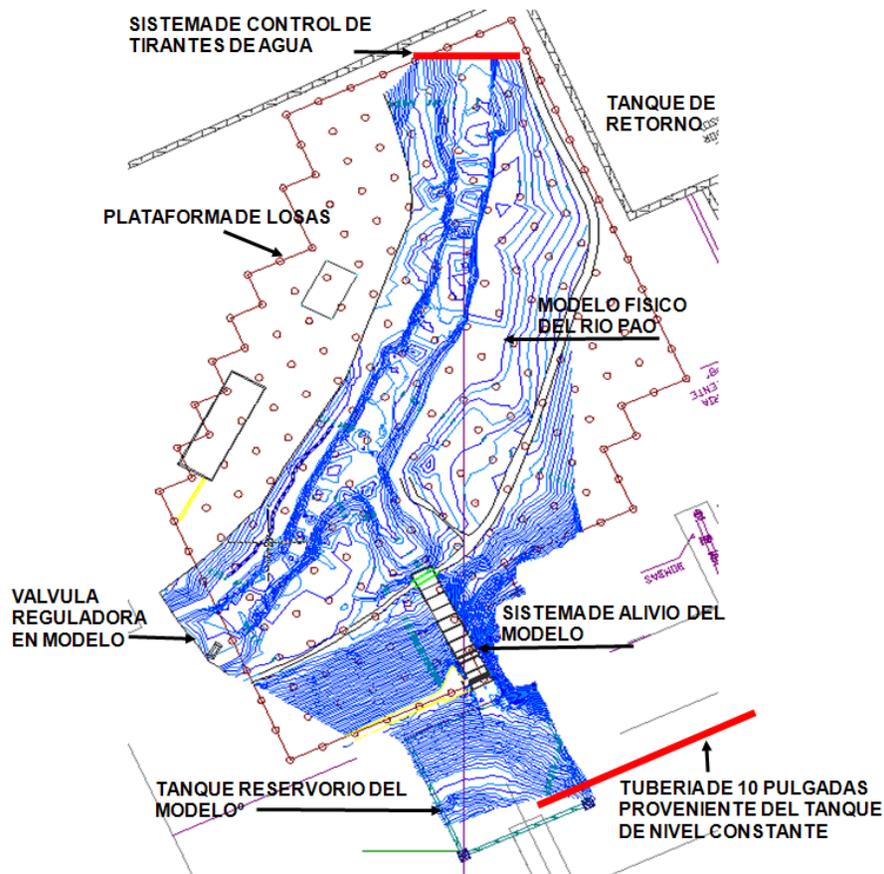


Figura 52. Modelo físico del río Pao y componentes del sistema hidráulico para suministro y desalajo de agua durante los ensayos.

El modelo físico construido en el LNH consta de un sistema de suministro, un estanque reservorio que simula parte del embalse, la estructura que se ensayó (el vertedero en laberinto propuesto por el MPPpA), un tanque donde se simula la topografía aledaña a la salida de la estructura, un sistema de control de tirantes a la salida del modelo y un tanque de retorno a la capacidad del laboratorio (figura 52). Una descripción de esas partes se hace a continuación:

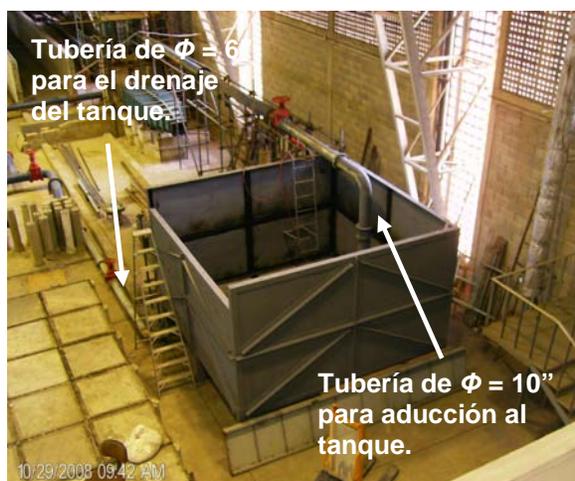
#### **3.4.2.1. Sistema de suministro**

El agua requerida para alimentar los modelos físicos durante los ensayos en el LNH, se extrae mediante un sistema de bombas centrífugas independientes con una capacidad de bombeo comprendida entre los 100 lts/s y 200 lts/s, de un tanque subterráneo de concreto armado en forma de “L”, con una capacidad de almacenamiento de 2,000,000 m<sup>3</sup>. El agua es distribuida a través de un sistema de tuberías de  $\phi = 10''$  y válvulas a un tanque de nivel constante.

El tanque de nivel constante, es una estructura metálica, elevada a una altura de 7.78 metros con respecto del nivel del piso del LNH y su función es mantener el nivel de agua constante por encima del área del modelos. Sus dimensiones internas son 2.41 x 2.43 x 1.23 m. Posee siete canaletas de desborde distribuidas a lo largo del tanque, con dimensiones de 0.20 x 1.85 x 0.20 m, por donde fluye el gasto excedente de agua hacia otro canal más amplio que descarga en una tubería de rebose de  $\phi = 15''$  de diámetro retornando a través de un canal al tanque subterráneo del laboratorio. En una de las paredes laterales externas, se encuentran ubicadas un conjunto de tuberías que conforman la alimentación de la estructura y en la cara inferior del estanque se encuentran las tuberías de salida que alimentan los modelos físicos.

### 3.4.2.2. Estanque reservorio

El estanque reservorio (figura 53) es una estructura metálica de 4 x 4 x 2.4 m fabricada totalmente a base de ángulos y planchas de acero, tiene una altura efectiva de 2 m, y está elevado 0.65 m del suelo por medio de nueve (9) apoyos construido con perfiles de acero, y en su interior esta moldeada la topografía de la zona del embalse cercana al canal de aproximación del aliviadero.



**Figura 53. Vista del tanque reservorio durante la prueba de carga y la estructura del mismo.**

La alimentación del estanque proviene de una tubería de acero  $\Phi = 10''$  que sale de la cara inferior del tanque a nivel constante, es regulada por medio de una válvula de compuerta del mismo diámetro. Al final de la tubería de alimentación se encuentra un difusor sobre el cual se coloca una pantalla para destruir parcialmente la energía de los numerosos pequeños chorros, a fin de obtener una superficie libre con poca perturbación.

Para la evacuación del gasto, el estanque reservorio cuenta con una tubería de  $\Phi = 6''$  con descarga directa al tanque subterráneo del laboratorio, que parte desde la cara inferior del estanque y que es controlado por una válvula de compuerta del mismo diámetro. Otra vía de evacuación del gasto en el estanque, es el sistema de alivio del embalse de Pao-La Balsa en escala reducida, diseñado

para un caudal de 110 m<sup>3</sup>/s (correspondiente a la creciente milenaria) en prototipo, que apoyado sobre el estanque fue construido en plástico acrílico transparente, y nivelado sobre estructuras de andamios tubulares.

### 3.4.2.3. Modelo río Pao

En esta zona se simula la topografía aledaña a la salida de la estructura del sistema de alivio del modelo físico. Al final de la estructura de disipación del aliviadero se representa el río Pao, en un tramo de 500 m ocupando un área de 132.90 m<sup>2</sup> con pendiente de 0.2 %. El fondo del cauce, incluyendo las márgenes, están construidas en fibra de vidrio moldeada de tal forma que, se ajustara al contorno de la topografía del prototipo, reducido a escala de modelo. (Figura 54)



**Figura 54. Modelo físico del río Pao construido en plástico acrílico transparente.**

La alimentación del modelo proviene del sistema de alivio del estanque reservorio y desde una tubería de PVC de  $\phi = 2\text{c}''$ , proveniente de la cara inferior del tanque a nivel constante, que proporciona al modelo el caudal que en prototipo descarga la válvula reguladora Howell-Bunger totalmente abierta (40 m<sup>3</sup>/s). El gasto del modelo es estrictamente regulado desde el aliviadero y es evacuado en

combinación con el gasto proveniente de la tubería de PVC de  $\phi = 2''$  por descarga libre a través de una compuerta vertical a un tanque de retorno.

#### 3.4.2.4. Sistema de control de tirantes a la salida del modelo

Este sistema está ubicado transversalmente en la última sección aguas abajo del modelo del río Pao, y está compuesto de una compuerta vertical de pared delgada (figura 55) cuyo fin es de fijar a voluntad el nivel de agua, aguas abajo del modelo, representando así los valores adecuados de la curva gasto – cota de la sección que se escogió como control. Esta estructura es de descarga libre, posee un ancho de 2 m y su eje se ubica transversalmente al eje del cauce del río en escala de modelo. También actúa como elemento principal de evacuación hacia un tanque de retorno de las aguas provenientes tanto del sistema de alivio del estanque reservorio, como de la tubería de PVC de  $\phi = 2''$  que provienen de la válvula reguladora Howell-Bunger.



**Figura 55. Sistema de control de tirantes ubicado al final del tramo en estudio; compuerta vertical de pared delgada.**

### **3.4.2.5. Tanque de retorno a la capacidad del laboratorio**

El tanque de recolección es una estructura de concreto armado y bloques de concreto de 7.6 m de largo x 5 m de ancho y 1.3 m de profundidad, donde confluyen todos los gastos provenientes del modelo físico del embalse de Pao-La Balsa. Adicionalmente de ser requerido, este tanque puede ser alimentado directamente desde el tanque subterráneo mediante una bomba centrífuga a través de una tubería de  $\Phi = 8''$  de diámetro. Este tanque descarga hacia un pozo amortiguador que a su vez descarga el agua a través de un vertedero triangular de  $90^\circ$  las aguas en un canal de retorno al estanque subterráneo, cerrándose el ciclo hidráulico del modelo.

### **3.4.3. Instrumentación del Modelo físico**

#### **3.4.3.1. Caudales**

Después del tanque de recolección se encuentra el cajón vertedero. Este se construyó en concreto armado y bloques y termina en una plancha de aluminio de 10 mm de espesor y un corte V a  $90^\circ$ . Aproximadamente a la mitad del cajón vertedero se colocó un filtro de piedras de  $\Phi = 1''$  de diámetro con el fin de tener una superficie tersa de aproximación a la placa aforadora. Dado las dificultades existentes para la calibración del vertedero in situ, el cajón vertedero se construyó según las normas World Meteorological Organization 1971, utilizándose las curvas de aforo que allí aparecen.

El cero del vertedero se determinó geoméricamente según las normas francesas Societe Hidrotechnique de France 1954, midiéndose los niveles a través de un limnómetro de punta de 0.1 mm de apreciación en un pozo piezométrico exterior al tanque, conectándose a éste por medio de una tubería de  $\Phi = \frac{1}{2}''$  de diámetro.

El uso del vertedero implica una espera relativamente larga para la obtención del gasto, debido al tránsito que se opera en el modelo cada vez que el caudal es variado.

#### **3.4.3.2. Niveles de superficie**

Los niveles de superficie de agua son medidos por medio de limnímetros de punta de 0.1 mm de apreciación, cuyos ceros son determinados topográficamente para cada una de las estaciones principales. En el caso de esta estructura que requiere la medición de niveles en varios puntos, la del aforo fue determinada por métodos topográficos, siendo la profundidad hallada por diferencia entre la lectura de fondo y la lectura de superficie.

Los puntos donde se efectuaron las mediciones de nivel de agua son las siguientes:

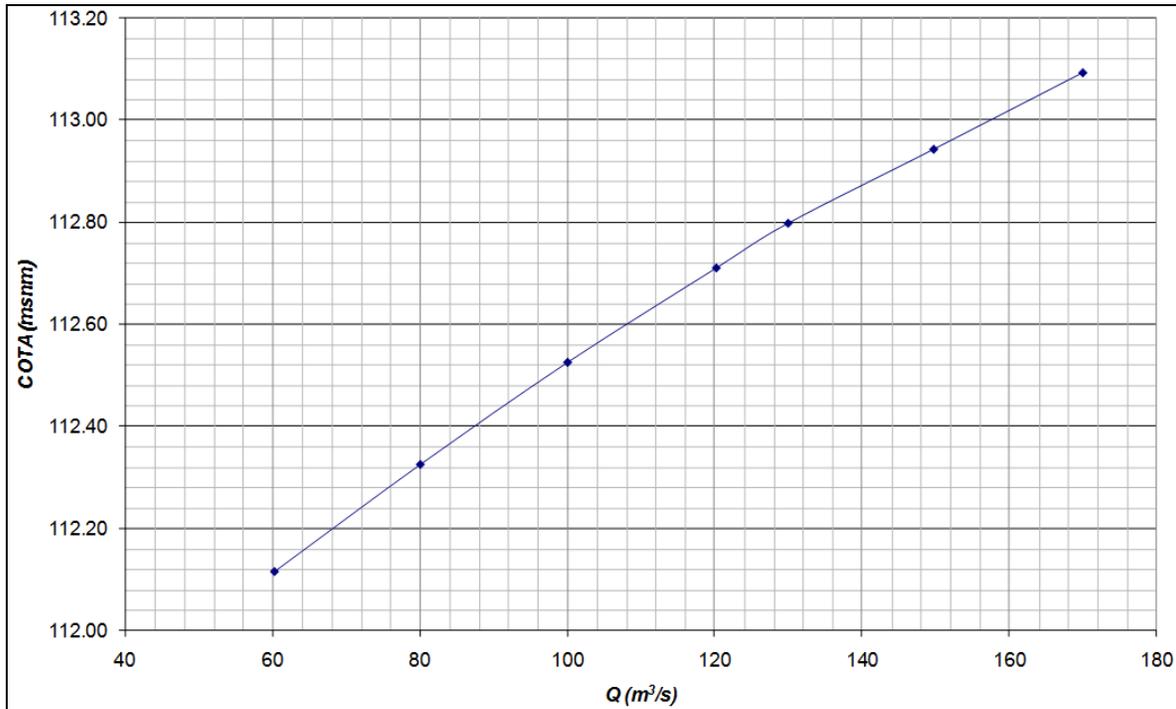
- Embalse.
- Estructura de disipación (aliviadero, zona de transición, canal rápido y estanque disipador)
- Estación de control sobre cerca de la válvula reguladora Howell-Bunger (aproximadamente en la progresiva 0+000).
- Estación de control sobre el río Pao aguas abajo de la confluencia pozo disipador – válvula reguladora.
- Estación de control sobre el río Pao aproximadamente en las progresivas 0+250 y 0-500.

### 3.4.4. Ensayos y mediciones

Sobre el cauce del río del modelo, en la zona donde confluyen las aguas provenientes del aliviadero y las del río, se hicieron para diferentes caudales, y las cotas asociadas a los mismos fueron medidas (figura 56). El procedimiento consistió en medir el nivel de agua en el cauce del modelo (entre las progresivas 0+200 y 0+250, los caudales combinados provenientes, tanto de la válvula reguladora descargando 40 m<sup>3</sup>/s (válvula totalmente abierta), más un caudal descargado por el aliviadero (tabla 9). De acuerdo a los resultados obtenidos en el modelo matemático, se asignó al cauce del modelo físico una rugosidad uniforme tanto transversal como longitudinalmente, que se fue variando hasta lograr el nivel de agua equivalente en modelo al nivel reportado para el evento del 2005 en el prototipo (figura 44), en las diferentes secciones transversales donde están ubicados los limnímetros (progresivas 0+025, 0+225, 0+300 y 0+450).

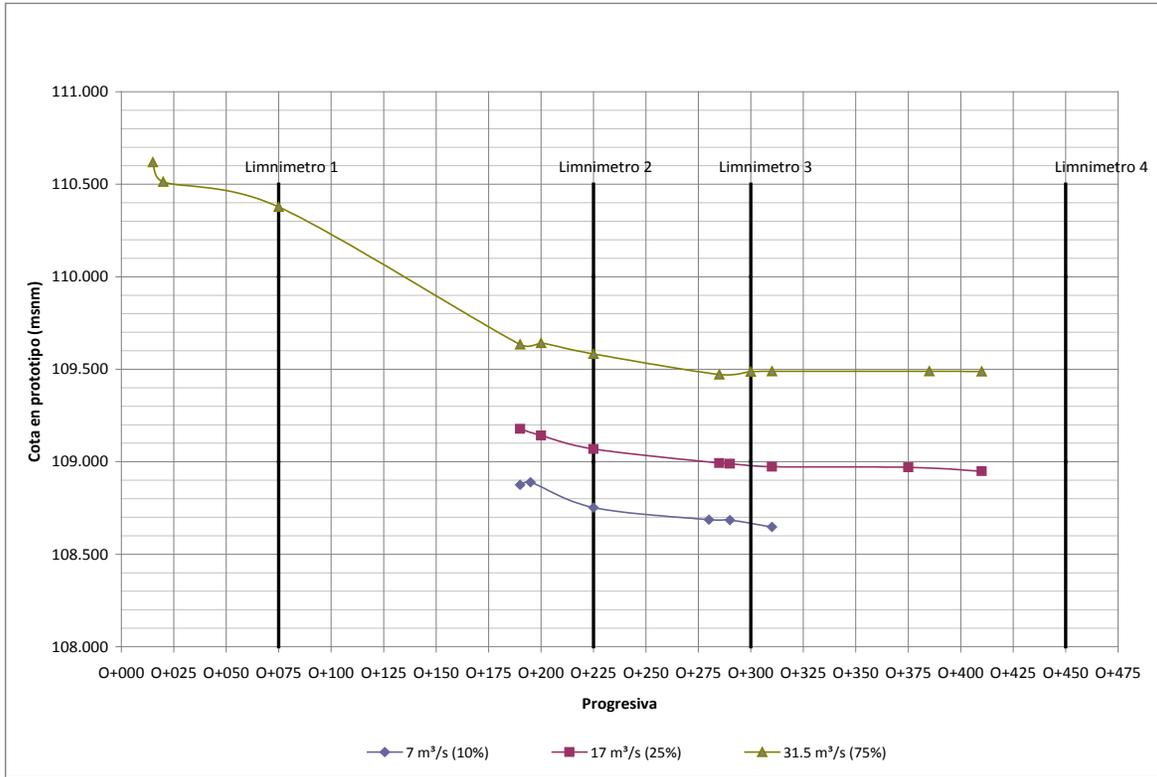
**Tabla 9. Mediciones en modelo de los niveles de agua para los caudales combinados de la válvula reguladora y el canal del aliviadero.**

<b>Q<sub>aliviadero</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q<sub>total</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Cota (msnm)</b>
20.24	60.24	112.116
40.05	80.05	112.326
60.04	100.04	112.526
80.24	120.24	112.711
90.00	130.00	112.798
109.76	149.76	112.943
130.00	170.00	113.093

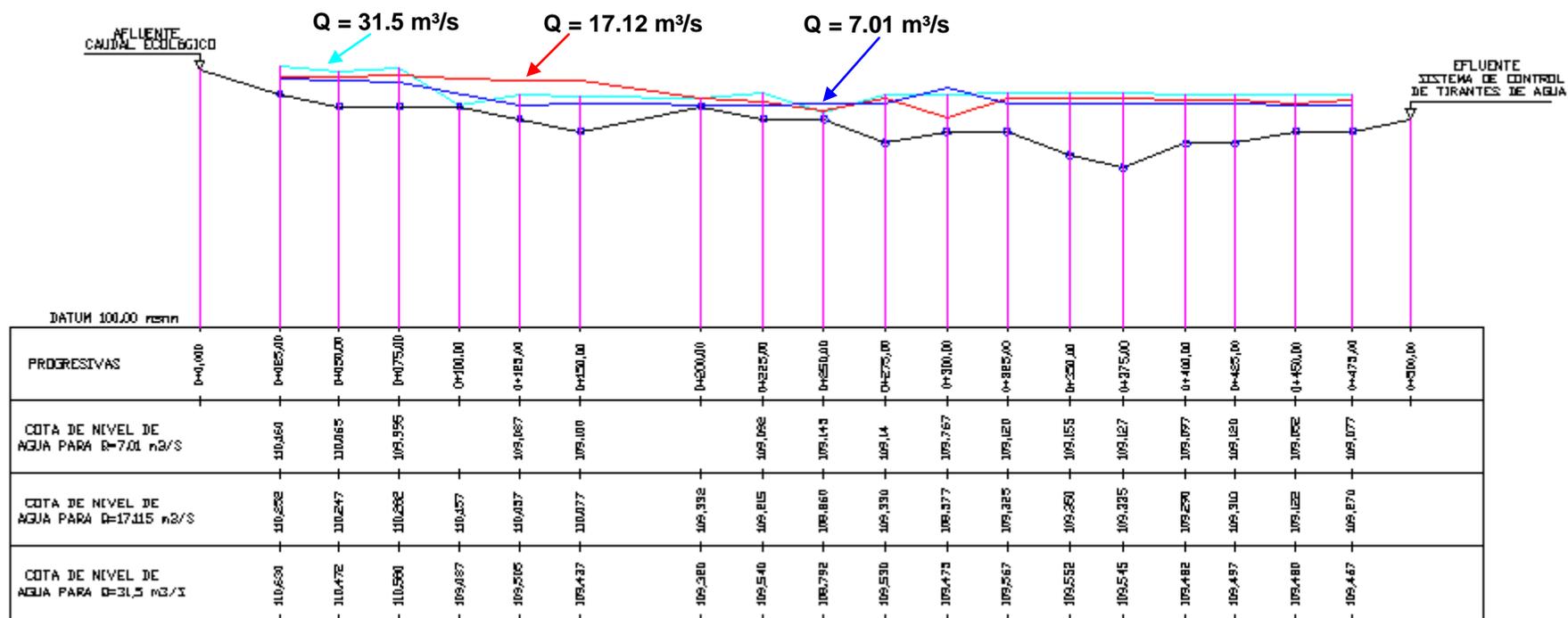


**Figura 56. Sobre el cauce del río del modelo, en la zona donde confluyen las aguas provenientes del aliviadero y las del río (entre progresivas 0+200 y 0+250), se hicieron pasar diferentes caudales y las cotas asociadas a los mismos fueron medidas y son presentadas en esta gráfica.**

La calibración de la rugosidad del modelo físico para caudales regulados por la válvula reguladora, se realizó con los datos obtenidos en campo (tabla 7 y figura 57). De resultados obtenidos en el modelo matemático (figura 51), se obtuvieron las cotas de agua para cada caudal en las progresivas 0+025, 0+225, 0+300 y 0+450 que son los sitios donde están instalados los limnómetros en el modelo físico. Se descargó en el modelo físico a escala reducida el caudal equivalente en prototipo y se varió la rugosidad hasta alcanzar la cota de agua correspondiente a los caudales medidos en campo calibrados, en los sitios donde fueron instalados los limnómetros (figura 58).



**Figura 57. Perfiles del río correspondiente a los caudales descargados por la válvula reguladora Howell-Bunger (en prototipo), medidos en campo, y ubicación de los limnímetros utilizados en el modelo físico.**



PERFIL DEL RIO

Figura 58. Perfiles de agua generados por los caudales controlados por la válvula reguladora Howell-Bunger.

## CAPITULO IV

### ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En la figura 43 se muestran los niveles de aguas alcanzados para un mismo caudal variando la rugosidad, donde se puede observar que solo las combinaciones de caudales y rugosidad muy altas sobrepasan la cota 113 msnm donde esta ubicada la estación de bombeo.

Nótese en la figura 43, que para obtener la cota reportada en la cerca perimetral de alfajor durante el evento de 2005 al que corresponde un caudal de  $120 \text{ m}^3/\text{s}$ , hubo que aumentar el coeficiente de Manning hasta  $n = 0.143$ . Asimismo, para la misma cota se obtuvieron los coeficientes de rugosidad de 0.163 y 0.124 para los caudales 100 y 140 respectivamente. Se puede observar la influencia del valor de  $n$  de Manning en el incremento del nivel del agua (figura 43).

Para un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.143 se obtuvo el perfil de aguas con un caudal de  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  (figura 44), donde la profundidad alcanzada por el flujo es de aproximadamente 6 m medidos desde la cota del lecho del río en la progresiva 0+250 (107 msnm) hasta el punto indicado por el personal que labora en la estación de bombeo aproximadamente en la cota 113 msnm (figuras 45 y 46).

Con respecto a los caudales controlados por la válvula reguladora Howell-Bunger se obtuvieron los coeficientes de rugosidad de Manning de 0.069, 0.025 y 0.022 para los caudales de  $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $17 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $31.5 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivamente. Estos valores de  $n$  corresponden al mínimo error en cada caso, mostrado en la figura 50 como el punto de inflexión de la curva respectiva.

A medida que los niveles de agua producidos por los caudales bajos descienden, las deformaciones y el material de fondo (gravas y arenas) tienen mayor incidencia en la resistencia al flujo y en consecuencia el valor del coeficiente de rugosidad de Manning aumenta. Esto justifica la dispersión del valor de  $n = 0.069$  para un caudal de  $7 \text{ m}^3/\text{s}$  con respecto a los demás valores de  $n$  correspondientes a los caudales  $17$  y  $31.5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Para un caudal bajo (por ejemplo  $31.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) las rocas sobre el lecho, producto de la protección no generan vórtices tan grandes y el flujo puede hasta cierto punto “colarse” entre los poros grandes de las rocas correspondientes ubicadas predominantemente, desde la piscina receptora del chorro de la válvula Howell-Bunger hasta el tanque disipador que proviene del canal rápido. En el caso de caudales grandes (por ejemplo  $100$ ,  $120$  y  $140 \text{ m}^3/\text{s}$ ) los vórtices pueden ser más grandes, interaccionando más violentamente entre sí, y podrían persistir una larga distancia aguas abajo, incluyendo la sección de control aguas abajo.

Por lo tanto, en lugar de una rugosidad dominada por gravas y cantos pequeños (figura 31) lo que se tiene es una macro rugosidad correspondiente a cantos y peñones (figuras 29 y 30), que se manifiesta cuando los caudales son altos, la cual ha sido formulada por Aguirre Pe y Fuentes (1990). En el prototipo el diseño de una protección rocosa fue necesaria porque al interrumpirse el transporte de material grueso por la construcción de la presa y evidentemente por la válvula reguladora (por la que solo pasa materiales finos), el lecho del río Pao aguas abajo de la presa podría degradarse significativamente, de allí la necesidad de la protección rocosa con diámetro entre  $1$  a  $3 \text{ m}$ .

Es importante destacar que en el modelo HEC-RAS, se consideran las pérdidas por contracciones y expansiones de sección a sección, de manera que su efecto en la magnitud del coeficiente de Manning está separado.

El valor de coeficiente de rugosidad resultante de la calibración,  $n = 0.143$ , esta asociado al  $D_{50}$  del material que compone el lecho, en este caso cantos y peñones de 1 a 3 m, según Aguirre-Pe y Fuentes (1990). En la tabla 8 se puede observar que los diámetros resultantes varían en un rango entre 1.55 y 2.00 m, lo cual son similares a los observados en campo (rocas grandes entre 1.5 y 3 m presentes en el lecho). También se observa, que el promedio de los  $D_{50}$  obtenidos es de 1.872, la desviación estándar es de 0.1241 y  $d^{1/6}$  en cada sección transversal varían poco; los diámetros equivalentes obtenidos con muy similares.

## CONCLUSIONES

Cualquier estudio que proponga la modificación del aliviadero del embalse Pao-La Balsa para aumentar su capacidad de alivio, esta ligado al caudal máximo permisible del cauce del río Pao aguas abajo de la presa, para así garantizar las instalaciones de la estación de bombeo de HIDROCENTRO no sean afectadas por una crecida.

En base a los resultados obtenidos modelando el cauce del río Pao, se puede afirmar que cuando fluyen por el tramo objeto de estudio del río, los caudales combinados de la válvula reguladora y los provenientes del aliviadero, los vórtices generados por estos caudales y/o macrorugosidad existente podrían llegar a ser más grandes, interaccionando más violentamente entre sí, y estos podrían persistir una larga distancia aguas abajo, incluyendo la sección de control aguas abajo.

La rugosidad del cauce del río en el tramo estudiado esta gobernada por los cantos y peñones de 1 a 3 m que componen las márgenes, lo que justifica el valor elevado de coeficiente de Manning ( $n = 0.143$ ) para caudales altos. Esto se evidenció a través de la aplicación del método de Aguirre-Pe y Fuentes (1990) que arrojó resultados satisfactorios ya que el tamaño medio del material del lecho  $D_{50}$ , correspondiente al coeficiente  $n$  de Manning obtenido para un caudal extremo ( $n = 0.143$ ), son similares a los tamaños de las rocas observados en campo.

En el modelo físico se encontró que es importante durante el paso de un caudal producto de un evento extraordinario, mantener abierta la válvula reguladora Howell-Bunger, porque los 40 m<sup>3</sup>/s que aporta, contribuyen a doblar el flujo que viene por el rápido hacia el cauce y evita sobre elevaciones de agua que puedan afectar a la estación de bombeo. Esta confluencia ocurre con mucha turbulencia y batimetría irregular (alrededor del estanque de disipación) que hace

no representativo el cálculo con un modelo matemático unidimensional como el HEC-RAS y de allí la importancia de las observaciones sobre el modelo físico.

## RECOMENDACIONES

Se considera necesario colocar a la estación de bombeo un muro o pantalla de protección que podría estar emplazado en el perímetro que actualmente ocupa la cerca de ALFAJOL, esto protegería las instalaciones de la estación de bombeo en caso de presentarse eventos extremos con caudales superiores a los registrados en el evento de 2005, los cuales según el estudio hidrológico hecho por el LNH estuvieron en el orden de los 120 m<sup>3</sup>/s (caudal combinado del aliviadero y de la válvula reguladora).

Es recomendable obtener una granulometría de los cantos y peñones y de esta manera tener un  $D_{50}$  más certero. Se sugiere usar el método de la granulometría circular (Sardi, 1973) cuando se observe grandes rocas en el cauce que puedan influir en la resistencia al flujo.

Se sugiere calcular los perfiles de agua con el método paso a paso considerando el efecto de las márgenes y lecho por separado (método de Einstein), combinado con las formulaciones para canales aluviales desarrolladas según sea el caso (arenas, gravas, o cantos y peñones), para obtener un valor de coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning calculado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguirre-Pe, J. y Fuentes, R. (1990) "Resistance to flow in steep rough streams" J. Hydr. Engrg. , ASCE, Vol 116 (11), no. 11, pp 1374-1387

Bolinaga I., Juan José y colaboradores (1999) "Proyectos de Ingeniería Hidráulica." Fundación POLAR, Vol. 2, Caracas, Venezuela.

Chow, Ven Te (1959) "Hidráulica de Canales Abiertos." McGraw-Hill

Einstein, H.A. (1950) "The Bed Load Function for Sediment Transportation in Open Channels." Technical Bulletin 1026. Washington, DC: USDA, Soil Conservation Service.

Einstein, H.A. and Barbarossa, N. (1952) "River Channel Roughness." Trans. ASCE, Vol. 117, pp. 1121-1146

Engelund, F. and Hansen, E. (1967) "A Monograph on Sediment Transport to Alluvial Streams." Copenhagen: Teknik Forlag.

Fundación Laboratorio Nacional de Hidráulica (2008) "Estudio Hidrológico para el Proyecto del Desalojo de los Excedentes de Alivio en el Embalse Pao-La Balsa, Estado Cojedes".

Fundación Laboratorio Nacional de Hidráulica (2010) "Estudio a través de modelo físico del aliviadero del embalse Pao-La Balsa, Estado Cojedes".

Griffiths, G.A. (1981) "Flow Resistance in Course Gravel Bed Rivers", J Hydr. Div. ASCE, Vol. 105, no. HY4.

HEC-RAS: River Analysis System – U.S. Army Corps of Engineers.

Karim, M.F and Kennedy, J.F. (1981) "Computer-Based Predictors for Sediment Discharges and Friction Factors of Alluvial Streams." IIHR Report No. 242. Iowa City: Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa.

Karim, M.F and Kennedy, J.F. (1990) "Menu of Coupled Velocity and Sediment Discharge Relations for Rivers." J. Hydr. Engrg; ASCE, Vol. 116, no. 8, pp. 978-96.

Méndez, Manuel Vicente (1992) "Protecciones de la Margen Izquierda del Río Pao Aguas Debajo de la Presa en el Sector de la Estación de Bombeo N° 1." I.N.O.S.

Méndez, Manuel Vicente (2001) "Elementos de Hidráulica de Canales." UCAB, Caracas, Venezuela.

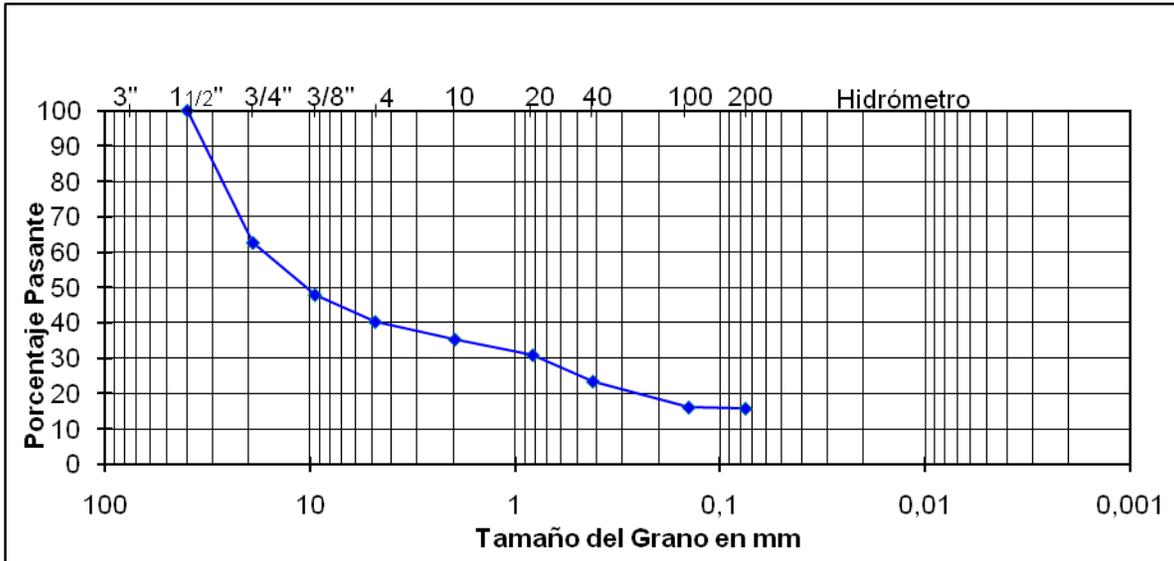
Nordin, C.F. Jr (1964) "Aspects of Flow Resistance and Sediment Transport: Río Grande near Bernadillo, New Mexico." Water Supply Paper 1498-H, United State Geological Survey, Washington, D.C.

Sturm, Terry W. (2001) "Open Channel Hydraulics" McGraw-Hill Water Resources and Environmental Engineering, Textbook Series, New York, 512 pages.

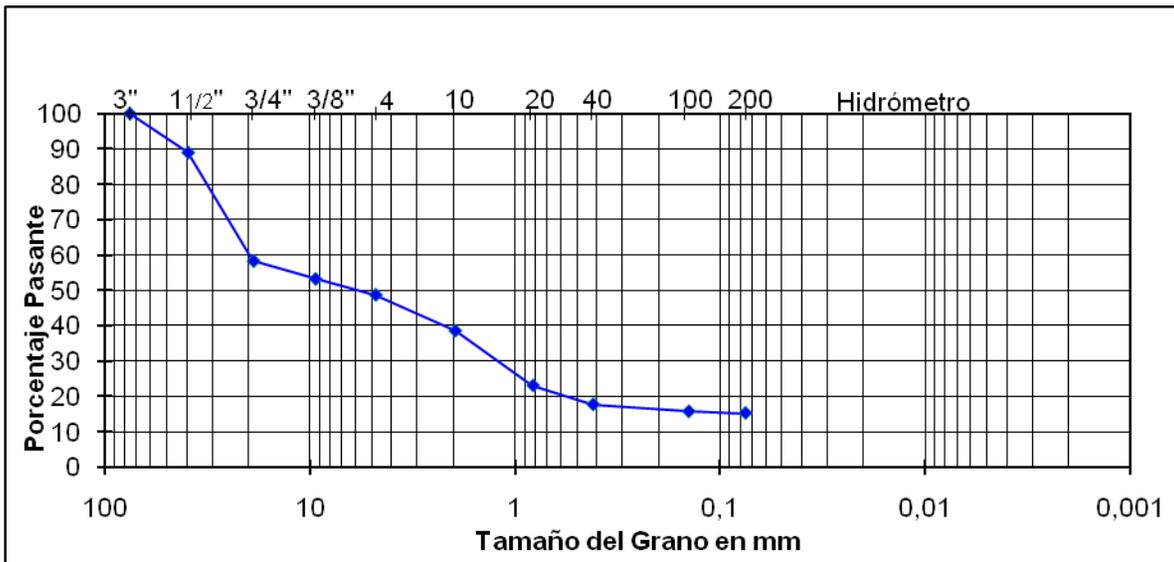
Van Rijn, L. C. (1984a) "Sediment Transport, part I: Bed load transport." J. Hydr. Engrg; 110(10), 1431-1456.

Van Rijn, L. C. (1984b) "Sediment Transport, part II: Suspended load transport." J. Hydr. Engrg; 110(11), 1613-1641.

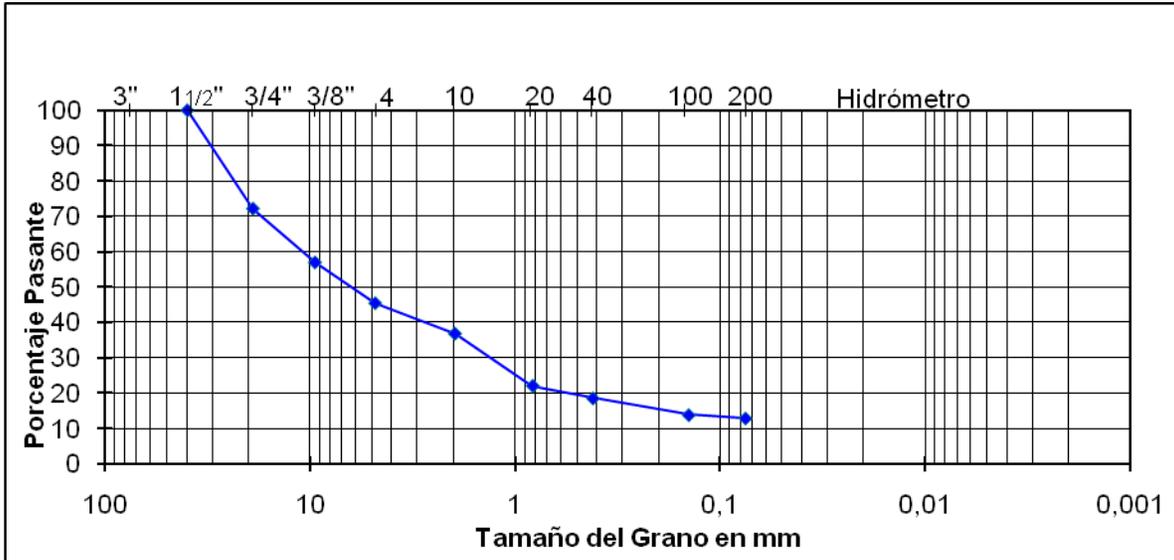
## ANEXOS

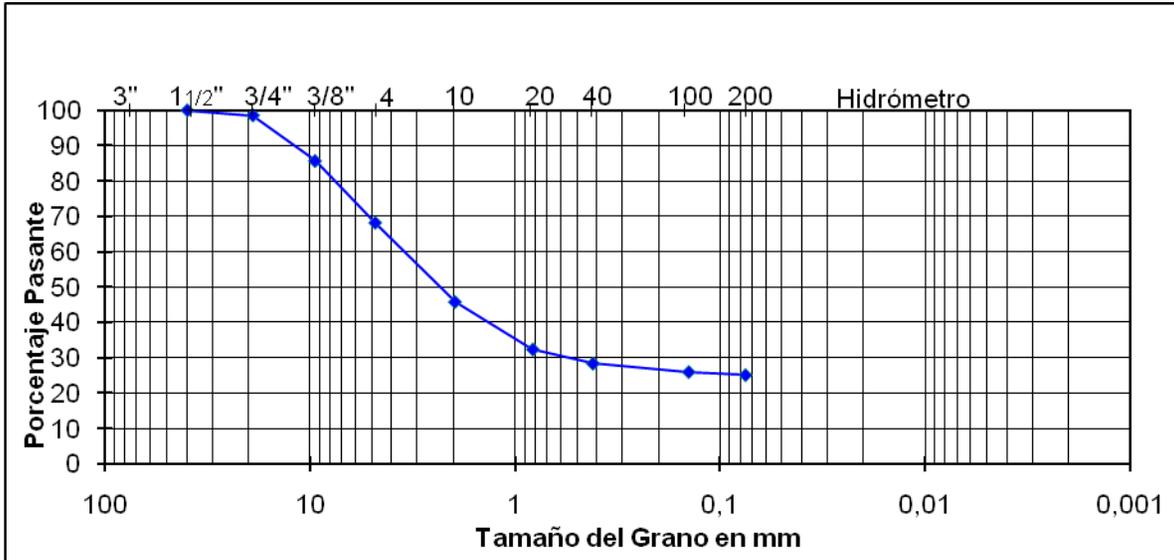


**Anexo 1. Curva granulométrica de la muestra de suelo, identificada como 1-2, recolectada en la margen derecha de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+200.**

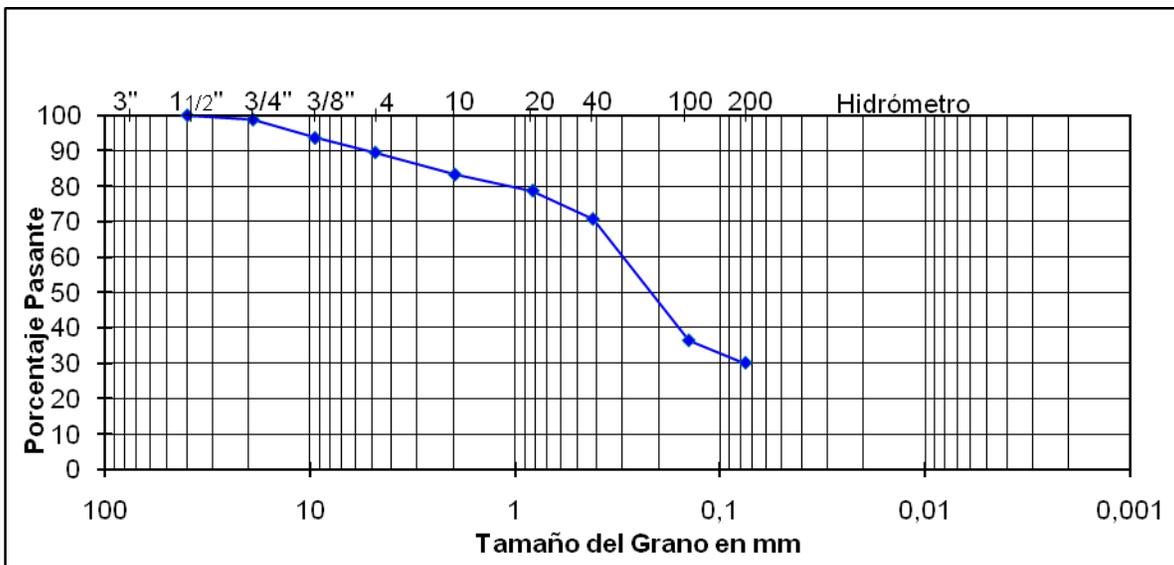


**Anexo 2. Curva granulométrica de la muestra de suelo, identificada como 2-3, recolectada en el centro de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+200.**

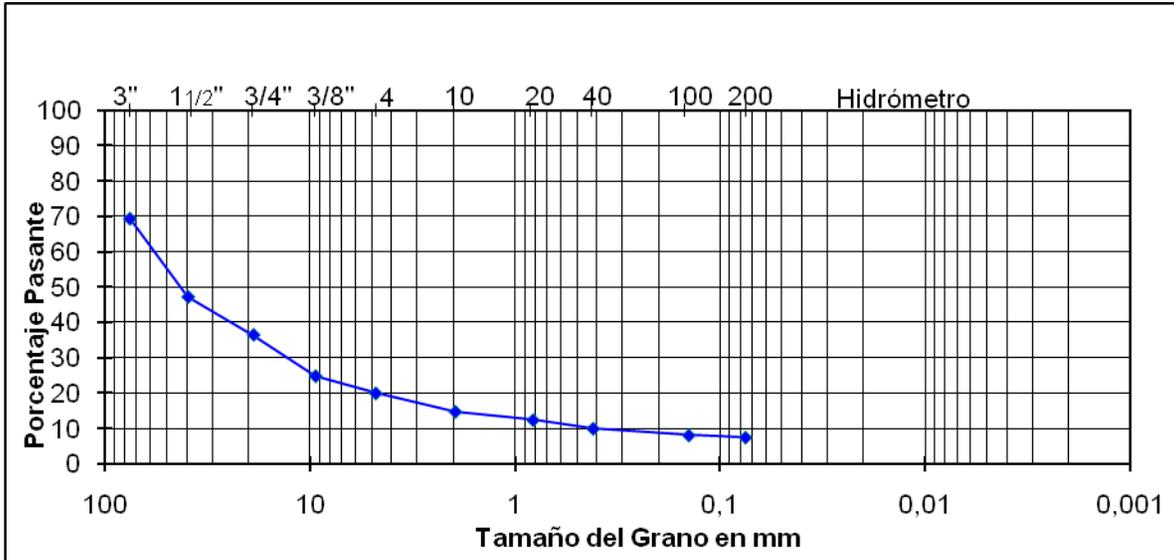




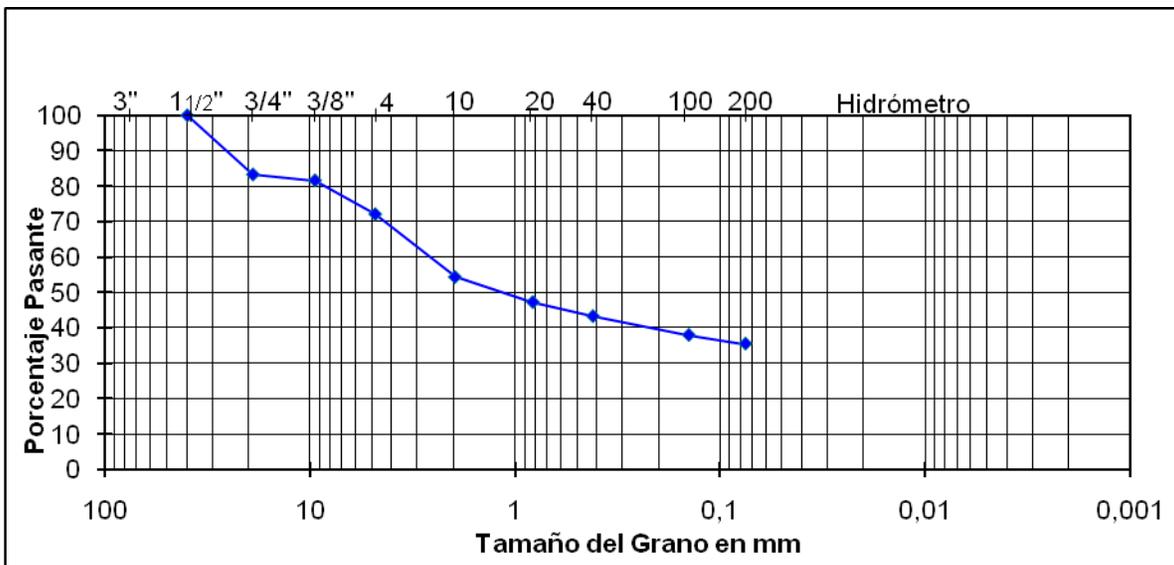
Anexo 5. Curva granulométrica de la muestra de suelo, identificada como 3-3 recolectada en la margen izquierda de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+240.



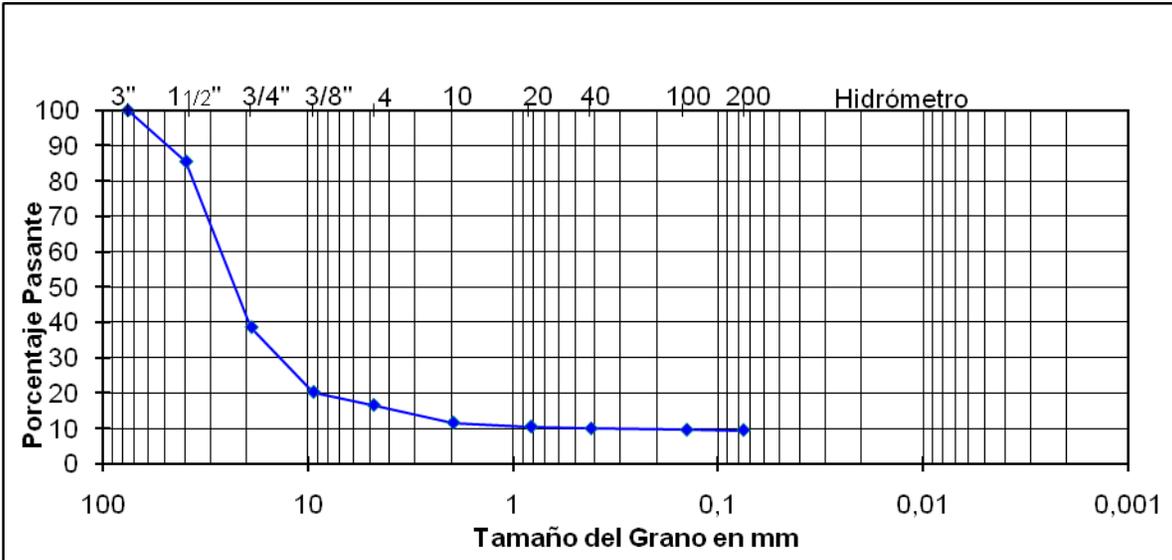
Anexo 6. Curva granulométrica de la muestra de suelo, identificada como 1-7 recolectada en la margen derecha de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+425.



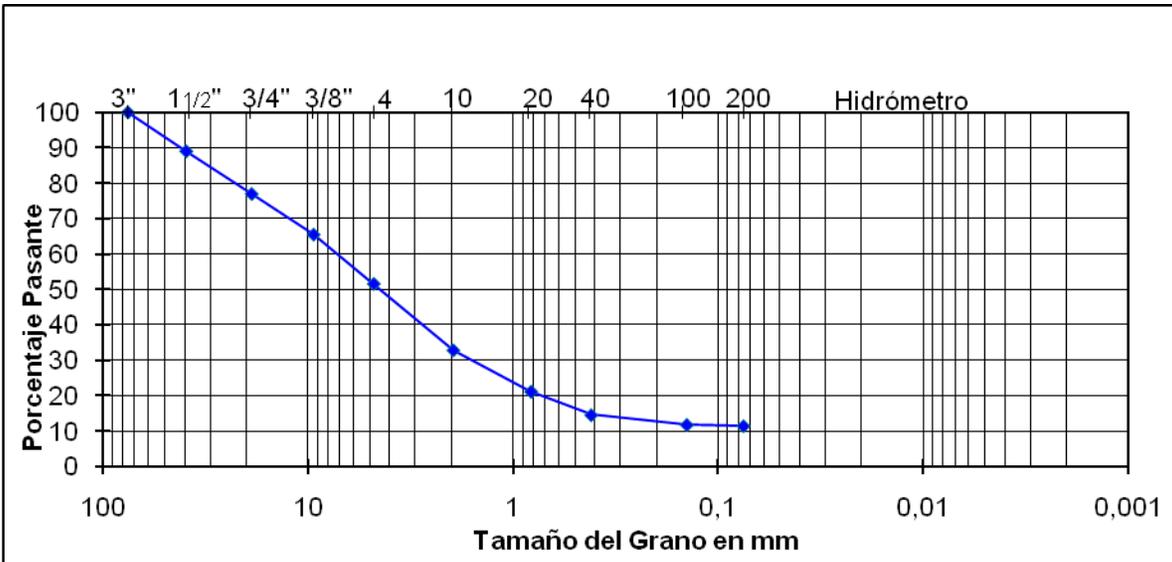
Anexo 7. Curva granulométrica de la muestra de suelo, identificada como 2-5 recolectada en el centro del cauce de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+425.



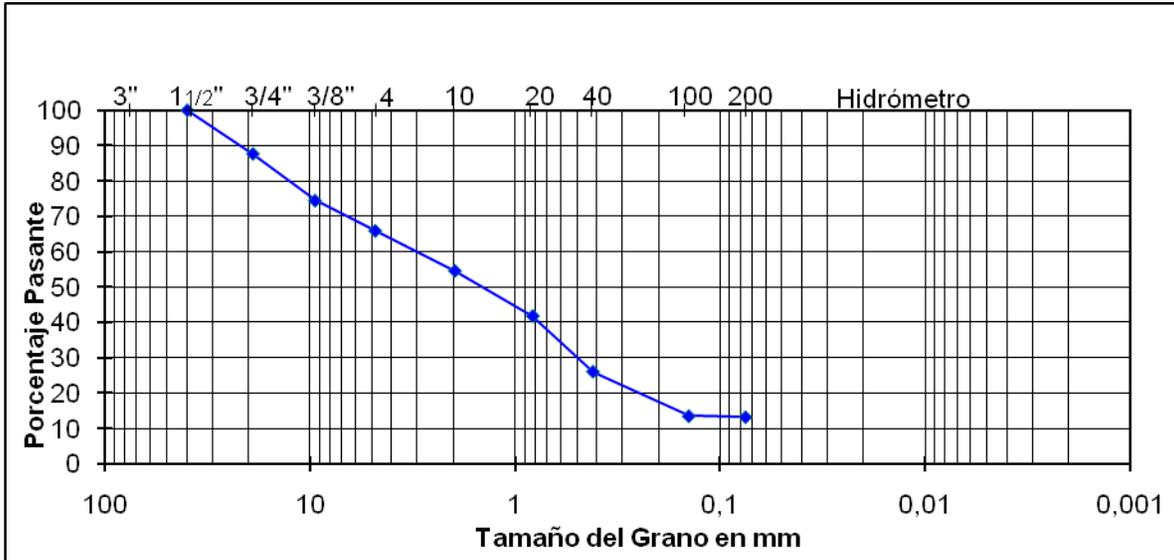
Anexo 8. Curva granulométrica de la muestra de suelo, identificada como 3-5 recolectada en la margen izquierda de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+425.



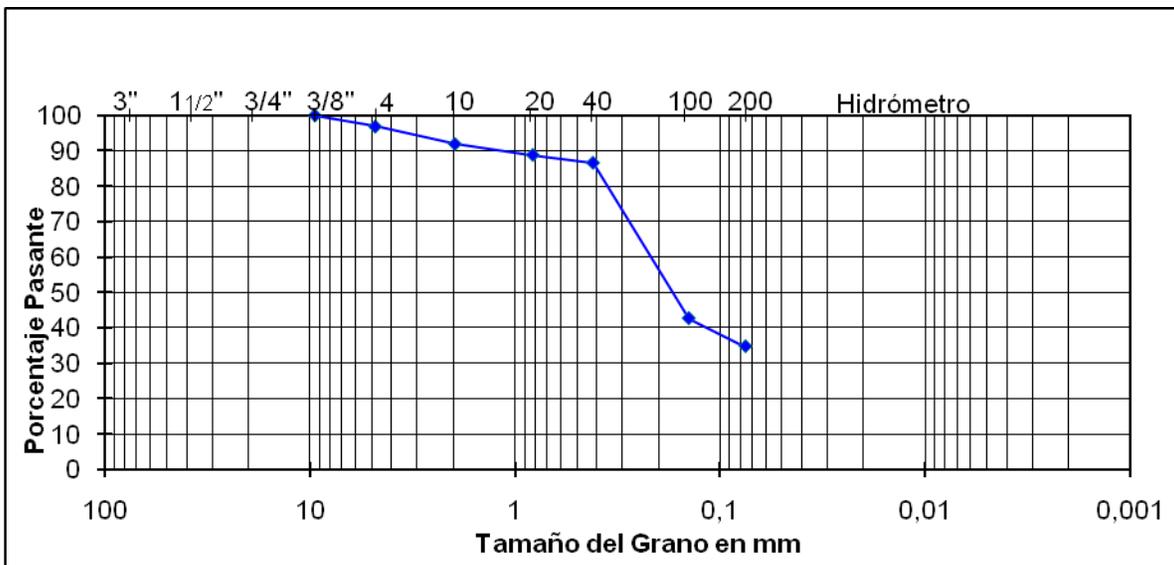
**Anexo 9. Curva granulométrica de la muestra de suelo, identificada como 1-4 recolectada en la margen derecha de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+525.**



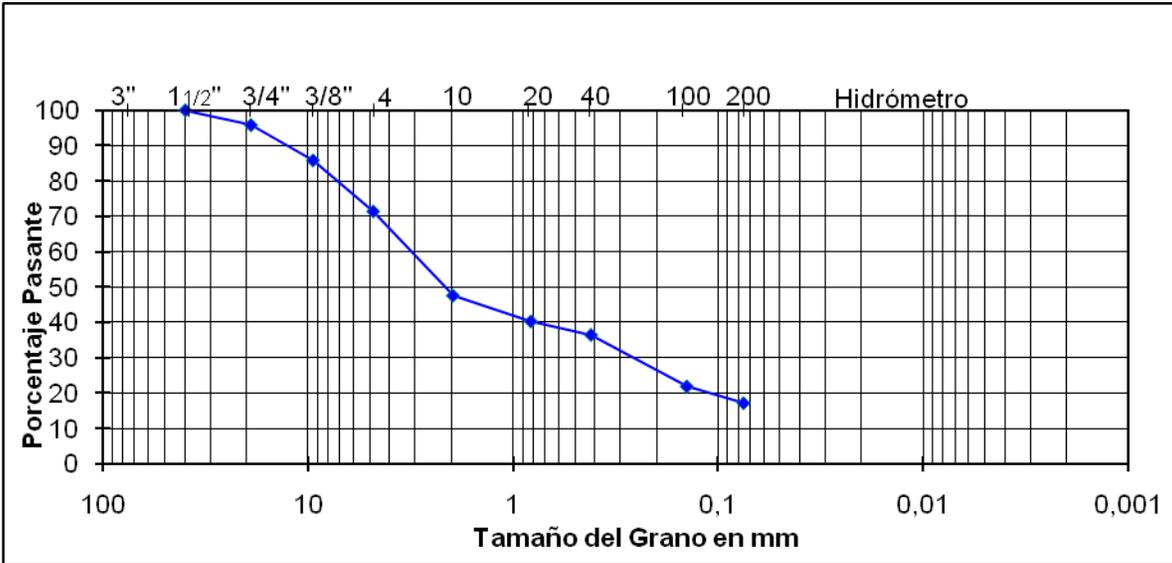
**Anexo 10. Curva granulométrica de la muestra de suelo, identificada como 2-4 recolectada en el centro de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+525.**



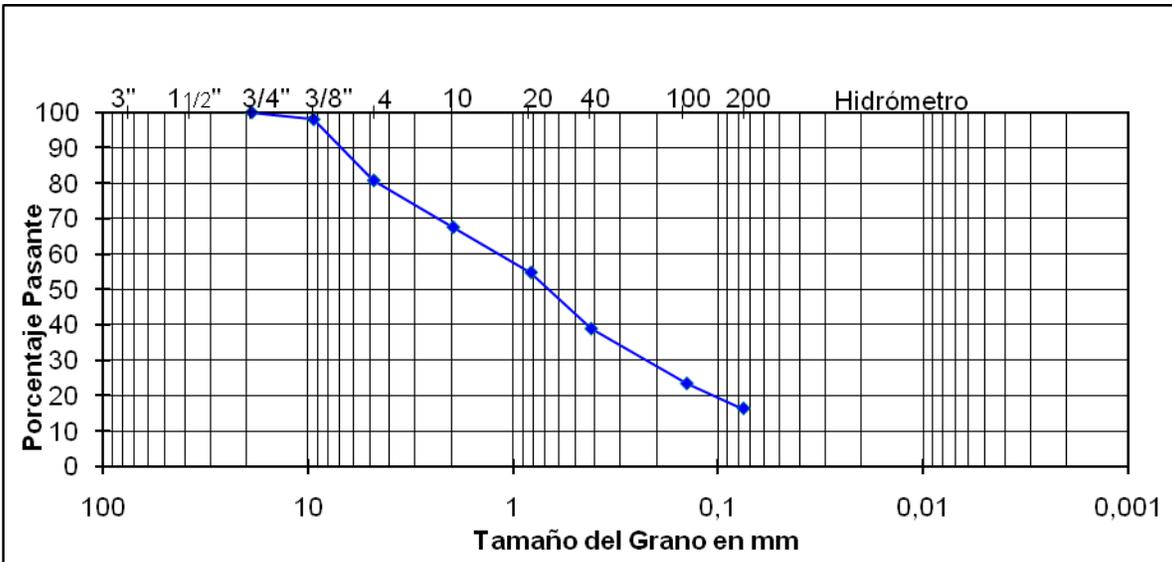
**Anexo 11. Curva granulométrica de la muestra de suelo, identificada como 3-4 recolectada en la margen izquierda de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+525.**



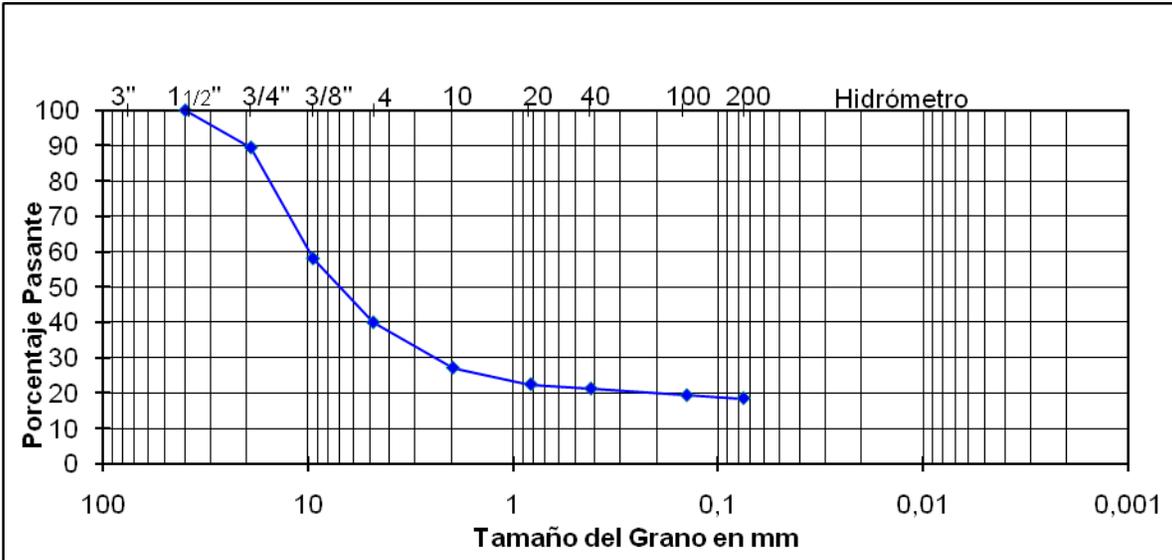
**Anexo 12. Curva granulométrica de la muestra de suelo, identificada como 1-1 recolectada en la margen derecha de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+625.**



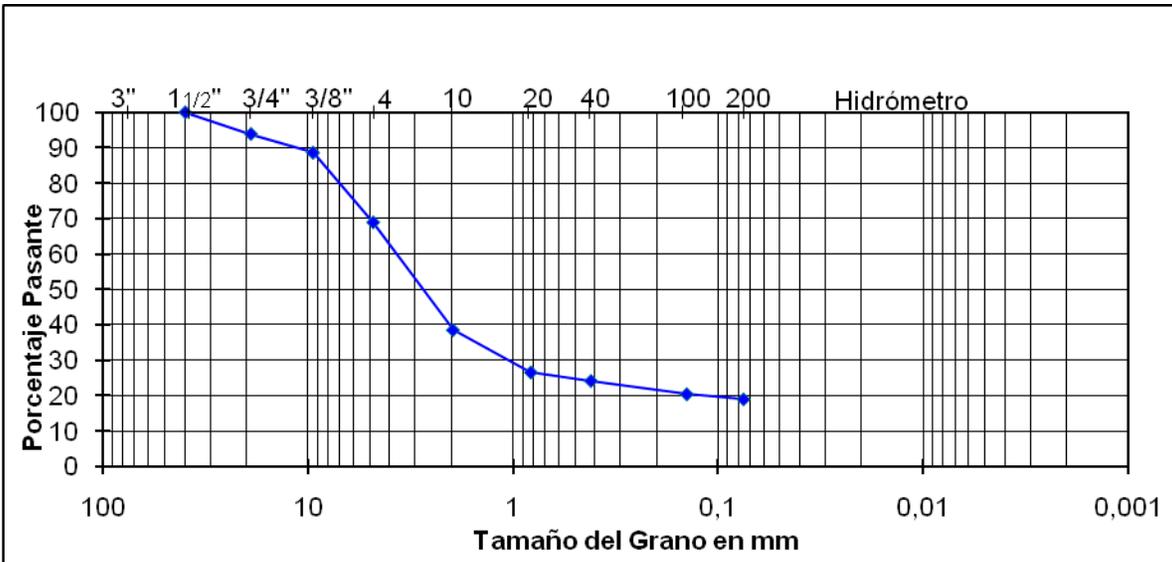
**Anexo 13. Curva granulométrica de la muestra de suelo, identificada como 2-1 recolectada en el centro de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+625.**



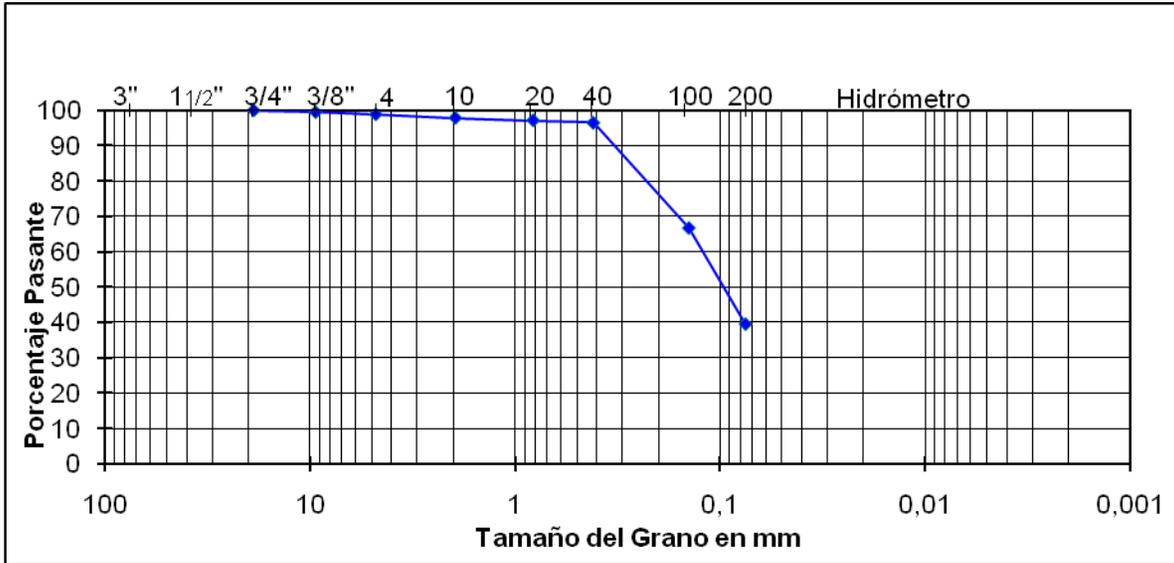
**Anexo 14. Curva granulométrica de la muestra de suelo, identificada como 3-7 recolectada en la margen izquierda de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+625.**



**Anexo 15. Curva granulométrica de la muestra de suelo, identificada como 1-6 recolectada en la margen derecha de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+725.**



**Anexo 16. Curva granulométrica de la muestra de suelo, identificada como 2-2 recolectada en el centro de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+725.**



**Anexo 17. Curva granulométrica de la muestra de suelo, identificada como 3-1 recolectada en la margen izquierda de la sección transversal ubicada en la progresiva 0+725**