

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Centro de Estudios y Tecnológico del Agua

Informe Práctica Supervisada Carrera de Ingeniería Civil:

*“ESTUDIO DE DISEÑO HIDRAULICO EN EL DIQUE LOS MOLINOS, JUJUY”*



**Autor: Benzoni, Bruno**

**Tutor: García, Carlos Marcelo**

**Supervisor: Guillén, Nicolás Federico**

Julio, 2014



## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: “Marco referencial del Trabajo”</b> .....	<b>10</b>
1.1 Localización y descripción de la presa Los Molinos .....	10
1.2 Problemática actual de la presa Los Molinos.....	12
1.3 Modelo Físico Los Molinos .....	14
1.3.1 Objetivos del modelo .....	15
1.3.2 Antecedentes .....	16
1.3.3 Descripción del modelo físico.....	16
1.3.4 Nomenclatura adoptada de las estructuras de descarga.....	21
1.4 Objetivos de la práctica supervisada .....	22
1.4.1 Objetivos generales de la práctica supervisada.....	22
1.4.2 Objetivos específicos .....	22
1.5 Organización del Informe .....	22
<b>CAPÍTULO 2: “Medición de caudales en las estructuras de descarga del modelo físico”</b> .....	<b>25</b>
2.1 Introducción .....	25
2.2 Técnicas de velocimetría para caracterizar el flujo medio de aproximación .....	25
2.2.1 Velocimetría por imágenes de partículas (PTV).....	25
2.2.1.1 Introducción y descripción.....	25
2.2.1.2 Condiciones ensayadas con PTV.....	26
2.2.2 Tubo Pitot.....	27

---

2.2.2.1	Introducción y descripción.....	27
2.2.2.2	Condiciones ensayadas con Pitot.....	30
<b>2.3</b>	<b>Descripción de la Medición Volumétrica .....</b>	<b>31</b>
2.3.1	Introducción y descripción .....	31
2.3.2	Condiciones hidráulicas ensayadas .....	32
2.3.3	Metodología .....	34
2.3.4	Elementos Utilizados .....	36
<b>2.4</b>	<b>Resultados Obtenidos.....</b>	<b>38</b>
2.4.1	Resultados con Velocimetría por Imágenes de Partículas (PTV).....	38
2.4.2	Resultados Tubo Pitot .....	38
2.4.3	Resultados Medición Volumétrica.....	39
<b>2.5</b>	<b>Comparaciones de Resultados.....</b>	<b>40</b>

**CAPÍTULO 3: “Estimación de curvas de capacidad hidráulica de las estructuras de descarga” .....**

<b>3.1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>46</b>
<b>3.2</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>47</b>
<b>3.3</b>	<b>Análisis de los resultados.....</b>	<b>49</b>
3.3.1	Dique Fijo .....	49
3.3.2	Dique Móvil.....	50
3.3.3	Canal moderador.....	55

---

<b>CAPÍTULO 4: “Estimación de curvas de despegue en el trampolín del salto de esquí del Canal Moderador” .....</b>	<b>60</b>
4.1 Introducción .....	60
4.2 Procedimiento .....	60
4.3 Resultados .....	61
<b>CAPÍTULO 5: “Conclusiones” .....</b>	<b>68</b>
5.1 Aspectos técnicos analizados.....	68
5.2 Generales de la práctica .....	69
5.3 Recomendaciones trabajos futuros .....	70
<b>CAPÍTULO 6: “Referencias” .....</b>	<b>72</b>

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Imagen Aérea Dique Los Molinos .....	10
Figura 2: Elementos del Dique Los Molinos .....	11
Figura 3: Imagen aérea tomada en una crecida el 22 de Enero del 2013 .....	11
Figura 4: Sedimentación aguas arriba del Dique Fijo .....	12
Figura 5: Erosión generalizada del lecho aguas abajo del Dique .....	12
Figura 6: Abrasión cresta del Dique Móvil .....	13
Figura 7: Erosión local aguas abajo del Canal Moderador .....	13
Figura 8: Compuerta del Dique Móvil.....	14
Figura 9: Modelo Físico Dique Los Molinos, Laboratorio de Hidráulica UNC .....	15
Figura 10: Cámaras de Aforo con vertedero triangular .....	17
Figura 11: Cámara de Carga del río Reyes .....	18
Figura 12: Cámara de ingreso del río Grande .....	18
Figura 13: Obra de cierre .....	19
Figura 14: Compuerta rebatible .....	19
Figura 15: Tanque Volumétrico.....	20
Figura 16: Desarenador .....	20
Figura 17: Recorrido del flujo.....	21
Figura 18: Nomenclatura adoptada de las diferentes estructuras de descarga.....	21
Figura 19: Ubicación de la progresiva 0 (cero). El cero está ubicado en la margen derecha .....	26
Figura 20: Tubo Pitot (Streeter y Wylie, 1999) .....	28
Figura 21: Distribución de Caudales .....	33
Figura 22: Modelo en funcionamiento con separadores de flujo.....	34
Figura 23: Trabajo del Operario “B” .....	35
Figura 24: Recipiente de Medición de 20 lts.....	36
Figura 25: Regla de Medición de 100 cm.....	37

Figura 26: Separador de Flujo Canal Moderador .....	37
Figura 27: Separador de Flujo Dique Móvil .....	37
Figura 28: Modelo Físico Presa Los Molinos. Dique fijo, Dique Móvil y Canal Moderador .....	46
Figura 29: Esquema que indica localizaciones de escalas graduadas.....	47
Figura 30: Zonas en donde se produce separación del flujo y su efecto sobre las escalas a Los Molinos.....	48
Figura 31: Distancia en horizontal “D” que el alcanza el flujo en el salto de esquí en Canal Moderador.....	61

## ÍNDICE TABLAS

Tabla 1: Mediciones por el Método PTV .....	27
Tabla 2: Mediciones por el Método de Tubo Pitot .....	30
Tabla 3: Mediciones por el Método Volumétrico .....	33
Tabla 4: Resultados obtenidos por la técnica PTV .....	38
Tabla 5: Resultados obtenidos por la técnica Tubo de Pitot .....	39
Tabla 6: Resultados obtenidos por la técnica Medición Volumétrica.....	39
Tabla 7: Resumen de los Métodos utilizados .....	43
Tabla 8: Mediciones de Q y D en Canal Moderador.....	61
Tabla 9: Mediciones de Q y D para la compuertas CM1 del Canal Moderador.....	63
Tabla 10: Mediciones de Q y D para la compuertas CM2 del Canal Moderador.....	65

## ÍNDICE GRAFICOS

Gráfico 1: Porcentaje de erogación de cada compuerta del Dique Móvil, para las distintas Técnicas de Medición utilizadas.....	41
---	----

Grafico 2: Porcentaje de erogación de cada compuerta de las estructuras de evacuación, para las distintas Técnicas de Medición utilizadas .....	42
Gráfico 3: Curvas H – Q obtenidas experimentalmente (Quiroga, 2013) .....	50
Gráfico 4: H-Q para DM1 con lecturas en escalas emplazadas en margen izquierda y derecha del Dique Móvil .....	51
Gráfico 5: H-Q para DM2 con lecturas en escalas emplazadas en margen izquierda y derecha del Dique Móvil .....	51
Gráfico 6: H-Q para DM3 con lecturas en escalas emplazadas en margen izquierda y derecha del Dique Móvil .....	51
Gráfico 7: H-Q para DM4 con lecturas en escalas emplazadas en margen izquierda y derecha del Dique Móvil .....	52
Gráfico 8: H-Q para DM1 utilizando H estimado en el centro de la estructura .....	52
Gráfico 9: H-Q para DM2 utilizando H estimado en el centro de la estructura .....	53
Gráfico 10: H-Q para DM3 utilizando H estimado en el centro de la estructura .....	53
Gráfico 11: H-Q para DM4 utilizando H estimado en el centro de la estructura .....	53
Grafico 12: H-Q del Dique Móvil .....	55
Grafico 13: H-Q para CM1 con lecturas en escalas emplazadas en margen izquierda y derecha del Canal Moderador .....	56
Grafico 14: H-Q para CM2 con lecturas en escalas emplazadas en margen izquierda y derecha del Canal Moderador .....	56
Grafico 15: H-Q del Canal Moderador con lecturas en escalas emplazada en margen derecha del Dique Móvil .....	57
Gráfico 16: H-Q del Canal Moderador .....	58
Gráfico 17: Curva Q-D para Canal Moderador .....	62
Gráfico 18: Curva Q-D para CM1 .....	64
Gráfico 19: Curva Q-D para CM2 .....	65



# CAPÍTULO 1:

## *“Marco referencial del Trabajo”*

# 1 Marco referencial del Trabajo

## 1.1 Localización y descripción de la presa Los Molinos

El dique derivador Los Molinos es una obra hidráulica situada en la Provincia de Jujuy, República Argentina, a pocos kilómetros de su capital San Salvador de Jujuy. La obra se encuentra río abajo de la confluencia de los ríos Reyes y Grande (ver Figura 1). El objetivo de esta obra es abastecer de agua para consumo doméstico y riego a la región.



Figura 1: Imagen Aérea Dique Los Molinos

El dique está constituido por los siguientes elementos, Figura 2 y Figura 3:

- Terraplén de materiales sueltos sobre margen izquierda (TMI) de 340 metros de longitud y 13 metros de altura.
- Una obra principal de 280 metros de longitud, formado por:
  - Un vertedero fijo que denominaremos Dique Fijo (DF) de 200 metros de longitud.

- Un vertedero controlado por compuertas circulares que mencionaremos como Dique Móvil (DM) de 70 metros de longitud con vanos cada 15 metros.
- Un canal de limpieza de 10 metros de longitud al cual llamaremos Canal Moderador (CM).
- Una obra de toma, ubicada sobre la margen derecha de la obra principal, que desvía un caudal máximo 25 m<sup>3</sup>/s para el abastecimiento de agua para consumo y riego.
- Terraplén de materiales sueltos sobre margen derecha (TMD) de 440 metros de longitud y 12 metros de altura.

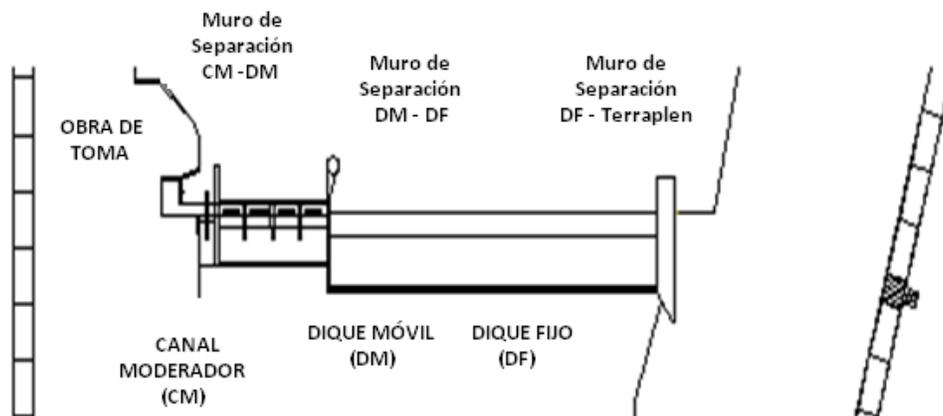


Figura 2: Elementos del Dique Los Molinos



Figura 3: Imagen aérea tomada en una crecida el 22 de Enero del 2013

## 1.2 Problemática actual de la presa Los Molinos

La presa Los Molinos actualmente presenta cuatro problemáticas asociado a diversas causas naturales como:

1. **Sedimentación y Tarquinamiento** aguas arriba del dique debido al gran aporte de materiales transportados por el rio. En la Figura 4 se puede apreciar como el sedimento se fue depositando.



*Figura 4: Sedimentación aguas arriba del Dique Fijo*

2. **Erosión generalizada del lecho** aguas debajo de la presa, lo cual hace que peligre la estabilidad (ver Figura 5).



*Figura 5: Erosión generalizada del lecho aguas abajo del Dique*

3. **Abrasión** en el perfil del vertedero y pileta de aquietamiento del Dique Fijo, cresta del vertedero del Dique Móvil y dientes disipadores, debido a la colmatación de la presa empezó a generarse aporte de material desde aguas arriba hacia aguas abajo. Ver Figura 6.



*Figura 6: Abrasión cresta del Dique Móvil*

4. **Erosiones locales** importantes aguas debajo de las obras de descarga, particularmente aguas abajo del Canal Moderador. Estas erosiones a pie de presa comprometen la estabilidad de la misma (ver Figura 7).



*Figura 7: Erosión local aguas abajo del Canal Moderador*

5. **Falta de mantenimiento** en las compuertas del Dique Móvil (DM) y en los descargadores de fondo del Canal Moderador (CM) llevaron a que los mismos funcionen inadecuadamente produciendo un mal manejo en el funcionamiento del dique en su conjunto.



*Figura 8: Compuerta del Dique Móvil*

### 1.3 Modelo Físico Los Molinos

Debido a los problemas antes mencionados se propuso la reparación y refuncionalización del mismo a cargo de la empresa Benito Roggio e Hijos S.A.

Para ello, se realizó el Modelo Físico del “Dique Los Molinos”, construido en el predio del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la UNC (ver Figura 9). Se utilizó una escala de 1:65 (un metro del modelo, representan 65 metros en el prototipo).



*Figura 9: Modelo Físico Dique Los Molinos, Laboratorio de Hidráulica UNC*

### 1.3.1 Objetivos del modelo

Los objetivos que se plantean en este estudio se describen a continuación:

- **Verificar las capacidades hidráulicas de evacuación de las estructuras de control:** Conformadas por el Dique Fijo, el Dique Móvil y el canal de limpieza o Canal Moderador, definiendo sus límites operativos de descarga. Esta evaluación se llevará a cabo en todo el rango operativo de las obras.
- **Verificar las condiciones de disipación de energía,** de las estructuras de control dispuestas en los distintos sectores de la obra.
- **Analizar y cuantificar las erosiones,** aguas abajo de las estructuras de descarga a los fines de constatar el funcionamiento de las obras proyectadas. Esta evaluación se llevará a cabo para diferentes escenarios hidrológicos de diseño.

- **Verificar y optimizar las consignas de operación de las estructuras de control** (compuertas), a los fines de regular los procesos hidrosedimentológicos presentes en las proximidades de la presa para disminuir la sedimentación aguas arriba y permitir el paso de los sedimentos a través de las estructuras de control.
- **Determinar de la distribución del flujo de aproximación a las obras de descarga** a los fines de conocer el comportamiento del flujo frente a diferentes escenarios hidrológicos.

### 1.3.2 Antecedentes

Se pueden citar dos antecedentes:

- En el año 1971, se construyó un modelo tridimensional con similitud de Froude del Dique Los Molinos, con escala 1:75 no distorsionada y con lecho móvil en la Universidad Nacional de La Plata, para verificar el diseño original de la presa existente y sus obras hidráulicas. El caudal máximo ensayado fueron 4200 m<sup>3</sup>/s en prototipo.
- En el año 1986, se llevó a cabo un estudio complementario de la presa, utilizando un modelo físico bidimensional de fondo móvil en la Universidad Nacional de Tucumán. El objetivo era el diseño de un nuevo lanzador de descargas del dique móvil, con lo cual se ensayó este componente de la presa con un caudal de 864 m<sup>3</sup>/s en prototipo para la totalidad del dique móvil.

### 1.3.3 Descripción del modelo físico

El modelo físico construido es un modelo froudiano (las fuerzas gravitatorias gobiernan en el comportamiento del flujo) tridimensional con escala 1:65 no distorsionada. La escala fue seleccionada en función del espacio disponible, la capacidad de bombeo existente en el Laboratorio de Hidráulica y los efectos de escala.

La geometría del modelo en planta es forma de “L” con dimensiones características de 26.4 x 20.8 metros en las direcciones principales, quedando fuera de estas las cámaras de ingreso y salida del modelo. La superficie total de modelación es de 258m<sup>2</sup> que en prototipo representa 1.10 km<sup>2</sup>.

Los elementos que componen del modelo en orden por donde circula el agua son:

- **Cisterna:** Dentro de las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica, es de forma anular y tiene una capacidad de almacenamiento de 65 m<sup>3</sup>.
- **Bombas tipo flight:** El laboratorio posee dos bombas, de tipo centrífuga y sumergible; tienen una capacidad teórica de bombeo de 70 l/seg. cada una, y con una altura de carga de 2 metros.
- **Cámaras de Aforo:** Ubicadas en el exterior, tienen la función de medir los caudales que circulan en los ríos de los modelos (río Reyes y río Grande), cuentan con un vertedero de lámina delgada metálica triangular. Véase Figura 10.



*Figura 10: Cámaras de Aforo con vertedero triangular*

- **Cámara de Carga:** Permiten derivar el caudal mediante compuertas, ya sea para el modelo del río Suquía o el modelo Dique Los Molinos. En la Figura 11 se puede observar la cámara de carga del río Reyes. Mediante la compuerta

se puede derivar el caudal hacia el modelo del río Suquía si dicha compuerta está abierta o alimentar al río Reyes al estar cerrada.



*Figura 11: Cámara de Carga del río Reyes*

- **Cámara de Ingreso:** Están dispuestas en el extremo aguas arriba de los ríos Grande y Reyes. Su función, aquietar y distribuir el agua linealmente que proviene de las cámaras de cargas, para simular condiciones hidrológicas reales.



*Figura 12: Cámara de ingreso del río Grande*

- **Obra de Cierre:** Constituida por márgenes derecha e izquierda, Dique Fijo (DF), Dique Móvil (DM), Canal Moderador (CM) y Obra de Toma (ver Figura 13).



*Figura 13: Obra de cierre*

- **Compuerta Rebatible:** Su altura se regula a través de un tornillo, tiene la finalidad de simular las condiciones hidrológicas del río aguas abajo de la presa (ver Figura 14).



*Figura 14: Compuerta rebatible*

- **Tanque Volumétrico:** Recinto donde se miden caudales de egreso del modelo, como medida de control y comparación de los medidos en las cámaras de aforo (ver Figura 15).



Figura 15: Tanque Volumétrico

- **Desarenador:** Espacio donde al agua sedimenta la arena erosionada en los tramos de fondo móvil; luego la conduce, a través del retorno, a la cisterna para luego volver a comenzar el ciclo (ver Figura 16).



Figura 16: Desarenador

En la Figura 17 se puede observar el recorrido del flujo desde la cisterna hasta el desarenador y de vuelta a la misma. Desde las cámaras de carga el agua se conduce hacia las cámaras de ingreso mediante tuberías enterradas que pasan por debajo del modelo físico. Las flechas celestes indican el recorrido del agua.

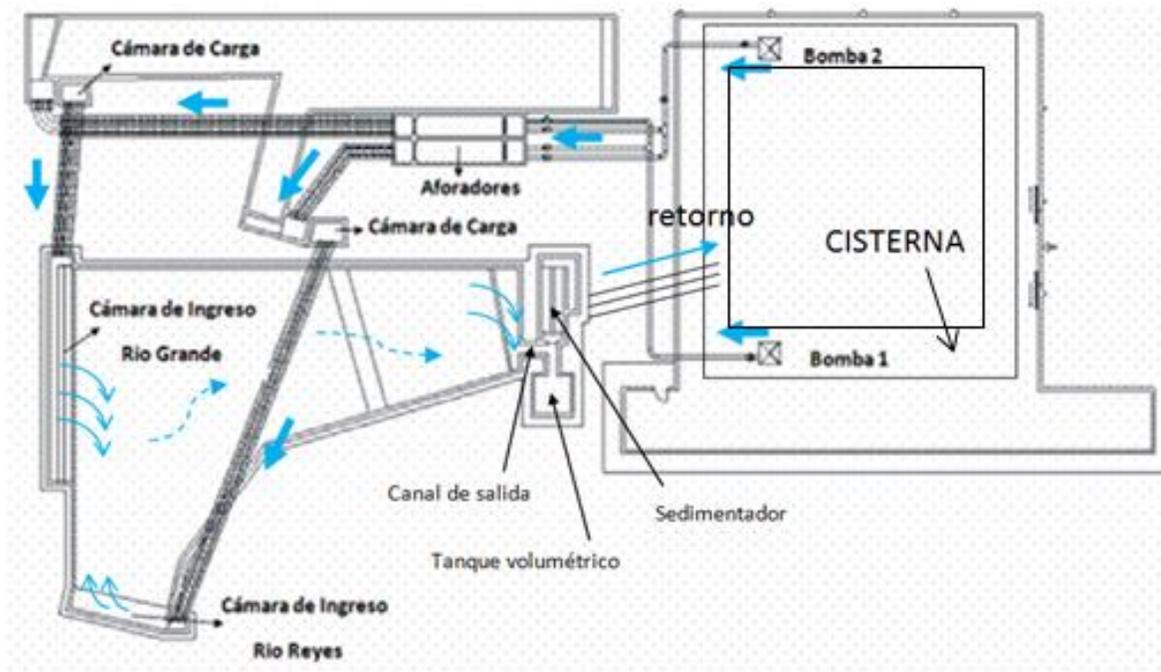


Figura 17: Recorrido del flujo

### 1.3.4 Nomenclatura adoptada de las estructuras de descarga

En la Figura 18 se muestran las diferentes estructuras de descarga y la nomenclatura adoptada para cada una que será utilizada a lo largo de este trabajo.

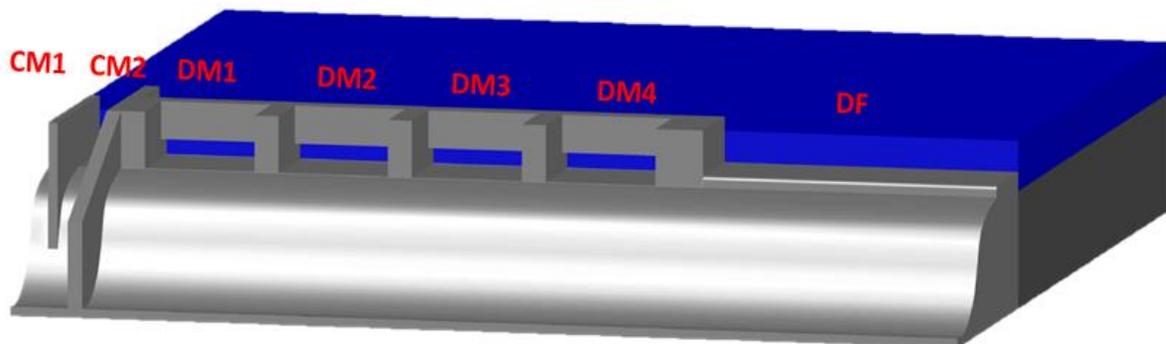


Figura 18: Nomenclatura adoptada de las diferentes estructuras de descarga

## 1.4 Objetivos de la práctica supervisada

### 1.4.1 Objetivos generales

- Caracterización hidrodinámica del Flujo de ingreso a las obras de evacuación de excedentes de la Presa Los Molinos, Jujuy.

### 1.4.2 Objetivos específicos

1. Medición de caudales en las estructuras de descargas del modelo físico.
2. Estimación de curvas de capacidad hidráulica de las estructuras de descarga del Dique Los Molinos.
3. Estimación de curvas de despegue en el trampolín del salto esquí del Canal Moderador del Dique Los Molinos.

## 1.5 Organización del Informe

El informe está presentado en cinco capítulos. En el primer capítulo se detalla el marco referencial del trabajo, explicando la localización y descripción del Dique Los Molinos, como así también se especifica los elementos que lo componen. También se pone en manifiesto las problemáticas actuales que enfrenta. Además, como parte del capítulo, se presentan los objetivos generales y específicos de la práctica supervisada.

En el segundo capítulo se explicaran las técnicas de medición de caudales en las estructuras de descarga del modelo físico Dique Los Molinos, con sus respectivas descripciones y condiciones ensayadas. Luego se compararan los resultados obtenidos por cada una de ellas para obtener conclusiones sobre las mismas.

En el tercer capítulo se estimaran las curvas de capacidad hidráulica de las estructura de descarga, como son el Dique Fijo, Dique Móvil y Canal Moderador. Estas curvas serán

comparadas con las obtenidas en trabajos anteriores como así también la presentada por la empresa que se encargó de realizarla (Halcrow, 2009) en el momento de la construcción del Dique.

En el cuarto capítulo se estimaron las curvas de despegue en el trampolín del salto de esquí del Canal Moderador, en ellas se calculara el caudal necesario para iniciar el despegue. Sus resultados serán analizados con el fin de evitar erosiones en el pie de la estructura aguas abajo del Canal Moderador.

Finalmente en el quinto capítulo se exponen las conclusiones de la sobre las técnicas experimentales y generales de la práctica supervisada. Además se presentan recomendaciones sobre la realización de trabajos futuros.

# CAPÍTULO 2:

*“Medición de caudales en las estructuras de descarga del Modelo Físico”*

## 2 Medición de caudales en las estructuras de descarga del modelo físico

### 2.1 Introducción

En este capítulo se detalla la técnica de medición utilizada en el trabajo para la medición de caudales en las diferentes estructuras de descarga que conforman el dique Los Molinos. Se explicará su metodología paso por paso demostrando como se realiza la técnica experimental para la obtención de los resultados. Además se compara la técnica utilizada con las presentadas en otros trabajos anteriores con el fin de analizar sus resultados.

### 2.2 Técnicas de velocimetría para caracterizar el flujo medio de aproximación

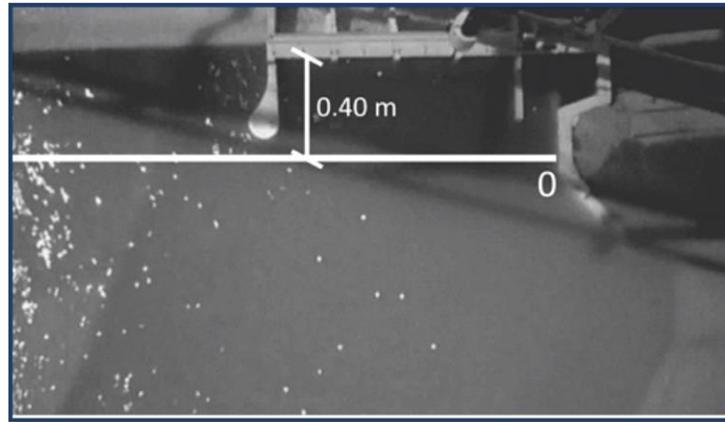
#### 2.2.1 Velocimetría por imágenes de partículas (PTV)

##### 2.2.1.1 Introducción y descripción

La técnica de velocimetría por seguimiento de partículas (PTV) permite caracterizar el campo de velocidades en una región del flujo, en función de la cantidad de partículas detectadas. Se toman imágenes secuenciales del área de estudio con partículas sembradas en el flujo, luego se determina el desplazamiento  $\Delta x$  entre dos imágenes consecutivas en el tiempo  $\Delta t$ , la velocidad se calcula como:

$$U = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Una vez obtenido el campo de velocidad superficial, se estimó a partir de él la velocidad media. Se tomó una sección transversal ubicada a 0.40 m del dique fijo (26 m en prototipo) y se seleccionó como “0” la margen derecha del acceso al canal moderador (Figura 19).



*Figura 19: Ubicación de la progresiva 0 (cero). El cero está ubicado en la margen derecha*

Con estas secciones parciales y las velocidades medias, se procedió a calcular los caudales parciales y el caudal pasante por cada estructura.

#### 2.2.1.2 Condiciones ensayadas con PTV

Para la realización de los experimentos se escogieron diferentes condiciones hidrológicas, las cuales fueron seleccionadas en virtud de los efectos que estas puedan llegar a producir en la presa. En el Modelo Físico Los Molinos el caudal máximo que se ensayó es de  $4200\text{m}^3/\text{s}$  que corresponde a un periodo de retorno de diez mil años.

La distribución de caudales adoptada para realizar los experimentos es la siguiente: Para los caudales mayores ( $4200\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $3200\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $1800\text{ m}^3/\text{s}$ ) el 65 % del caudal total es aportado por el Rio Grande y el 35 % restante por el Rio Reyes. Para los caudales menores ( $1400\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $600\text{ m}^3/\text{s}$  y  $400\text{ m}^3/\text{s}$ ), el 100 % de los aportes provenían del Rio Grande.

Primero se ensayó con la condición de todas las estructuras de evacuación abiertas para el caudal en prototipo de  $4200\text{ m}^3/\text{s}$ , se observó que vierte por dique fijo. Luego se cerraron las compuertas del canal moderador, quedando abiertas las compuertas del dique móvil para caudales menores ( $3200\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $1800\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $1400\text{ m}^3/\text{s}$ ), también vertía por dique fijo. Para caudales aun menores ( $600\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $400\text{ m}^3/\text{s}$ ), con la misma configuración de compuertas, ya no vierte por dique fijo. El fondo utilizado en el modelo físico para la realización de los ensayos era un fondo fijo, compuesto por granulometría seleccionada de

tal tamaño que el flujo no ocasionaba arrastre de sedimentos, es decir, no hay iniciación de movimiento de las partículas.

En la siguiente tabla se observa el caudal aforado por cada estructura.

N°	Q Entrada [%]		Q Prototipo [m <sup>3</sup> /s]	Fondo Aguas Arriba
	río Grande	río Reyes		
1	65%	35%	4200	Fijo
2	65%	35%	3200	
3	65%	35%	1800	
4	100%	0%	1400	
5	100%	0%	600	
6	100%	0%	400	

Tabla 1: Mediciones por el Método PTV

## 2.2.2 Tubo Pitot

### 2.2.2.1 Introducción y descripción

El tubo *Pitot* es un instrumento que permite medir velocidad de un fluido, mediante la determinación de las presiones estáticas y totales. Para realizarlo se necesitan un tubo *Pitot* y un tubo *piezométrico*.

El orificio de entrada se ubica en dirección opuesta al sentido de la circulación del flujo. Al ingresar el fluido, la velocidad se anula en el interior al ser un punto de estancamiento, transformando la energía cinética en energía de presiones. Mientras que el tubo piezométrico, consta de varias entradas laterales que no perturban la corriente; con él se mide la presión estática o piezométrica (suma de la altura topográfica y altura de presiones).

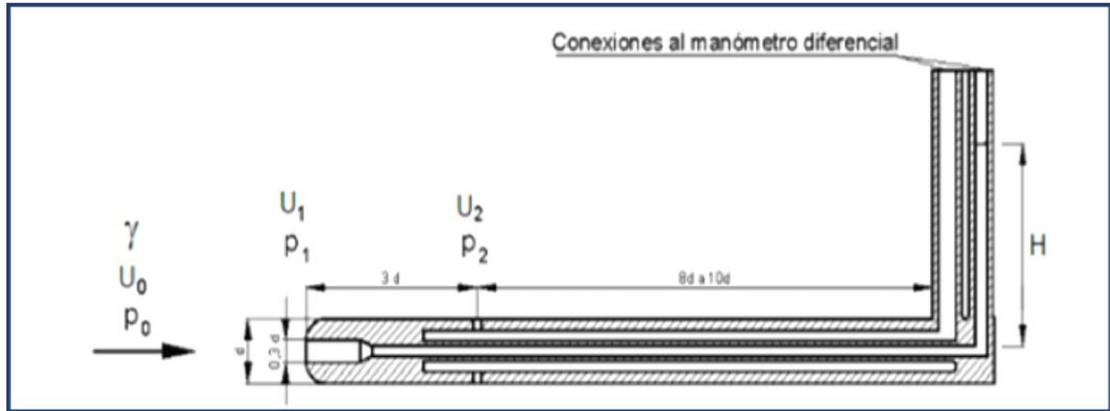


Figura 20: Tubo Pitot (Streeter y Wylie, 1999)

Como en el punto 0 de la Figura 20, la corriente no se encuentra perturbada, se tiene una presión  $P_0$  para una velocidad  $U_0$ . De lo dicho anteriormente podemos escribir que:  $U_1 = 0$

Mediante la ecuación de Bernoulli entre los puntos **0** y **1**, sin considerar las pérdidas, se obtiene:

$$Z_0 + \frac{U_0^2}{2g} + \frac{P_0}{\rho_{\text{agua}}} = Z_1 + \frac{U_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho_{\text{agua}}} \quad [\text{Ecuación 2}]$$

Donde  $g$  es la fuerza de gravedad;  $\rho_{\text{agua}}$  es la densidad del agua;  $Z_0$  y  $Z_1$  son las alturas topográficas de los puntos **0** y **1** (a los fines prácticos se consideran iguales).  $U_0$  y  $U_1$  son las velocidades del fluido en los puntos **0** y **1**;  $P_0$  y  $P_1$  son las presiones en los respectivos puntos y como  $U_0 = U_{0t}$

De la Ecuación 2 resulta:

$$\frac{U_{0t}^2}{2g} + \frac{P_0}{\rho_{\text{agua}}} = \frac{P_1}{\rho_{\text{agua}}} \quad [\text{Ecuación 3}]$$

Despejando:

$$U_{0t} = \sqrt[2]{2 g \frac{(P_1 - P_0)}{\rho_{agua}}} \quad [Ecuación 4]$$

Y como,

$$P_0 = P_2 = \rho_{agua} H_2 \quad [Ecuación 5]$$

$$P_1 = \rho_{agua} H_1 \quad [Ecuación 6]$$

Donde  $H_1$  es la altura de presiones totales y  $H_2$  es la altura de presiones estáticas, reemplazando en la Ecuación 3:

$$U_{0t} = \sqrt[2]{2 g \frac{\rho_{agua} (H_1 - H_0)}{\rho_{agua}}} \quad [Ecuación 7]$$

$$U_{0t} = \sqrt[2]{2 g (H_1 - H_0)} \quad [Ecuación 8]$$

$$U_{0t} = \sqrt[2]{2 g \Delta H} \quad [Ecuación 9]$$

Se debe introducir un coeficiente de corrección  $Cv$ , llamado coeficiente de velocidad del tubo de Pitot, que relaciona la velocidad real con la teórica, entonces  $Cv = \frac{U_0}{U_{0t}}$ :

$$U_{0t} = Cv \sqrt[2]{2 g \Delta H} \quad [Ecuación 10]$$

2.2.2.2 Condiciones ensayadas con Pitot

El área de estudio dentro del modelo se encuentra entre la zona de confluencia de los ríos Grande y Reyes y la obra de cierre. Por ello se ha relevado una serie de puntos de las márgenes y cauce para así obtener la topografía de la zona.

Para poder obtener la topografía del lecho, se realizaron relevamiento con nivel y mira del terreno, luego de procesar los datos y con la ayuda de un programa computacional se obtuvieron las curvas de nivel.

Para la realización de los experimentos se escogieron diferentes condiciones hidrológicas, las cuales fueron seleccionadas en virtud de los efectos que estas puedan llegar a producir en la presa. En la mayoría de los ensayos, la distribución de caudales adoptada para realizar los experimentos fue aportada en el 100 % del caudal total por el Rio Grande.

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los ensayos realizados por esta técnica. Se puede observar el caudal aforado por cada estructura como así también las condiciones de entrada y el caudal de prototipo. Análogamente al caso con PTV, aquí también se contaba con fondo fijo aguas arriba de la obra.

N°	Q Entrada [%]		Q Prototipo [m <sup>3</sup> /s]	Fondo Aguas Arriba
	río Grande	río Reyes		
1	100%	0%	540	<b>Fijo</b>
2	100%	0%	582	
3	100%	0%	886	
4	100%	0%	751	
5	100%	0%	546	
6	100%	0%	385	
7	100%	0%	306	
8	0%	100%	525	
9	65%	35%	528	
10	100%	0%	643	
11	100%	0%	588	
12	100%	0%	588	
13	100%	0%	588	
14	100%	0%	588	
15	100%	0%	588	

Tabla 2: Mediciones por el Método de Tubo Pitot

## 2.3 Descripción de la Medición Volumétrica

### 2.3.1 Introducción y descripción

La técnica experimental utilizada en este trabajo fue la “**Medición Volumétrica**”, que consta en medir la un volumen conocido en un delta de tiempo. Mediante un recipiente (en nuestro caso un balde de forma cilíndrica), se registra un delta de tiempo “**t**” en segundos que tarde el fluido en entrar al recipiente hasta una cierta altura. Con una regla graduada se registra la altura “**h**” alcanzada en centímetros de líquido dentro del recipiente.

Para obtener el volumen del recipiente, las variables interviniente son; su radio “**r**” y la altura “**h**” anteriormente explicada, entonces:

$$Vol = Ab \cdot h = 2\pi r^2 h \quad [Ecuación 11]$$

Con el volumen calculado y el tiempo registrado obtenemos el caudal erogado por la compuerta:

$$Q = \frac{Vol}{t} = \left[ \frac{(longitud)^3}{tiempo} \right] \quad [Ecuación 12]$$

De la misma manera se procede en cada una de las compuertas calculando el caudal de erogación.

### 2.3.2 Condiciones hidráulicas ensayadas

Para la realización de los experimentos se escogieron diferentes condiciones hidráulicas, que producen efectos diferentes tanto sobre aguas arriba como debajo de la presa. Se eligieron las condiciones más utilizadas durante la operación de la presa. Luego de definir las políticas de operación a aplicar ante la avenida de una creciente (Avila 2014), se procedió a seleccionar las condiciones hidráulicas a ensayarse en este trabajo.

En el Modelo Físico Dique Los Molinos el caudal máximo que se ensayó es de 760 m<sup>3</sup>/s (prototipo) que corresponde al máximo que puede erogarse las estructuras de evacuación sin que vierta por Dique Fijo.

En la ejecución de los ensayos, cuando el caudal de entrada era mayor a 300 m<sup>3</sup>/s (prototipo) se lo hizo ingresar al modelo por ambos ríos con una proporción del 35% por el río Reyes y 65 % por el río Grande (Figura 21), tal como lo dicta el estudio hidrológico realizado en la cuenca por la Universidad Nacional de La Plata en el año 1970.

Cuando los ensayos requerían un caudal menor a 300 m<sup>3</sup>/s (prototipo) se lo hizo ingresar al modelo únicamente por el río Grande al 100 %. Esto es así porque las bombas que alimentan al modelo pierden eficiencia justamente por ser caudales pequeños, por ello se decide trabajar solamente con la bomba que alimenta al río Grande.

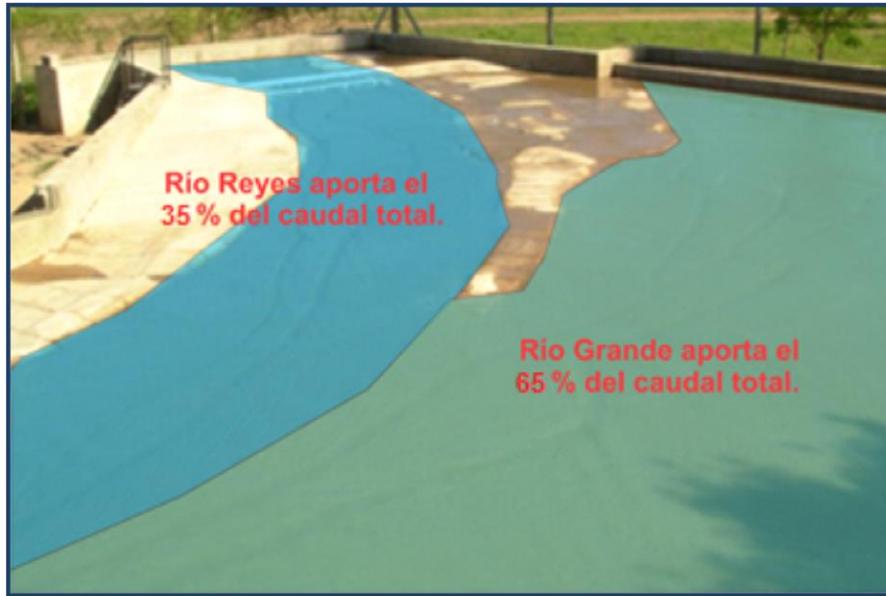


Figura 21: Distribución de Caudales

A diferencia de los dos casos anteriores en el que se usó fondo fijo, aquí aguas arribas de la obra se colocó fondo móvil, más precisamente arena fina de granulometría entre 0,6 – 1,0 mm.

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los ensayos realizados por esta técnica.

N°	Q Entrada [%]		Q Prototipo [m <sup>3</sup> /s]	Fondo Aguas Arriba
	río Grande	río Reyes		
1	65%	35%	598	Móvil
2	65%	35%	598	
3	65%	35%	665	
4	65%	35%	691	
5	65%	35%	756	
6	65%	35%	761	
7	100%	0%	599	
8	100%	0%	414	
9	100%	0%	302	

Tabla 3: Mediciones por el Método Volumétrico

### 2.3.3 Metodología

#### Paso 1: Separación de flujos de las diferentes estructuras de descarga

Para poder realizar la medición del flujo en cada compuerta, fue necesario particionarlo. Para ello se construyeron separadores de flujo de madera laminada que disminuye la rugosidad del líquido con las paredes del separador. Además fueron tallados a medida con la sección del salto de esquí tanto en el Dique Móvil como en el Canal Moderador, logrando que sean lo más estancos posibles. Para su colocación, en los cabezales se utilizaron perfiles del tipo “C” permitiendo una correcta trabazón.

Ya con el modelo en funcionamiento, se procede a la colocación de los separadores de flujo según las compuertas en las que se quiera cuantificar el caudal evacuado. Como se puede apreciar en la Figura 22.



*Figura 22: Modelo en funcionamiento con separadores de flujo*

## Paso 2: Medición Volumétrica del caudal

Para esta etapa es necesario el trabajo conjunto de dos operarios:

- Operario “A”: Encargado del cronometro.
- Operario “B”: Encargado del recipiente.

Trabajando de manera sincronizada el Operario “A” inicia el cronómetro dando simultáneamente la señal de arranque al Operario “B” que introduce el recipiente para que le ingrese líquido. Antes que el recipiente se llene, el Operario “B” da la señal de finalización para que el operario “A” detenga el cronometro. El tiempo (segundos) es registrado.



*Figura 23: Trabajo del Operario “B”*

Los recipientes a utilizar son, para:

- Medición en el Dique Móvil: Balde de 20 litros.
- Medición en el Canal Moderador: Bidón de 5 litros.

Luego de registrar el tiempo de llenado del recipiente, mediante el uso de una regla graduada, se mide la altura de líquido alcanzada y se registra.

Conociendo el diámetro del recipiente y la altura alcanzada se obtiene el volumen de líquido ( $m^3$ ), como se explicó en la sección anterior.

Vale aclarar, que como en el Canal Moderador se mide con el bidón; para cuantificar el volumen, lo que se hace es traspasar el agua desde este recipiente de menor tamaño al balde; para luego medir con regla la altura del líquido alcanzada.

#### 2.3.4 Elementos Utilizados

Los elementos que se requirieron para poder realizar la medición con dicha técnica fueron los siguientes:

- Recipiente: Balde de 20 lts y Bidón de 5 lts para Dique Móvil y Canal Moderador respectivamente.



*Figura 24: Recipiente de Medición de 20 lts.*

- Regla Graduada: Para medir altura en centímetros que el agua alcanza en el recipiente.



*Figura 25: Regla de Medición de 100 cm*

- Cronometro: Para medir el tiempo en segundos que alcanzo la altura anterior.
- Separador de Flujo: Para cada compuerta del Canal Moderador y Dique Móvil.



*Figura 26: Separador de Flujo Canal Moderador*



*Figura 27: Separador de Flujo Dique Móvil*

- Netbook: En la cual se registraron los valores de cada lectura realizada.

## 2.4 Resultados Obtenidos

### 2.4.1 Resultados con Velocimetría por Imágenes de Partículas (PTV)

Estos resultados fueron presentados por Díaz Lozada (2013) en su trabajo “Descripción experimental, utilizando un modelo físico, del flujo de aproximación a la Presa Los Molinos”, realizado en Centro de Estudios y Tecnológico del Agua (C.E.T.A.). En la Tabla 4 se muestran los resultados conseguidos por esta técnica.

Q Entrada [%]		Q prototipo [m <sup>3</sup> /s]	Q [m <sup>3</sup> /s] - Porcentaje [%] - Mecanismo de Trabajo																Q Aforado [m <sup>3</sup> /s]	¿Vierte por Dique Fijo?		
río Grande	río Reyes		CM1			CM2			DM1			DM2			DM3			DM4				
100%	0%	600	0	0%	/	0	0%	/	143	22%	L	148	23%	L	176	28%	L	170	27%	L	637	NO
100%	0%	400	0	0%	/	0	0%	/	128	26%	L	114	23%	L	123	25%	L	125	25%	L	490	
65%	35%	3200	0	0%	/	0	0%	/	296	20%	P	427	29%	P	409	27%	P	365	24%	P	1497	SI
65%	35%	1800	0	0%	/	0	0%	/	248	22%	P	392	34%	P	322	28%	P	180	16%	P	1143	
100%	0%	1400	0	0%	/	0	0%	/	268	25%	P	286	26%	P	307	28%	P	231	21%	P	1091	
65%	35%	4200	144	12%	P	75	6%	P	170	14%	P	314	26%	P	241	20%	P	275	23%	P	1219	SI

Ensayos realizados con **Fondo Fijo**

Estructura Cerrada	/
Estructura trabaja Libre	L
Estructura trabaja a Presio	P

Tabla 4: Resultados obtenidos por la técnica PTV

### 2.4.2 Resultados Tubo Pitot

Estos resultados fueron presentados por Vaschalde (2013) en su trabajo “Caracterización hidrodinámica del flujo de ingreso a las obras de evacuación de excedentes de la Presa Los Molinos, Jujuy”, realizado en Centro de Estudios y Tecnológico del Agua (C.E.T.A.). En la Tabla 5 se muestran los resultados conseguidos por esta técnica.

Q Entrada [%]		Q prototipo [m <sup>3</sup> /s]	Q [m <sup>3</sup> /s] - Porcentaje [%] - Mecanismo de Trabajo																Q Aforado [m <sup>3</sup> /s]	¿Vierte por Dique Fijo?		
río Grande	río Reyes		CM1			CM2			DM1			DM2			DM3			DM4				
100%	0%	540	0	0%	/	0	0%	/	131	27%	P	116	24%	P	126	26%	P	113	23%	P	485	NO
100%	0%	582	0	0%	/	0	0%	/	139	26%	P	139	26%	P	127	24%	P	126	24%	P	531	
100%	0%	588	0	0%	/	0	0%	/	134	28%	P	116	24%	P	126	27%	P	98	21%	P	474	
100%	0%	886	138	14%	P	130	13%	P	173	17%	P	192	19%	P	192	19%	P	177	18%	P	1002	SI
0%	100%	525	88	15%	P	88	15%	P	94	16%	L	102	17%	L	109	18%	L	109	18%	L	590	NO
65%	35%	528	95	15%	P	93	15%	P	108	17%	L	104	17%	L	112	18%	L	111	18%	L	622	
100%	0%	643	104	15%	P	95	14%	P	122	17%	L	127	18%	L	132	19%	L	117	17%	L	699	

Ensayos realizados con **Fondo Fijo**

Estructura Cerrada	/
Estructura trabaja Libre	L
Estructura trabaja a Presio	P

Tabla 5: Resultados obtenidos por la técnica Tubo de Pitot

### 2.4.3 Resultados Medición Volumétrica

Estos resultados fueron conseguidos por técnica experimental desarrollada en este trabajo. En la Tabla 6 se muestran los resultados conseguidos por esta técnica.

Q Entrada [%]		Q prototipo [m <sup>3</sup> /s]	Q [m <sup>3</sup> /s] - Porcentaje [%] - Mecanismo de Trabajo																Q Aforado [m <sup>3</sup> /s]	¿Vierte por Dique Fijo?		
río Grande	río Reyes		CM1			CM2			DM1			DM2			DM3			DM4				
65%	35%	598	0	0%	/	0	0%	/	170	28%	P	158	26%	P	151	25%	P	137	22%	P	616	NO
100%	0%	599	0	0%	/	0	0%	/	160	26%	P	170	28%	P	155	25%	P	130	21%	P	615	
100%	0%	414	0	0%	/	0	0%	/	143	37%	L	147	37%	L	101	26%	L	0	0%	/	391	
100%	0%	302	0	0%	/	0	0%	/	135	49%	P	144	51%	L	0	0%	/	0	0%	/	279	
65%	35%	598	92	16%	P	77	13%	P	101	17%	L	114	19%	L	102	17%	L	101	17%	L	587	NO
65%	35%	665	97	15%	P	67	10%	P	117	18%	L	125	19%	L	118	18%	L	127	20%	L	651	
65%	35%	691	111	17%	P	56	8%	P	127	19%	L	120	18%	L	117	18%	L	127	19%	L	658	
65%	35%	756	111	16%	P	76	11%	P	137	19%	L	135	19%	L	118	17%	L	131	18%	L	708	
65%	35%	761	106	15%	P	76	11%	P	128	18%	L	132	19%	L	121	17%	L	132	19%	L	695	

Ensayos realizados con **Fondo Móvil**

Estructura Cerrada	/
Estructura trabaja Libre	L
Estructura trabaja a Presio	P

Tabla 6: Resultados obtenidos por la técnica Medición Volumétrica

## 2.5 Comparación de Resultados

Para poder realizar comparaciones válidas de los resultados obtenidos por los diferentes métodos detallados anteriormente, debemos encontrar similitudes que nos permitan contrastar sus resultados. Para ello se compararan los ensayos que tengan similitud en las siguientes variables:

### 1. Operación de Compuertas

Con las diferentes operaciones de compuertas, se busca comparar el porcentaje de erogación de caudal de cada estructura de descarga obtenidos con las distintas técnicas de medición. Las operaciones de compuertas presentadas son:

- Los Canales Moderadores permanecen cerrados y las compuertas del Dique Móvil abiertas.
- Todas las compuertas de las estructuras de descarga se encuentran abiertas (Canal Moderador y Dique Móvil).

### 2. Condiciones Hidráulicas

Se refiere si el caudal es lo suficientemente grande para verter o no por Dique Fijo. Cuando no vierta por Dique Fijo se puede calcular y comparar el grado de error que posee cada técnica de medición contrastando el caudal aforado con cada una con el medido al ingreso al modelo con los vertederos triangulares existentes. No se puede calcular los casos en que vierte por Dique Fijo ya que el caudal aforado con la técnica no será el mismo que el ingresante al modelo.

Para poder medir el grado de error, en primer lugar se calcula la diferencia entre el caudal aforado por la técnica y el medido al ingreso al modelo en los vertederos:

$$\Delta = |Q_p - Q_a| \quad \text{[Ecuación 13]}$$

Donde,

$Q_p$  = Caudal prototipo medido en el vertedero al ingreso al modelo

$Q_a$  = Caudal aforado con la técnica experimental

Luego, el error se cuantifica como:

$$Error = \Delta \times \frac{100}{\max(Q_p, Q_a)} \quad [Ecuación 14]$$

De las tablas presentadas anteriormente en la sección 2.4, se comparan los resultados obtenidos en los siguientes gráficos:

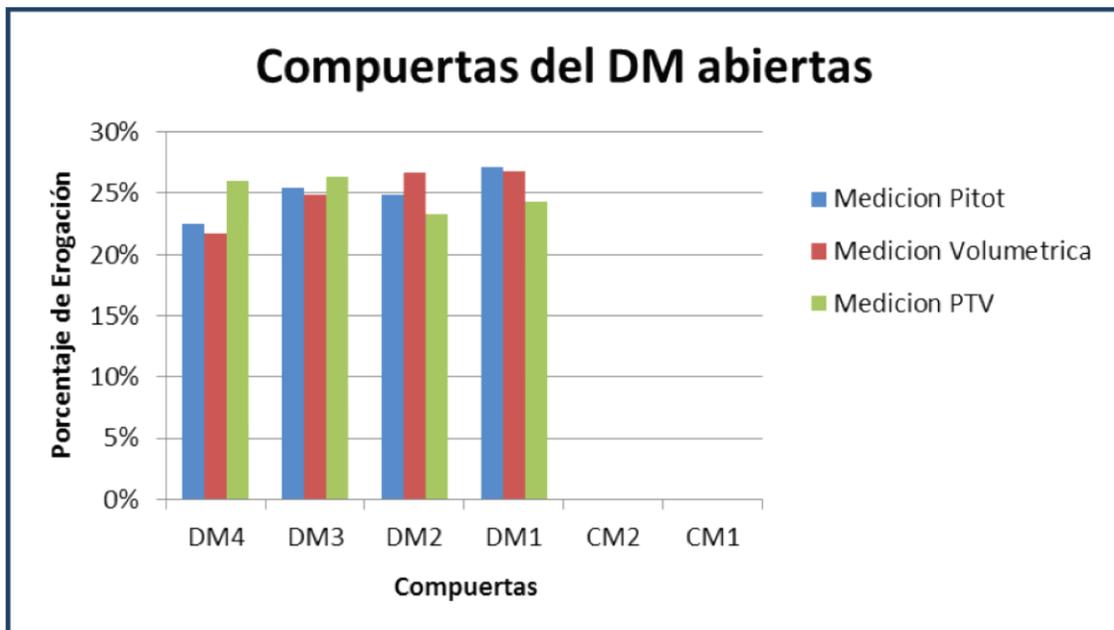
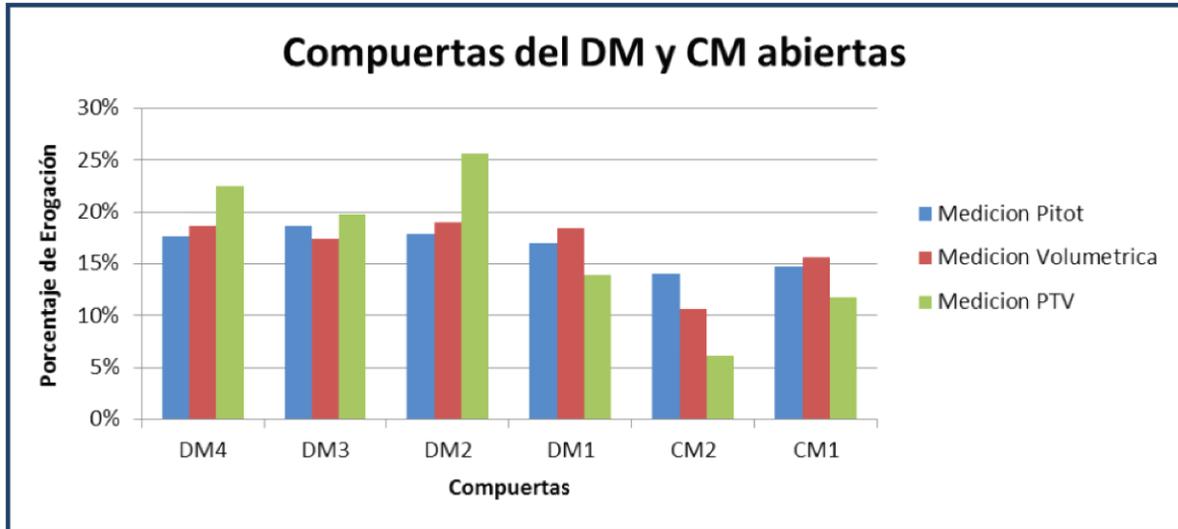


Gráfico 1: Porcentaje de erogación de cada compuerta del Dique Móvil, para las distintas Técnicas de Medición utilizadas



**Gráfico 2: Porcentaje de erogación de cada compuerta de las estructuras de evacuación, para las distintas Técnicas de Medición utilizadas**

En los gráficos, se puede observar el porcentaje de caudal erogado de cada compuerta por las distintas técnicas experimentales para cada operación.

La compuerta más eficiente, es decir la compuerta de mayor porcentaje de erogación, para cada técnica, considerando las operaciones de compuertas, es:

- Compuertas del Dique Móvil abiertas y Canales Moderadores cerrados:
  - Medición por Pitot: Compuerta DM1.
  - Medición Volumétrica: Compuerta DM1 o DM2.
  - Medición por PTV: Compuerta DM3 o DM4.
  
- Compuertas del Dique Móvil abiertas y Canales Moderadores abiertos:
  - Medición por Pitot: Compuerta DM3.
  - Medición Volumétrica: Compuerta DM2.
  - Medición por PTV: Compuerta DM2.

Para saber cuál de los métodos es el más exacto y entonces concluir cual es el porcentaje de erogación mejor calculado para cada estructura de descarga, se utilizará el grado de error de cada técnica experimental. Hay que considerar las condiciones hidráulicas analizadas y solo aquellos datos que posean un caudal de prototipo que no vierta por Dique Fijo se pueden comparar.

A continuación se presenta una tabla resumen:

Técnica	Operación utilizada	Q Entrada [%]		Q Prototipo [m³/s]	Q [m³/s] - Porcentaje Erogación [%]												Q Aforado [m³/s]	Δ [m³/s]	Error [%]
		río Grande	río Reyes		CM1	CM2	DM1	DM2	DM3	DM4									
Pitot	Compuertas del DM abiertas	100%	0%	540	0	0%	0	0%	131	27%	116	24%	126	26%	113	23%	485	56	10%
		100%	0%	582	0	0%	0	0%	139	26%	139	26%	127	24%	126	24%	531	51	9%
		100%	0%	588	0	0%	0	0%	134	28%	116	24%	126	27%	98	21%	474	114	19%
	Compuertas del DM y CM abiertas	0%	100%	525	88	15%	88	15%	94	16%	102	17%	109	18%	109	18%	590	65	11%
		65%	35%	528	95	15%	93	15%	108	17%	104	17%	112	18%	111	18%	622	94	15%
		100%	0%	643	104	15%	95	14%	122	17%	127	18%	132	19%	117	17%	699	56	8%
PTV	Compuertas del DM abiertas	100%	0%	600	0	0%	0	0%	143	22%	148	23%	176	28%	170	27%	637	37	6%
		100%	0%	400	0	0%	0	0%	128	26%	114	23%	123	25%	125	25%	490	90	18%
Volumétrica	Compuertas del DM abiertas	65%	35%	598	0	0%	0	0%	170	28%	158	26%	151	25%	137	22%	616	18	3%
		100%	0%	599	0	0%	0	0%	160	26%	170	28%	155	25%	130	21%	615	16	3%
	Compuertas del DM y CM abiertas	65%	35%	598	92	16%	77	13%	101	17%	114	19%	102	17%	101	17%	587	11	2%
		65%	35%	665	97	15%	67	10%	117	18%	125	19%	118	18%	127	20%	651	14	2%
		65%	35%	691	111	17%	56	8%	127	19%	120	18%	117	18%	127	19%	658	33	5%
		65%	35%	756	111	16%	76	11%	137	19%	135	19%	118	17%	131	18%	708	48	6%
		65%	35%	761	106	15%	76	11%	128	18%	132	19%	121	17%	132	19%	695	66	9%

Tabla 7: Resumen de los Métodos utilizados

En la tabla anterior se puede apreciar que el porcentaje de error de los distintos métodos varía marcadamente, obteniéndose el menor error con la Medición Volumétrica.

Las causas de este grado de error pueden ser varias, de las cuales podemos destacar los siguientes grupos de errores:

- ❖ Propios de la Técnica Experimental, debido a factores como:
  - Elementos Utilizados.
  - Operativos.
  - Calibración Instrumental.
  - Medición.

- Coeficientes de Calibración.
- ❖ Propios del Modelo Físico, debido a factores como:
  - Perdidas por Infiltración.
  - Falta de Mantenimiento.
  - Grado de Escala.

En el caso de la técnica experimental “**Medición Volumétrica**”, al ser un método del cálculo directo sus errores disminuyen, ya que no utiliza coeficientes para su determinación y no es necesario calibrar ningún instrumento a diferencia de los métodos por Pitot y PTV. Por ello, que los factores que influyen al resultado son netamente operativos y/o propios del modelo y consigue que el grado de error sea menor.

Podemos concluir que esta técnica es la que mejor se ajusta para medición de caudales en el Modelo Físico y nos permite conocer qué porcentaje de caudal evacua cada estructura de descarga para las diferentes operaciones de compuertas.

# CAPÍTULO 3:

*“Estimación de curvas de capacidad  
hidráulica de las estructuras de  
descarga”*

### 3 Estimación de curvas de capacidad hidráulica de las estructuras de descarga

#### 3.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es verificar experimentalmente en el modelo físico, la capacidad de evacuación de las obras de descarga que componen la presa Los Molinos con las modificaciones de proyecto.

Se determinan para cada estructura las curvas que relacionan el nivel o cota de la superficie libre de flujo con el caudal evacuado de cada una de las estructuras. Estos resultados se contrastan finalmente con las curvas determinadas previamente en el proyecto (Halcrow, 2009) y las obtenidas por Quiroga (2013). La presa tiene tres tipos de obras de evacuación. Un vertedero (o Dique) Fijo, un vertedero (o Dique) Móvil y un Canal Moderador (Figura 28).

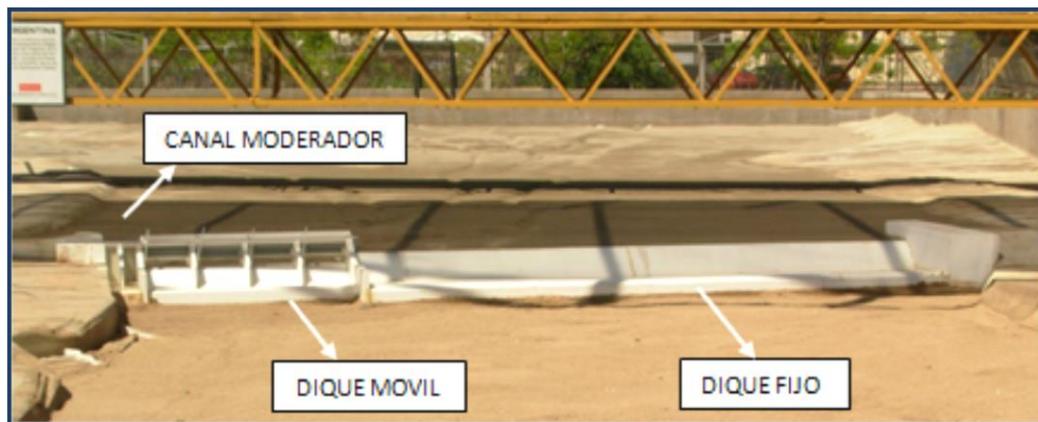


Figura 28: Modelo Físico Presa Los Molinos. Dique fijo, Dique Móvil y Canal Moderador

### 3.2 Resultados

En la tabla del apartado de 2.4.3 “Resultados Medición Volumétrica” se presentan los resultados obtenidos para todas las condiciones experimentales ensayadas por la técnica **Medición Volumétrica** que incluyen; diferentes caudales estudiados, porcentaje de distribución del caudal de entrada por los ríos Grande y Reyes, caudales aforados y porcentajes de cada compuerta como así también el mecanismo de trabajo de las mismas, es decir si estaban cerradas o trabajaban a presión o libres.

En cada ensayo realizado, para un cierto caudal de entrada y configuración de compuertas, se medía el caudal “ $Q$ ” que erogaba cada compuerta con la técnica experimental utilizada explicada anteriormente, y también se registraba la altura “ $H$ ” que alcanzaba la superficie del agua en ese instante para las condiciones dadas. El Modelo Físico cuenta con escalas graduadas al milímetro, ubicadas en las márgenes derecha e izquierda de cada obra de descarga (Figura 29). De esta manera, se cuenta con dos escalas en el Canal Moderador (ECMD y ECMI), dos escalas en el Dique Móvil (EDMD y EDMII) y dos escalas en el Dique Fijo (EDFD y EDFI). Mediante estas escalas se obtenían las alturas correspondientes.

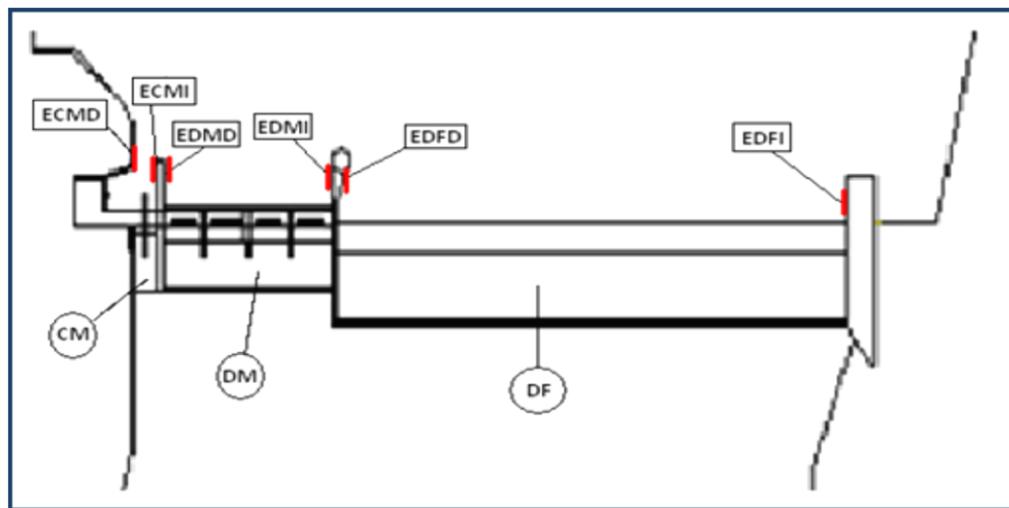
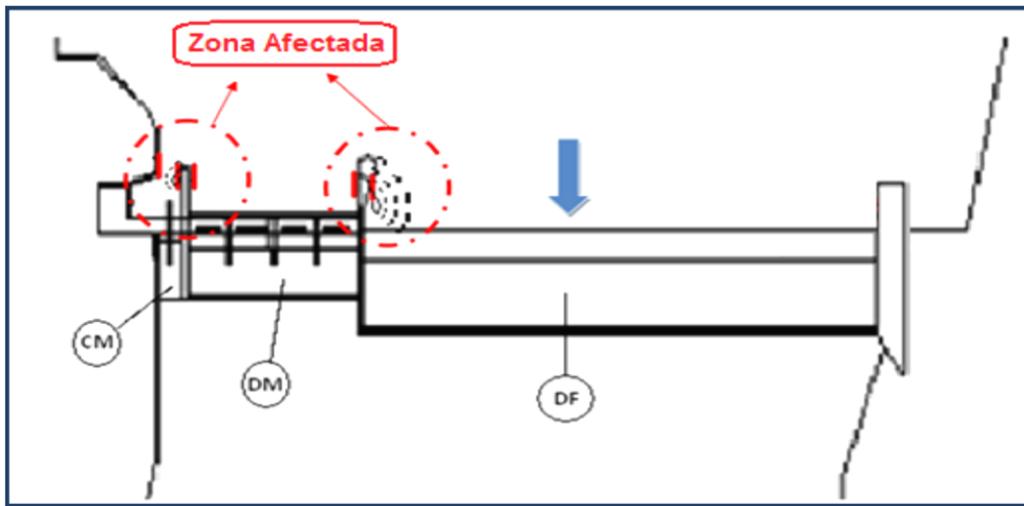


Figura 29: Esquema que indica localizaciones de escalas graduadas

De esta forma se obtenían los valores  $H - Q$  de cada ensayo realizado.

Durante los experimentos se pudo observar, que para algunas condiciones de flujo ensayadas se produjeron separaciones del flujo en las zonas donde están emplazadas las escalas, con lo cual las lecturas tomadas estaban afectadas por este efecto, el cual se volvía más importante a medida que crecía en caudal. Este efecto produce que las lecturas de las escalas afectadas no sean representativas de la carga sobre la estructura de descarga, se observó principalmente en la margen izquierda del canal moderador. Un esquema de la situación observada se presenta en la Figura 30.



*Figura 30: Zonas en donde se produce separación del flujo y su efecto sobre las escalas a Los Molinos.*

### 3.3 Análisis de los resultados

Con los valores obtenidos en los ensayos, se elaboran las curvas determinadas experimentalmente que relacionan la carga H (cota de superficie libre) con el caudal evacuado (Q) para cada una de las estructuras, según operación de compuertas utilizadas.

#### 3.3.1 Dique Fijo

No se procedió a medir el Dique Fijo con la técnica experimental desarrollada, ya que nos fue imposible con el instrumental utilizado, además no formaba objetivo de estudio. Es por eso que en los ensayos se trabajó con la consideración necesaria de que no vierta caudal alguno sobre el Dique Fijo, para así poder comparar el caudal aforado con el caudal introducido y tener un grado de error para comparar.

En el trabajo “Determinación experimental, en un modelo físico, de la capacidad hidráulica de las obras de evacuación de la presa Los Molinos, Jujuy” realizado por Quiroga, 2013; se construyó la curva H – Q del Dique Fijo, en el cual para calcular el caudal erogado por el Dique Fijo, se dejaba transcurrir el flujo por el modelo y se registraban las lecturas en la escala ubicada en la margen derecha del Dique Móvil, por lo explicado anteriormente. Se utilizó una ecuación experimental de tal forma:

$$Q_{DF} \left( \frac{m^3}{s} \right) = 311,69 \cdot \Delta H_{EDMD} (m)^{1,688} \quad [Ecuación 15]$$

Siendo  $\Delta H_{EDMD}$  la diferencia entre la lectura en la escala graduada ubicada en la margen derecha del Dique Móvil (ECMD) y la cota de labio del Dique Fijo ( $H_{ODF}$ ):

$$\Delta H_{EDMD} = H_{EDMD} (m) - H_{ODF} (m) \quad [Ecuación 16]$$

En el Gráfico 3 se puede apreciar los resultados obtenidos de manera experimental por Quiroga (2013) con la curva H – Q definida durante el proyecto para el Dique Fijo (Halcrow, 2009).

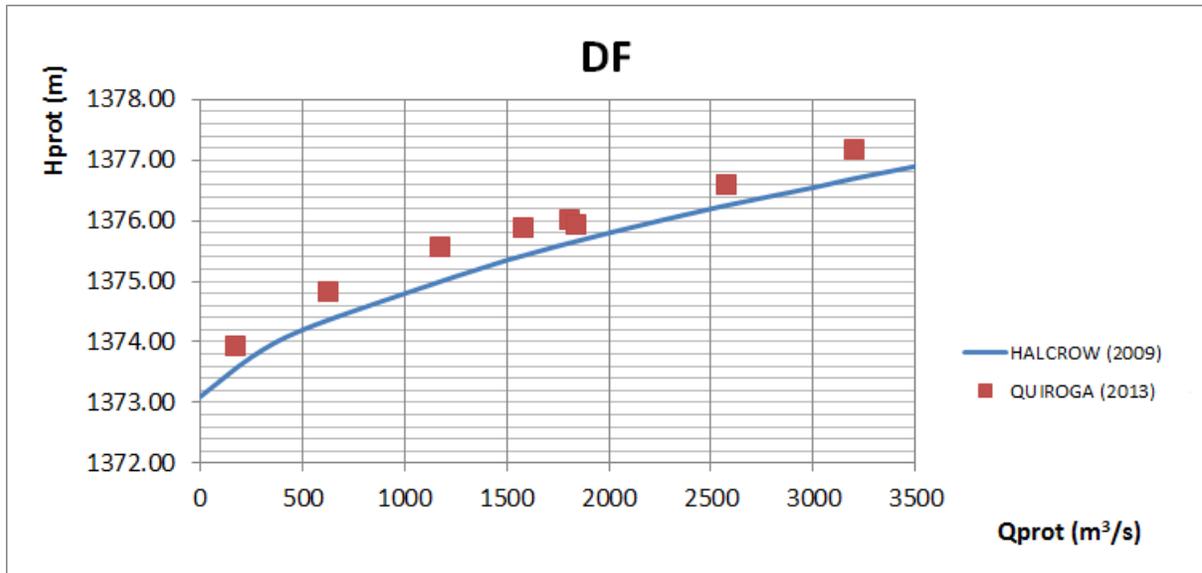


Gráfico 3: Curvas H – Q obtenidas experimentalmente (Quiroga, 2013)

### 3.3.2 Dique Móvil

Para la caracterización del Dique Móvil, se procedió a medir el caudal erogado de cada compuerta con la técnica experimental desarrollada en este trabajo y también se registraba las lecturas en las escalas emplazadas. De esta manera, se presentan a continuación los gráficos de curvas H – Q, realizados con lecturas en escalas emplazadas en margen izquierda y derecha del Dique Móvil, de acuerdo con la operación de compuertas de Canal Moderador y Dique Móvil abiertos:

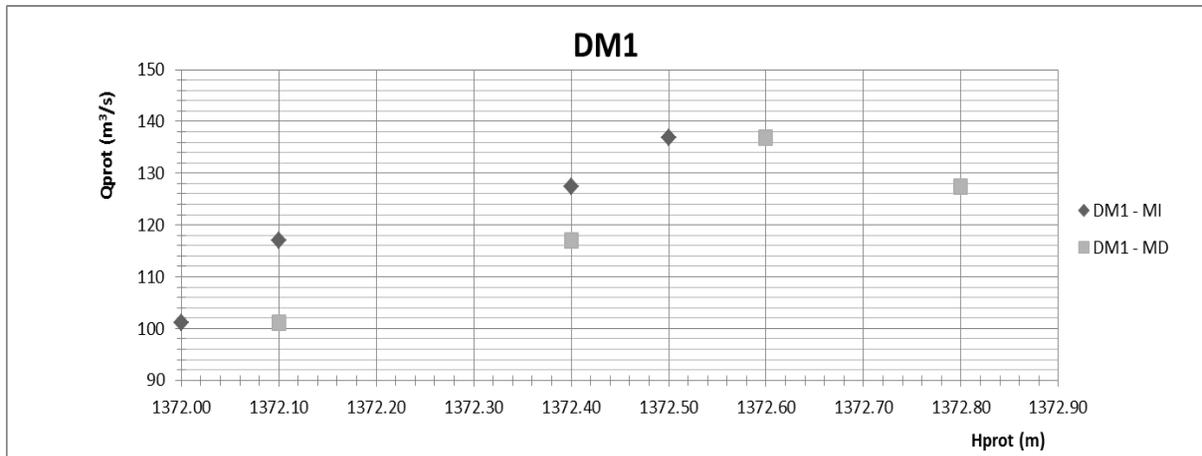


Gráfico 4: H-Q para DM1 con lecturas en escalas emplazadas en margen izquierda y derecha del Dique Móvil

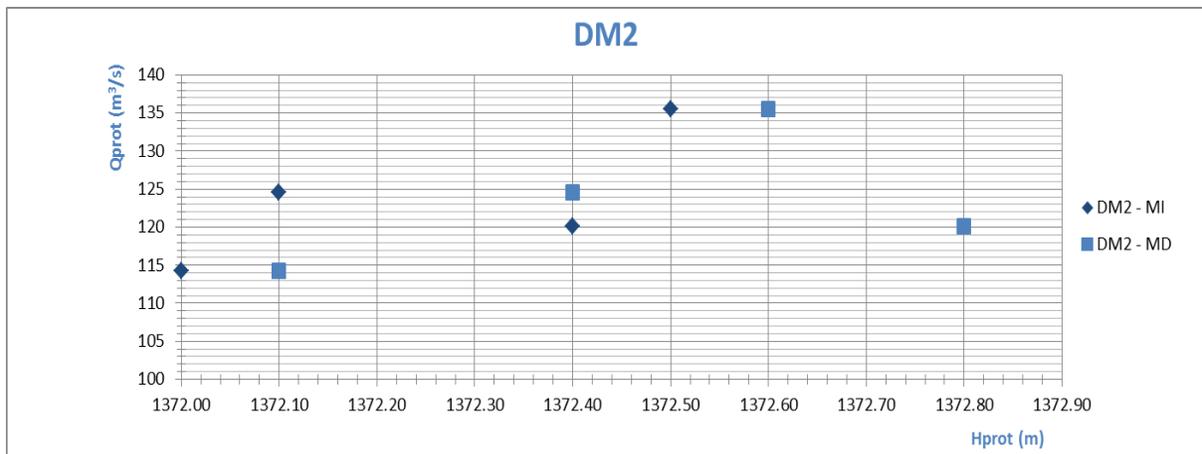


Gráfico 5: H-Q para DM2 con lecturas en escalas emplazadas en margen izquierda y derecha del Dique Móvil

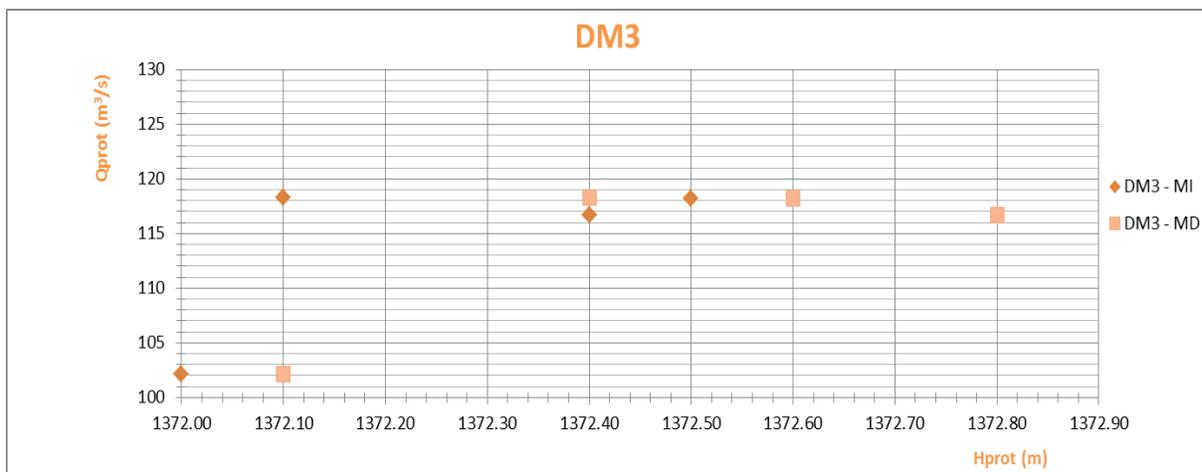


Gráfico 6: H-Q para DM3 con lecturas en escalas emplazadas en margen izquierda y derecha del Dique Móvil

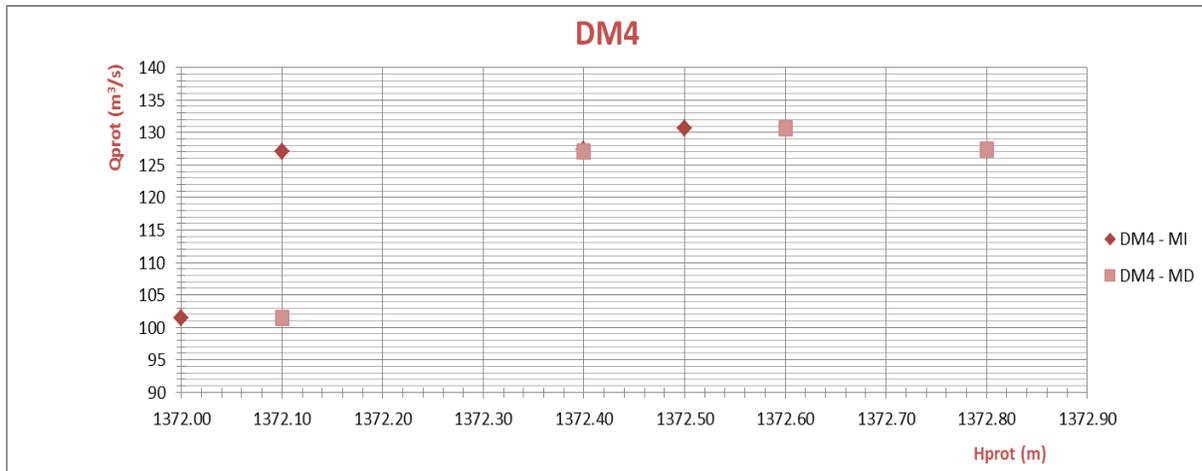


Gráfico 7: H-Q para DM4 con lecturas en escalas emplazadas en margen izquierda y derecha del Dique Móvil

Los resultados expuestos en los gráficos corresponden a la condición de las compuertas del Canal Moderador y Dique Móvil abiertas, en el cual el caudal experimentado fue variando entre  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $750 \text{ m}^3/\text{s}$  con saltos controlados aproximados de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Además en estas graficas hay diferencias en las lecturas de H según se trate margen derecha y margen izquierda, por ello se procede a unificar los datos mediante una variación lineal entre la margen derecha (MD) y la margen izquierda (MI) para cada una de las compuertas tomando como punto de registro el centro de cada compuerta. Entonces los gráficos resultan:

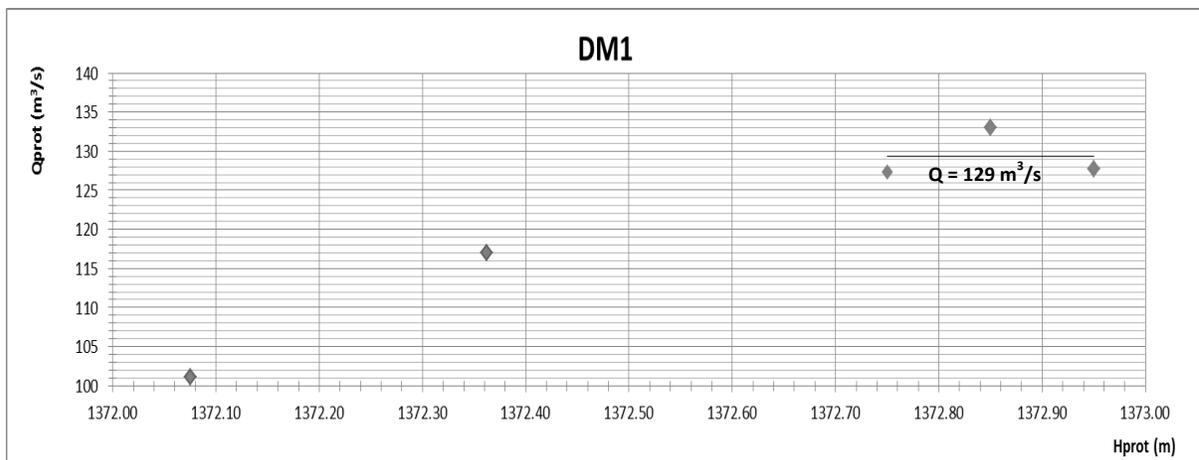


Gráfico 8: H-Q para DM1 utilizando H estimado en el centro de la estructura

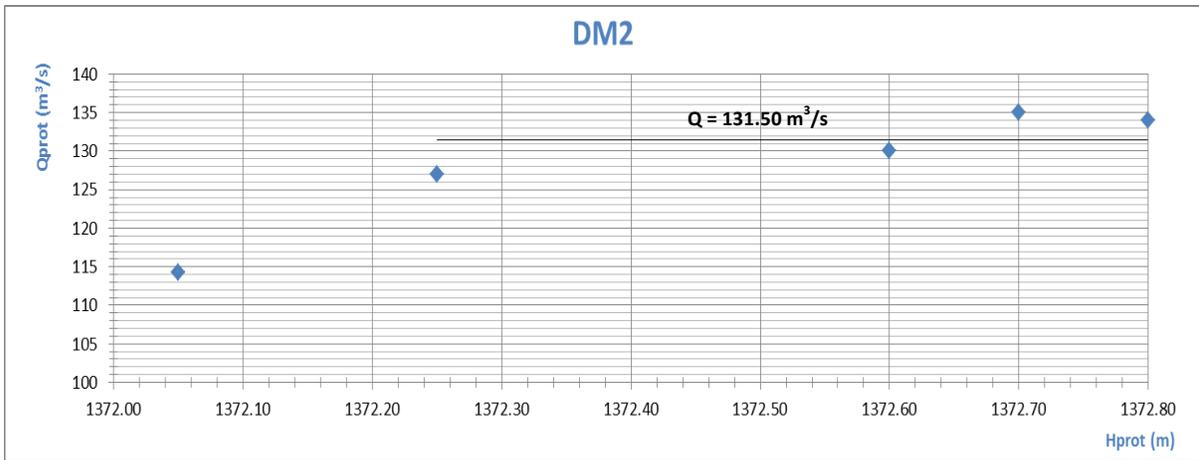


Gráfico 9: H-Q para DM2 utilizando H estimado en el centro de la estructura

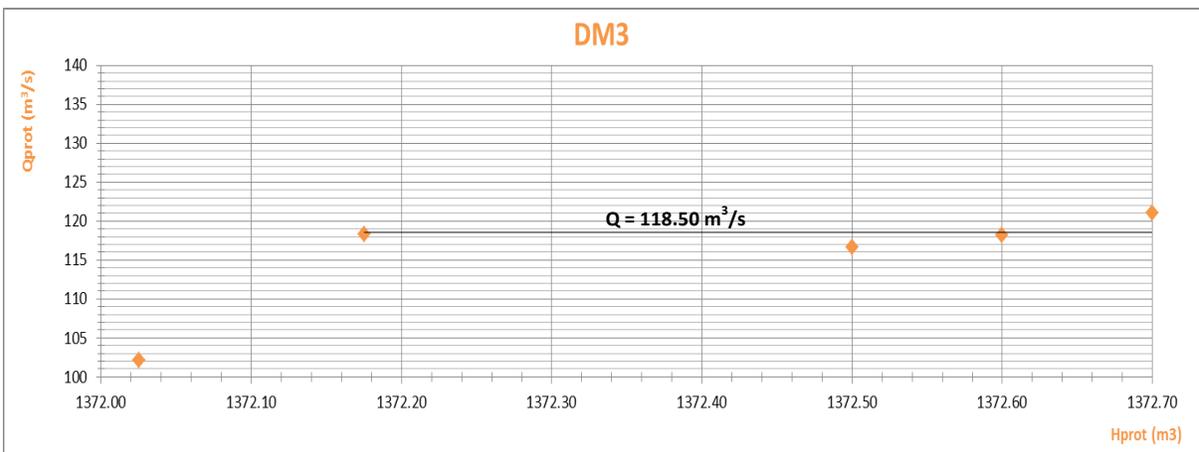


Gráfico 10: H-Q para DM3 utilizando H estimado en el centro de la estructura

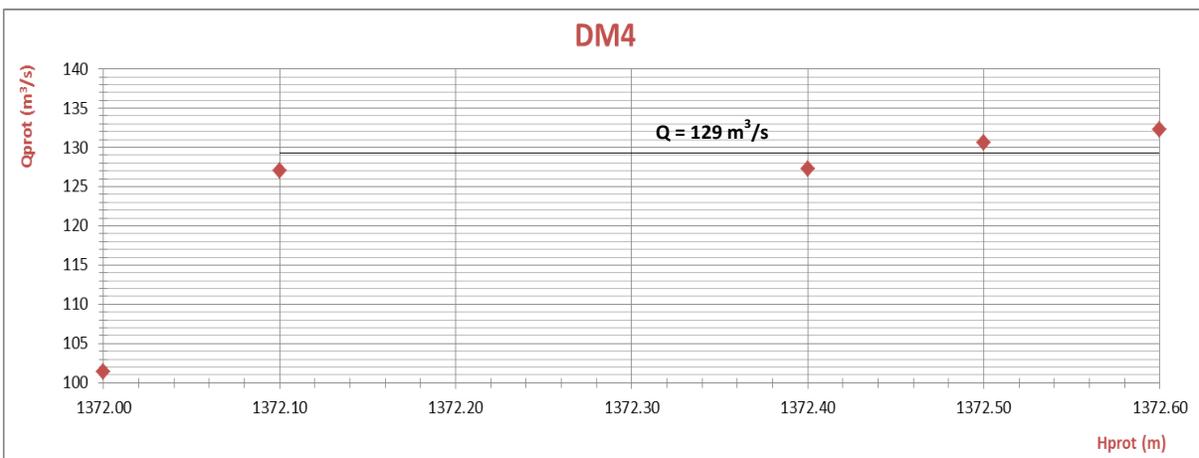


Gráfico 11: H-Q para DM4 utilizando H estimado en el centro de la estructura

Ya en estos gráficos se puede observar que una vez que se alcanza una determinada altura aguas arriba de la estructura de descarga, el caudal erogado por la misma ya no se incrementa y permanece constante. Esto se debe principalmente a que una vez que la compuerta se ahoga y trabaja a presión, un incremento de H ya no produce un incremento significativo de Q y el flujo excedente empieza a verter por el Dique Fijo.

Quiroga (2013), al igual que para el Dique Fijo, realizó la curva del Dique Móvil (las 4 compuertas trabajando abiertas), en el cual determinó los caudales erogados por él a partir de la diferencia entre el caudal total escurriendo por el modelo y el caudal que descarga el Dique Fijo (obtenidos a partir de la curva H – Q del Dique Fijo, para las lecturas tomadas durante el ensayo en la toma limnimétrica TL). Los caudales bajos (hasta 600 m<sup>3</sup>/s) son erogados en su totalidad por el Dique Móvil. Seleccionó a la lectura en la escala emplazada en la margen derecha del Dique Móvil como representativa. Luego realizó el ajuste de una relación potencial entre el caudal erogado por el Dique Móvil  $Q_{DM}$  (m<sup>3</sup>/s) y la carga  $\Delta H_{DM}$  (m).

La variable  $\Delta H_{DM}$  para el dique móvil se obtiene de hacer la diferencia entre la lectura tomada en la escala de la margen derecha del dique móvil ( $H_{EDMD}$ ) y la cota del labio del dique móvil en su entrada ( $H_{ODM}$ ):

$$\Delta H_{DM} = H_{EDMD}(m) - H_{ODM} \quad \text{[Ecuación 17]}$$

La función potencial ajustada es:

$$Q_{DM} \left( m^3/s \right) = 97,34 \cdot \Delta H_{DM} (m)^{1,372} \quad \text{[Ecuación 18]}$$

Por último, se comparan los valores obtenidos experimentalmente por Medición Volumétrica con las curvas H–Q; según proyecto (Halcrow) y según Quiroga de (Grafico 12). Con la técnica experimental (Medición Volumétrica), se pudo llegar al valor que se muestra en el siguiente grafico (triángulo verde). Para que sean representativos los datos, deben ser exclusivamente del Dique Móvil, es decir que la operación de compuerta sea tal que el flujo pase solamente por él. Por eso hay un solo valor representado. Este valor se obtuvo al ensayar con un caudal de 600 m<sup>3</sup>/s de la misma manera ya explicada.

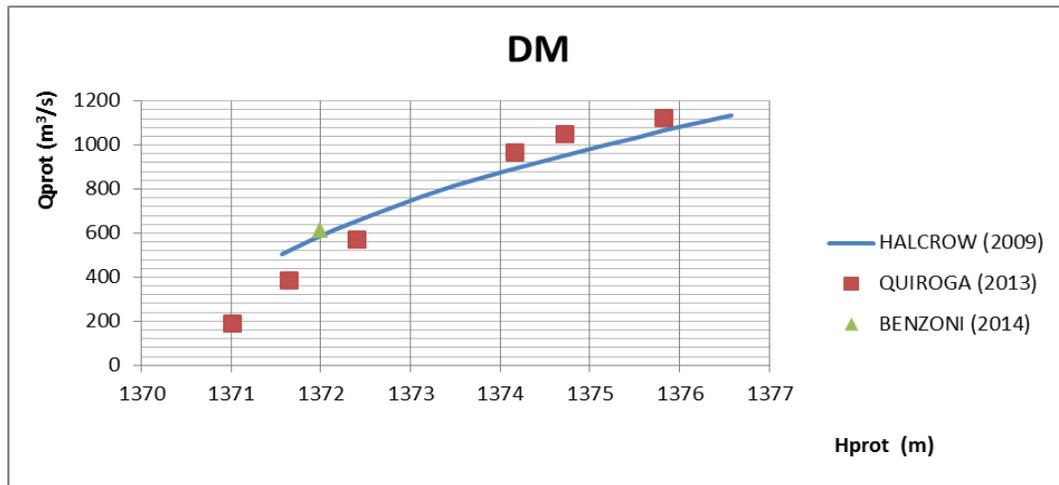


Gráfico 12: H-Q del Dique Móvil

Se observa un acuerdo aceptable entre las curvas, Benzoni (2014) y Halcrow (2009) a pesar de tratarse de un solo punto. Habría que completar la misma para diferentes caudales. Cabe aclarar que para un caudal mayor a 630 m<sup>3</sup>/s (solamente con Dique Móvil abierto), el Dique Fijo comienza a verter.

### 3.3.3 Canal moderador

A igual que el Dique Móvil, para el Canal Moderador se obtienen las curvas H – Q, que representan el caudal erogado por cada una de sus compuertas, mediante la Medición Volumétrica, en función de las lecturas en las escalas emplazadas en la margen izquierda (MI) y margen derecha (MD) del Canal Moderador. Aquí se realizaron diferentes ensayos pero solo con el Canal Moderador abierto, cada compuerta por separado. Los datos se presentan a continuación.

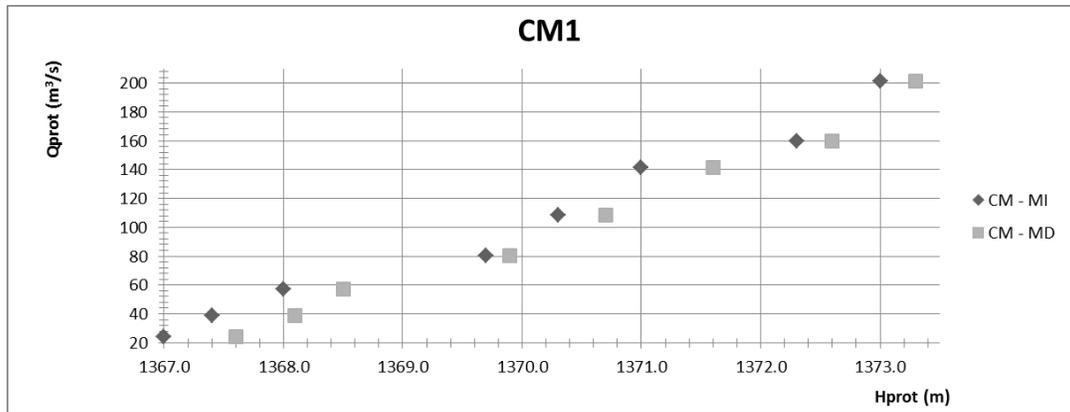


Gráfico 13: H-Q para CM1 con lecturas en escalas emplazadas en margen izquierda y derecha del Canal Moderador

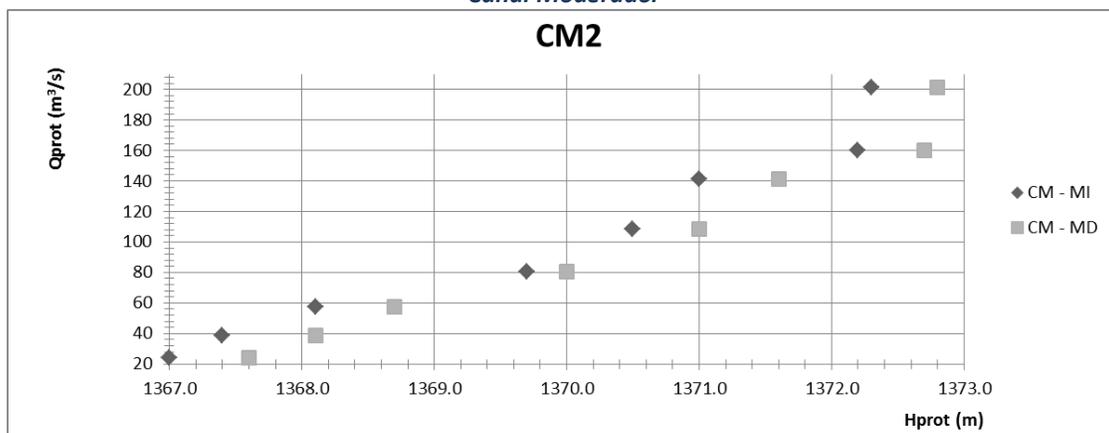


Gráfico 14: H-Q para CM2 con lecturas en escalas emplazadas en margen izquierda y derecha del Canal Moderador

Al realizar el ensayo, se observó que la escala graduada ubicada en la margen izquierda del canal moderador presentó lecturas influenciadas por la separación del flujo en la pared izquierda (donde está ubicada una de las escalas), por lo que se decidió tomar la lectura de margen derecha de canal moderador como la de referencia.

Por otro lado, para comparar los resultados obtenidos con la curva de Halcrow y la de Quiroga se calculó el caudal erogado por los 2 descargadores del canal moderador trabajando en conjunto y se lo relacionó con la escala ubicada en la margen derecha del dique móvil. Esto último se muestra a continuación:

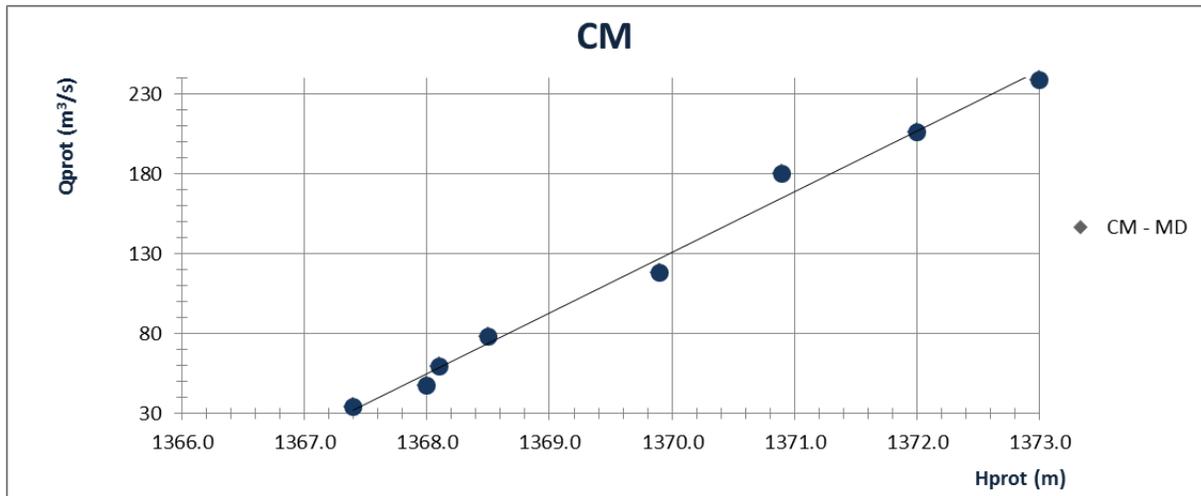


Gráfico 15: H-Q del Canal Moderador con lecturas en escalas emplazada en margen derecha del Dique Móvil

En el gráfico se puede observar que a medida que crece H el caudal empieza a aumentar con menor variación, llegando a un punto en el cual las compuertas del Canal Moderador no pueden erogar más caudal y empieza a verter por Dique Fijo, debido a que el Dique Móvil está cerrado. Entonces se llega a la capacidad máxima de erogación del Canal Moderador, con un valor aproximado de 210 m<sup>3</sup>/s.

Además, la línea de tendencia lineal muestra una buena correlación de los datos, arrojando un erro cuadrático aceptable de R<sup>2</sup>=0,9902.

La función lineal es de la siguiente forma:

$$Q_{PROT} \left( \frac{m^3}{s} \right) = 37,885 \cdot \Delta H_{PROT} (m) - 58,591 \quad [Ecuación 19]$$

$$\Delta H_{DM} = H_{MDDM}(m) - H_{OCM} \quad [Ecuación 20]$$

Una vez seleccionada la lectura en la margen derecha del Dique Móvil como representativa del flujo de aproximación al Canal Moderador, y utilizando el grafico anterior, se contrastan los valores obtenidos experimentalmente, con las curvas H – Q obtenidas según proyecto (Halcrow) y con la curva obtenida por Quiroga, en el grafico siguiente.

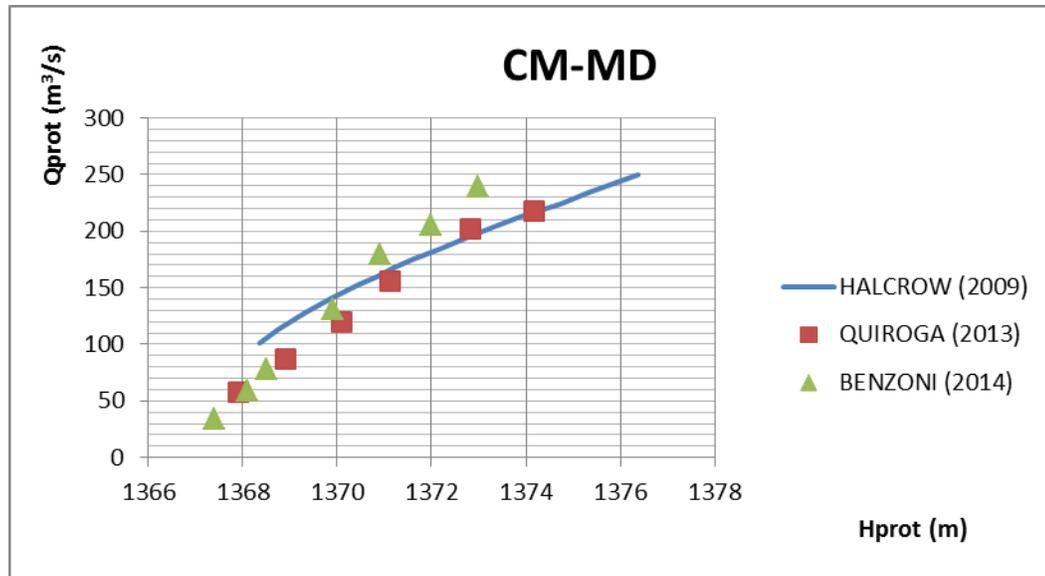


Gráfico 16: H-Q del Canal Moderador

Se observa acuerdo aceptable entre los grupos de datos Benzoni (2014) y Halcrow (2009), con una diferencia promedio aproximadamente de 25 m<sup>3</sup>/s entre los puntos.

Para caudales menores se observa una mejor correlación con la curva Quiroga (2013), ya que para un cierto rango de descarga, la técnica utilizada posee menor grado de error.

# CAPÍTULO 4:

*“Estimación de curvas de despegue en el trampolín del salto de esquí del Canal Moderador”*

## 4 Estimación de curvas de despegue en el trampolín del salto de esquí del Canal Moderador.

### 4.1 Introducción

Las erosiones locales que se generan por las descargas del Canal Moderador, pone en riegos a los cimientos de la estructura. Cuando el caudal es muy pequeño, las dimensiones del vertedero emplazado no son suficientes para poder producir el despegue deseado, ocasionando la erosión a pie de la estructura, como se observa en la Figura 7 de la sección 1.2.

Entonces el objetivo de este capítulo es verificar experimentalmente en el modelo físico, el salto de esquí del canal moderador, para poder obtener el caudal necesario de despegue y así no poner en riesgo los cimientos de la estructura por erosiones locales en la zona descripta.

### 4.2 Procedimiento

En el capítulo anterior se construyeron las curvas  $H - Q$  para el Dique Fijo, Dique Móvil y Canal Moderador. Además se obtuvo la capacidad máxima de erogación de las estructuras de evacuación (Dique Móvil y Canal Moderador). Con estas conclusiones es posible definir el caudal máximo posible que puede evacuar el Dique Móvil y el Canal Moderador.

Conociendo estos límites máximos, se procedió a medir en el Canal Moderador la distancia horizontal “ $D$ ” que el alcanza el flujo cuando se produce el despegue en el salto de esquí. Se hizo variar el caudal hasta el límite máximo y se obtuvo un gráfico  $D - Q$ , con el objetivo de conseguir el caudal necesario para iniciar el despegue y evitar la erosión local aguas abajo del Canal Moderador que pongan en riesgo los cimientos de la estructura.

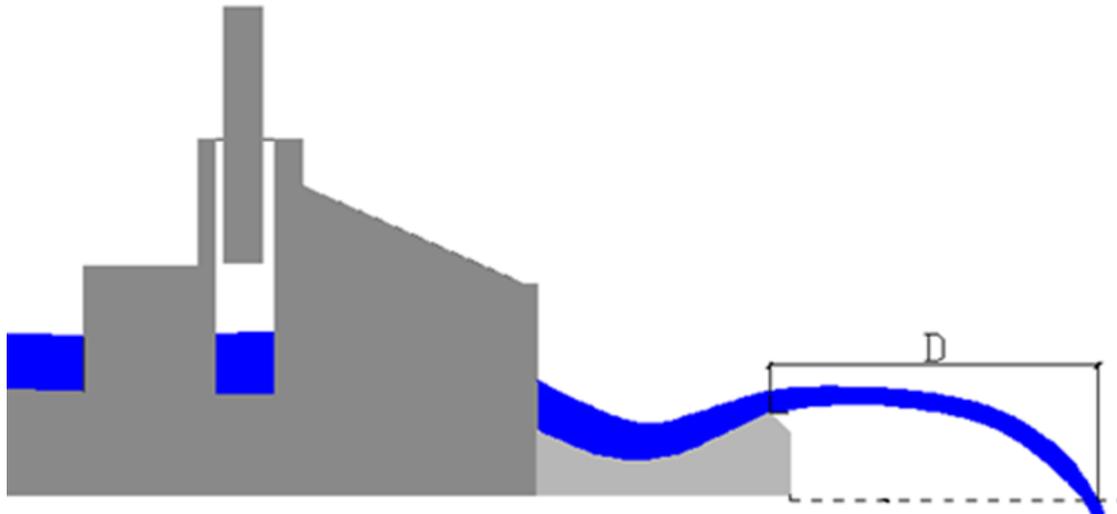


Figura 31: Distancia en horizontal “D” que el alcanza el flujo en el salto de esquí en Canal Moderador

### 4.3 Resultados

Con solamente el Canal Moderador abierto (tanto CM1 como CM2) y una variación del caudal entre 0 m<sup>3</sup>/s y 240 m<sup>3</sup>/s se midió la distancia D, obteniéndose los siguientes resultados:

- Canal Moderador Abierto:

CM1 + CM2			
Q Mod (l/s)	Q Prot (m <sup>3</sup> /s)	D Mod (m)	D Prot (m)
1.0	34	0.00	0.00
1.4	47	0.08	5.20
1.7	59	0.09	5.85
2.3	78	0.10	6.50
3.0	102	0.12	7.80
3.5	118	0.12	7.80
3.8	131	0.13	8.45
4.4	149	0.15	9.75
5.3	180	0.22	14.30
6.0	206	0.24	15.60
7.0	239	0.26	16.90

Tabla 8: Mediciones de Q y D en Canal Moderador

En la Tabla 8 se muestra que para determinado caudal erogado por el Canal Moderador (compuertas CM1 + CM2) se obtiene una determinada distancia D.

Se aprecian los valores tanto en el modelo como en el prototipo. La variación del caudal es arbitraria, ya que es muy difícil regular la bomba que suministra el flujo al modelo cuando se requiere caudales pequeños, por ello los saltos de caudal son arbitrarios.

En el (Ver Gráfico 17) se muestran los resultados obtenidos.

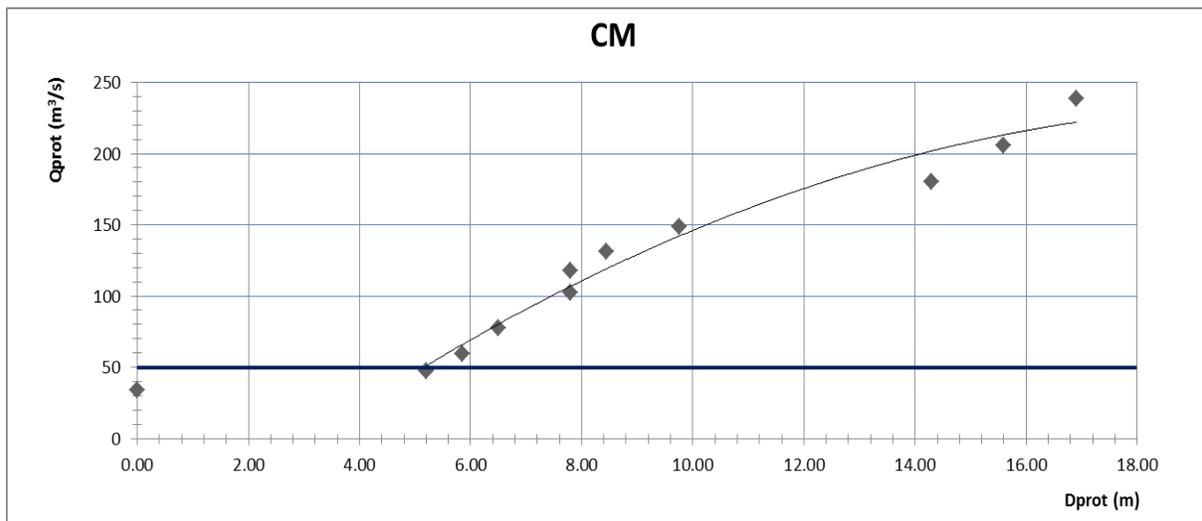


Gráfico 17: Curva Q-D para Canal Moderador

Se pudo definir el caudal mínimo necesario para iniciar el despegue, que como se puede observar es aproximadamente de 50 m<sup>3</sup>/s. A partir de este punto se traza una línea de tendencia polinómica de orden dos, con error cuadrático de R<sup>2</sup> = 0,9667, lo que indica que los datos medidos tienen correlación.

La función polinómica es de la siguiente forma:

$$Q_{PROT} \left( \frac{m^3}{s} \right) = 0,7537 \cdot [D_{PROT} (m)]^2 + 31,272 \cdot D_{PROT} (m) - 91,275$$

[Ecuación 21]

Estas conclusiones se obtuvieron para el Canal Moderador con sus dos compuertas abiertas, es decir actuando en conjunto.

Ahora se analizara el despegue para cada una de las compuertas, CM1 y CM2, para saber cómo trabaja el salto de esquí por separado.

- Compuerta CM1 del Canal Moderador Abierta:

Q Mod (l/s)	Q Prot (m <sup>3</sup> /s)	CM1				Observaciones
		D Mod (cm)	D Prot (m)	H Prot MI (m)	H Prot MD (m)	
0.7	24	0.00	0.00	1367.0	1367.6	CM1 trabaja a superficie libre
1.1	39	7.50	4.88	1367.4	1368.1	CM1 trabaja a superficie libre
1.7	57	12.00	7.80	1368.0	1368.5	CM1 trabaja a superficie libre
2.4	80	16.00	10.40	1369.7	1369.9	CM1 trabaja a superficie libre
3.2	108	19.50	12.68	1370.3	1370.7	CM1 trabaja a superficie libre
4.2	141	23.00	14.95	1371.0	1371.6	CM1 trabaja a presion
4.7	160	25.00	16.25	1372.3	1372.6	CM1 trabaja a presion
5.9	201	28.00	18.20	1373.0	1373.3	CM1 trabaja a presion

*Tabla 9: Mediciones de Q y D para la compuertas CM1 del Canal Moderador*

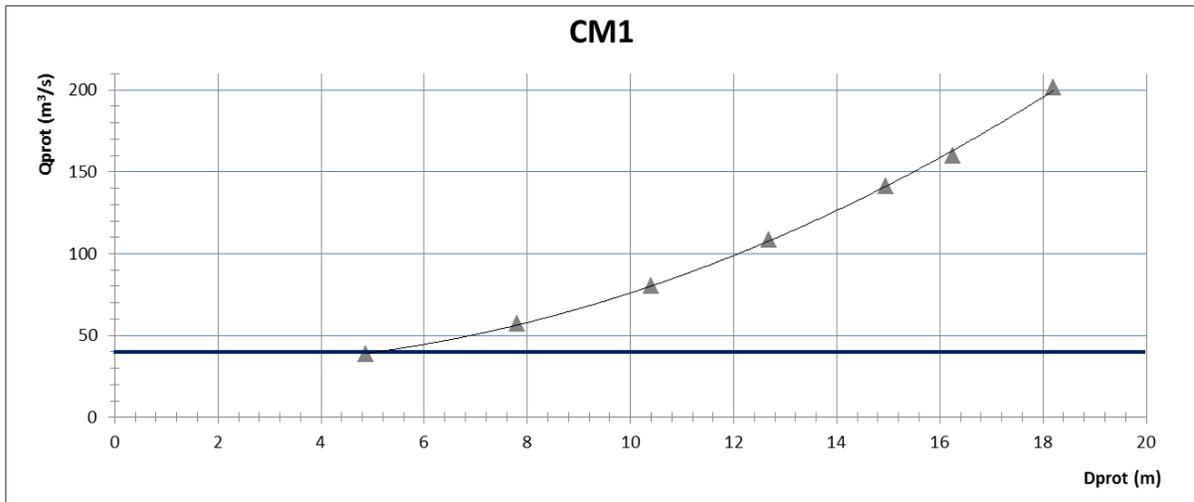


Gráfico 18: Curva Q-D para CM1

Se pudo definir el caudal mínimo necesario para iniciar el despegue en el CM1, que como se puede observar es aproximadamente de 40 m<sup>3</sup>/s. A partir de este punto se traza una línea de tendencia polinómica de orden dos, con error cuadrático de R<sup>2</sup> = 0,9993, lo que indica que los datos medidos tienen una excelente correlación.

La función polinómica es de la siguiente forma:

$$Q_{PROT} \left( \frac{m^3}{s} \right) = 0,5909 \cdot [D_{PROT} (m)]^2 - 1,5911 \cdot D_{PROT} (m) + 32,854$$

[Ecuación 22]

- Compuerta CM2 del Canal Moderador Abierta:

Q Mod (l/s)	Q Prot (m <sup>3</sup> /s)	CM2				Observaciones
		D Mod (cm)	D Prot (m)	H Prot MI (m)	H Prot MD (m)	
0.7	24	0.00	0.00	1367.0	1367.6	CM2 trabaja a superficie libre
1.1	39	8.50	5.53	1367.4	1368.1	CM2 trabaja a superficie libre
1.7	57	13.00	8.45	1368.1	1368.7	CM2 trabaja a superficie libre
2.4	80	17.00	11.05	1369.7	1370.0	CM2 trabaja a superficie libre
3.2	108	21.00	13.65	1370.5	1371.0	CM2 trabaja a presion
4.2	141	22.00	14.30	1371.0	1371.6	CM2 trabaja a presion
4.7	160	25.00	16.25	1372.2	1372.7	CM2 trabaja a presion
5.9	201	26.50	17.23	1372.3	1372.8	CM2 trabaja a presion

Tabla 10: Mediciones de Q y D para la compuertas CM2 del Canal Moderador

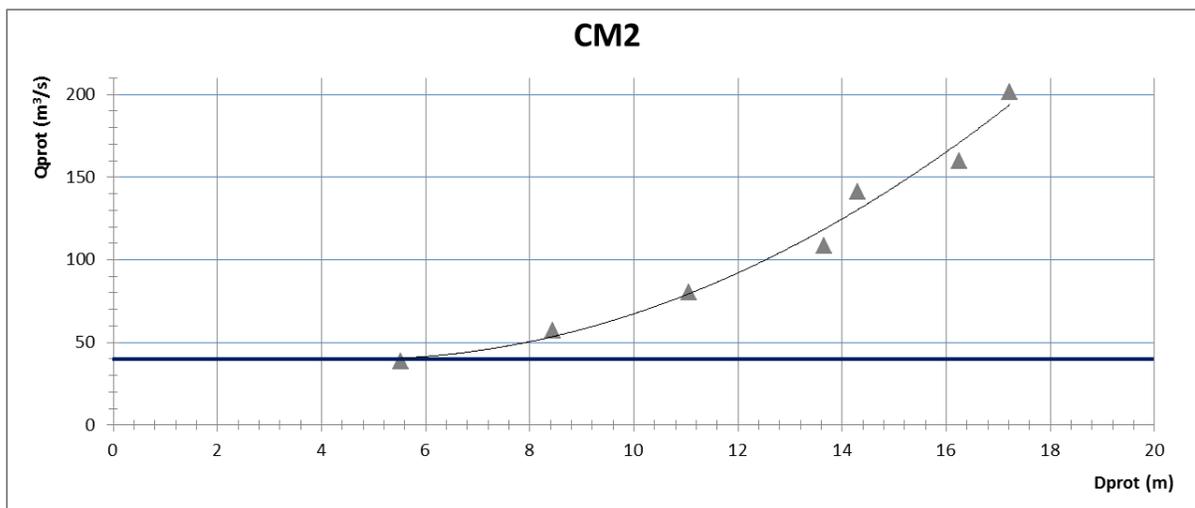


Gráfico 19: Curva Q-D para CM2

De igual manera, se define el caudal mínimo necesario para iniciar el despegue en el CM2, que como se puede observar es aproximadamente de 40 m<sup>3</sup>/s.

A partir de este punto se traza una línea de tendencia polinómica de orden dos, con error cuadrático de  $R^2 = 0,9797$ , lo que indica que los datos medidos tienen una buena correlación.

La función polinómica es de la siguiente forma:

$$Q_{PROT} \left( \frac{m^3}{s} \right) = 0,5909 \cdot [D_{PROT} (m)]^2 - 1,5911 \cdot D_{PROT} (m) + 32,854$$

[Ecuación 23]

En las Tabla 9 y Tabla 10, se muestran las observaciones realizadas en el ensayo, destacando que cuando se llega a la capacidad máxima del Canal Moderador, la compuerta CM1 y CM2 trabaja a presión, lo cual es lógico.

Analizando los gráficos anteriores, se obtuvo el caudal mínimo para iniciar el despegue en las dos compuertas del Canal Moderador, que como se esperaba era menor al caudal de despegue cuando las compuertas trabajan en conjunto.

En CM1 y CM2 el caudal necesario mínimo para iniciar el despegue fue  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ , con un error cuadrático aceptable en ambos.

Estos resultados indican que cuando las compuertas actúan por separado, el caudal necesario para iniciar el despegue es menor, pero cuando actúan en conjunto el caudal mínimo necesario es un poco mayor.

# CAPÍTULO 5:

## *“Conclusiones”*

## 5 Conclusiones

### 5.1 Aspectos técnicos analizados

La técnica Medición Volumétrica nos permitió obtener valores de caudal de manera instantánea, sin aplicar coeficientes de calibración. Al ser una técnica que mide volumen en un delta de tiempo, su entrenamiento fue sencillo y rápido. Fue necesaria la construcción de separadores de flujos para poder diferenciar los caudales de cada compuerta de las estructuras de evacuación. Los elementos utilizados son sumamente económicos y de fácil obtención.

Sus ventajas radican en su simplicidad de uso; elementos utilizados; pero principalmente su precisión, llegando a un error máximo aproximado del 8 %, que comparadas con demás técnicas desarrolladas en este informe fue muy inferior.

Además de sus valiosas ventajas también posee desventajas, destacando como principal la imposibilidad de realizar mediciones volumétricas en el Dique Fijo, cuando por ejemplo las condiciones ensayadas son tales que el flujo vierte por este.

Como síntesis se puede decir, que la Medición Volumétrica, es una excelente técnica para medir caudales dentro de un modelo físico, debido a los elementos necesarios, su facilidad de utilización y precisión en los resultados, pero siempre recordando que posee limitaciones en su alcance.

## 5.2 Generales de la práctica

Como conclusión de esta actividad, puedo decir que la práctica supervisada no es una tarea individual, sino el resultado de un compromiso junto con los docentes, alumnos y técnicos que trabajan y forman parte del Laboratorio de Hidráulica y del Centro de Estudios y Tecnología del Agua, de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. El trabajo en conjunto con los distintos integrantes permitió realizar los ensayos, y con ellos cumplimentar los objetivos propuestos para esta práctica supervisada. Esta práctica supervisada constituyó una experiencia laboral muy positiva. Desde el punto de vista académico, pude aplicar por primera vez una gran cantidad de conceptos teóricos y prácticos adquiridos durante el cursado, y pude aprender muchos otros, gracias a la interacción permanente con los compañeros y docentes del laboratorio. Desde el punto de vista laboral, pudimos desarrollar, junto con mis compañeros, todas las tareas y objetivos planteados al inicio, con resultados satisfactorios. Desde el punto de vista humano, considero haber aprendido de cada una de las personas con que me tocó trabajar y relacionarme.

### 5.3 Recomendaciones trabajos futuros

- Respecto a la realización de los ensayos, hay que establecer con anterioridad qué condiciones se va a ensayar, qué compuertas se van a abrir y cuáles van a quedar cerradas, dado que para cada condición la eficiencia de cada compuerta es diferente.
- Respecto a las condiciones de ingreso, es recomendable que la proporción de caudales que ingresen sean 65 % por el río Grande y 35 % por el río Reyes, según lo establecen los estudios hidrológicos previos.
- Respecto al registro de lecturas de pelo libre, tener en cuenta las zonas afectadas debido a la separación del flujo donde la escala emplazada no refleja su verdadero valor.

# CAPÍTULO 6:

## *“Referencias”*

## 6 Referencias

- Díaz Lozada, José Manuel (2013). “Descripción experimental, utilizando un modelo físico, del flujo de aproximación a la Presa Los Molinos.” - Práctica Supervisada de Carrera de Ingeniería Civil- Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba - Febrero 2013.

- Vaschalde, Tomas Santiago (2013). “Caracterización hidrodinámica del flujo de ingreso a las obras de evacuación de excedentes de la Presa Los Molinos, Jujuy” – Práctica Supervisada de Carrera de Ingeniería Civil- Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba- Julio 2013.

- Quiroga Crespo, Lucas Santiago Nicolás (2013). “Determinación experimental, en un modelo físico, de la capacidad hidráulica de las obras de evacuación de la presa Los Molinos, Jujuy” – Práctica Supervisada de Carrera de Ingeniería Civil- Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba- Febrero 2013.

- Streeter, Víctor L y Wylie, E. Benjamín. (1999) “Mecánica de Fluidos” Novena Edición. Editorial McGraw Hill.

- HALCROW (2009). Informe de Avance Nº 1. Dique Los Molinos, Jujuy. La Plata, Argentina.

- HALCROW (2009). Informe de Avance Nº 2. Dique Los Molinos, Jujuy. La Plata, Argentina.