

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICA Y NATURALES  
CENTRO DE ESTUDIOS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA**

**PRÁCTICA SUPERVISADA  
INGENIERÍA CIVIL**

**“Políticas de operación con aporte de  
sedimentos de forma continua en el Dique Los  
Molinos, Jujuy”**

**Autor: QUARGNOLO, Juan Alberto**

**Tutor: PAGOT, Mariana**

**Supervisor Externo: CORRAL, Mariano**

**GUILLÉN, Nicolás F.**

**Año 2014**

## **AGRADECIMIENTOS**

- ✓ A mis padres, que me ayudaron todo este tiempo para tener la posibilidad de poder estudiar en esta universidad y nunca me dejaron solo estando tan lejos.
- ✓ A mis hermanos, que siempre me escucharon y aconsejaron desde la distancia.
- ✓ A mis amigos, que estuvieron siempre a mi lado, en los buenos y malos momentos.
- ✓ A la universidad y sus docentes, que me dieron la posibilidad de estudiar y llegar a ser un profesional.
- ✓ Al Laboratorio de Hidráulica y el grupo de trabajo, que siempre me dieron una mano y tuvieron predisposición para ayudarme por cualquier consulta.

## **RESUMEN**

---

Durante las últimas décadas el Dique Los Molinos, en la provincia de Jujuy, ha reducido su capacidad de almacenamiento debido a la importante cantidad de sedimentos que llegan desde los ríos Grande y Reyes, los que han generado una acumulación hasta el nivel de la estructura.

Debido a ésta problemática y en el marco de una licitación, la empresa Benito Roggio e Hijos S.A. tiene como tareas la reparación del dique y tomar medidas para evitar que los procesos de tarquinamiento continúen. Para realizar este proyecto ha trabajado desde el año 2012, en forma conjunta con el Laboratorio de Hidráulica de la FCEFyN de la UNC, en la construcción de un modelo físico para representar el sistema a escala 1:65.

En la presente Práctica Supervisada se ha trabajado en el área de la hidráulica fluvial simulando procesos hidrosedimentológicos en un modelo físico a escala reducida. En este trabajo se evaluó el aporte de sedimentos de los ríos Reyes y Grande, en su llegada al Dique Los Molinos, provincia de Jujuy, aplicando políticas de operación de compuertas preestablecidas para eventos de crecidas.

Se calibrará y analizará la técnica que permitirá simular el aporte de sedimentos en forma continua a través de tolvas especialmente preparadas para funcionar en el modelo físico construido.

Los procesos hidrosedimentológicos que se generen permitirán validar las metodologías de operación en escenarios más complejos y reales, ya que los ríos afluentes al Dique, transportan grandes volúmenes de material sólido, los cuales producen un efecto de tarquinamiento en su llegada al Dique. Este efecto aún no ha sido evaluado en los escenarios ensayados previamente.

Se relevarán las condiciones resultantes de cada ensayo hidrosedimentológico, asociadas a las formas de fondo, lo que permitirá realizar una comparación entre los escenarios que se han propuesto para la operación de compuertas.

El objetivo planteado en la presente Práctica Supervisada es calibrar y simular en el modelo físico, las condiciones hidrosedimentológicas que se prevén para los ríos afluentes al Dique Los Molinos.

## **INDICE DE CONTENIDOS**

1	MARCO REFERENCIAL DEL TRABAJO .....	10
1.1	Introducción .....	10
1.2	Localización y descripción del Dique Los Molinos.....	10
1.3	Problemática actual del Dique Los Molinos.....	12
1.4	Modelo físico del Dique Los Molinos en el Laboratorio de Hidráulica, UNC ..	15
1.4.1	Descripción del modelo físico del Dique Los Molinos.....	15
1.4.2	Área de estudio .....	16
1.5	Objetivos generales del modelo físico del Dique Los Molinos .....	16
1.6	Objetivos específicos de esta Práctica Supervisada .....	16
2	POLÍTICAS DE OPERACIÓN DE APERTURA DE COMPUERTAS EN EL DIQUE “LOS MOLINOS” .....	17
2.1	Política de operación I: Esperar la crecida con compuertas cerradas .....	17
2.2	Política de operación II: Esperar la crecida con compuertas abiertas .....	21
2.3	Ventajas y desventajas de cada política .....	26
2.3.1	Política de operación I: Esperar la crecida con Compuertas Cerradas ..	26
2.3.2	Política de operación II: Esperar la crecida con Compuertas Abiertas ...	26
3	ANTECEDENTES DEL ESTUDIO DEL APORTE DE SEDIMENTOS PARA LAS POLÍTICAS DE OPERACIÓN EN EL DIQUE LOS MOLINOS .....	27
3.1	Parámetros del cauce .....	28
3.1.1	Radio hidráulico (R) .....	28
3.1.2	Ancho del cauce (b).....	29
3.1.3	Pendiente longitudinal del cauce ( $S_o$ ) .....	30
3.2	Parámetros del sedimento .....	31
3.2.1	Granulometría.....	31
3.2.2	Peso específico .....	32
3.3	Comparación de las fórmulas propuestas.....	32
3.3.1	Selección de la fórmula de transporte a aplicar .....	33
3.4	Procedimientos de apertura de compuertas con aporte de sedimentos en forma manual (semidiscreta) .....	35
3.4.1	Política de operación I: Esperar la crecida con las compuertas cerradas 35	
3.4.2	Política de operación II: Esperar la crecida con las compuertas abiertas 37	
4	CALIBRACIÓN DE LAS TOLVAS .....	40
4.1	Principio de funcionamiento de las tolvas .....	40

4.2	Caudales sólidos necesarios .....	43
4.2.1	Política de operación I: Esperar la crecida con las compuertas cerradas 43	
4.2.2	Política de operación II: Esperar la crecida con las compuertas abiertas 44	
4.3	Calibración de las tolvas vibratorias.....	44
4.3.1	Resultados con la tolva chica .....	47
4.3.2	Resultados con la tolva grande.....	49
4.4	Estimación del peso específico de la arena utilizada .....	53
4.4.1	Peso específico natural .....	54
4.4.2	Peso específico saturado.....	55
5	ENSAYOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS DE LAS POLÍTICAS DE OPERACIÓN CON APOORTE DE SEDIMENTOS DE FORMA CONTINUA.....	58
5.1	Política de operación I: Esperar la crecida con las compuertas cerradas.....	58
5.2	Política de operación II: Esperar la crecida con las compuertas abiertas.....	62
6	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	66
6.1	Política de operación I: Esperar la crecida con las compuertas cerradas.....	66
6.2	Política de operación II: Esperar la crecida con las compuertas abiertas.....	72
7	CONCLUSIONES .....	78
7.1	Conclusiones de la Práctica Supervisada .....	78
7.2	Conclusiones personales sobre la Práctica Supervisada .....	79
8	REFERENCIAS .....	80

## **INDICE DE FIGURAS**

Figura 1: Ubicación del Dique Los Molinos, provincia de Jujuy .....	11
Figura 2: Estructuras del dique Los Molinos .....	12
Figura 3: Imagen aérea tomada durante una crecida.....	12
Figura 4: Tarquinamiento del Dique Fijo .....	13
Figura 5: Erosión local al pie de la estructura de descarga .....	13
Figura 6: Abrasión en el perfil del vertedero del Dique Fijo (DF) .....	14
Figura 7: Problema en los sellos del Dique Móvil (DM) .....	14
Figura 8: Modelo físico del dique “Los Molinos” en el Laboratorio de Hidráulica, UNC	15
Figura 9: Primera etapa de la metodología I de aperturas de compuertas .....	18
Figura 10: Tercera etapa de la metodología I de aperturas de compuertas .....	19
Figura 11: Cuarta etapa de la metodología I de aperturas de compuertas .....	20
Figura 12: Cuarta etapa de la metodología I de aperturas de compuertas .....	20
Figura 13: Primera etapa de la metodología II de aperturas de compuertas .....	22
Figura 14: Segunda etapa de la metodología II de aperturas de compuertas .....	22
Figura 15: Tercera etapa de la metodología II de aperturas de compuertas .....	23
Figura 16: Cuarta etapa de la metodología II de aperturas de compuertas .....	23
Figura 17: Quinta etapa de la metodología II de aperturas de compuertas .....	24
Figura 18: Sexta etapa de la metodología II de aperturas de compuertas.....	25
Figura 19: Gráfico Caudal prototipo Vs Radio Hidráulico Modelo Río Reyes .....	28
Figura 20: Gráfico Caudal prototipo Vs Radio Hidráulico Modelo Río Grande .....	29
Figura 21: Gráfico Caudal prototipo Vs Ancho del cauce Modelo Río Reyes .....	29
Figura 22: Gráfico Caudal prototipo Vs Ancho del cauce Modelo Río Grande .....	30
Figura 23: Pendiente longitudinal de Río Reyes .....	30
Figura 24: Pendiente longitudinal de Río Grande.....	31
Figura 25: Curva granulométrica del sedimento en el modelo físico .....	31
Figura 26: Comparación de las fórmulas de transporte para el Río Reyes.....	32
Figura 27: Comparación de las fórmulas de transporte para el Río Grande.....	33
Figura 28: Hidrograma medio anual esperando la crecida con compuertas cerradas .	36
Figura 29: Flujograma para el hidrograma esperando la crecida con compuertas cerradas.....	37
Figura 30: Hidrograma medio anual esperando la crecida con compuertas abiertas ..	38
Figura 31: Flujograma para el hidrograma esperando la crecida con compuertas abiertas.....	39
Figura 32: Tolva trapezoidal vibratoria .....	40
Figura 33: Tornillos de nivelación de tolva .....	41
Figura 34: Motor vibratorio de excentricidad regulable.....	41
Figura 35: Soporte de las tolvas .....	42
Figura 36: Celda de carga .....	42
Figura 37: Tolva vibratoria armada sobre el cauce del río en el modelo físico .....	43
Figura 38: Medición de volumen de arena para calibración .....	45
Figura 39: Vista frontal del limitador de aporte de sedimento.....	46
Figura 40: Vista lateral del limitador de aporte se sedimento .....	46
Figura 41: Relación ancho de tolva grande Vs Caudal sólido .....	52
Figura 42: Ensayo hidrosedimentológico en el modelo físico del Dique Los Molinos ..	52
Figura 43: Display de celdas de carga al iniciar ensayo.....	53
Figura 44: Celda de carga instalada en tolva .....	54

Figura 45: Puntos característicos medidos en cada instante del ensayo.....	58
Figura 46: Variación de las cotas del lecho en los puntos característicos con respecto al tiempo. Ensayo en que se espera la crecida con compuertas cerradas con aporte de sedimentos continuo.....	59
Figura 47: Ensayo en que se espera la crecida con compuertas cerradas con aporte de sedimentos continuo. 45 minutos.....	60
Figura 48: Ensayo en que se espera la crecida con compuertas cerradas con aporte de sedimentos continuo. 60 minutos.....	60
Figura 49: Superficie obtenida durante el ensayo en que se espera la crecida con compuertas cerradas con aporte de sedimentos continuo .....	61
Figura 50: Puntos relevados de la superficie final en ensayo en que se espero la crecida con compuertas cerradas con aporte de sedimentos continuo .....	61
Figura 51: Superficie digital del modelo cuando se espera la crecida con las compuertas cerradas con aporte de sedimentos continuo .....	62
Figura 52: Variación de las cotas del lecho en 5 puntos característicos en el tiempo. Ensayo en que se espera la crecida con compuertas abiertas con aporte de sedimentos continuo.....	63
Figura 53: Superficie obtenida durante el ensayo en que se espera la crecida con compuertas abiertas con aporte de sedimentos continuo .....	64
Figura 54: Puntos relevados de la superficie final en ensayo en que se espero la crecida con compuertas abiertas con aporte de sedimentos continuo .....	64
Figura 55: Superficie digital del modelo cuando se espera la crecida con las compuertas abiertas con aporte de sedimentos continuo .....	65
Figura 56: Ensayos: (a) sin aporte, (b) con aporte manual, (c) con aporte continuo. Escenario en que se espera la crecida con compuertas cerradas.....	67
Figura 57: Superficie digital del modelo cuando se espera la crecida con las compuertas cerradas sin aporte de sedimentos.....	68
Figura 58: Superficie digital del modelo cuando se espera la crecida con las compuertas cerradas con aporte de sedimentos manual .....	68
Figura 59: Ubicación de perfiles topográficos analizados.....	70
Figura 60: Perfil 1. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas cerradas .....	70
Figura 61: Perfil 2. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas cerradas .....	71
Figura 62: Perfil 3. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas cerradas .....	71
Figura 63: Perfil 4. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas cerradas .....	72
Figura 64: Ensayos: (a) sin aporte, (b) con aporte manual, (c) con aporte continuo. Escenario en que se espera la crecida con compuertas abiertas.....	73
Figura 65: Superficie digital del modelo cuando se espera la crecida con las compuertas abiertas sin aporte de sedimentos.....	74
Figura 66: Superficie digital del modelo cuando se espera la crecida con las compuertas abiertas con aporte de sedimentos manual .....	74
Figura 67: Perfil 1. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas abiertas .....	75
Figura 68: Perfil 2. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas abiertas .....	76

---

Figura 69: Perfil 3. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas abiertas	76
Figura 70: Perfil 4. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas abiertas	77

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Resumen del orden de aperturas de compuertas cuando se espera la crecida con compuertas cerradas .....	21
Tabla 2: Resumen del orden de aperturas de compuertas cuando se espera la crecida con compuertas abiertas.....	25
Tabla 3: Tabla resumen transporte de sedimentos Política I.....	33
Tabla 4: Tabla resumen transporte de sedimentos Política II.....	34
Tabla 5: Aporte de sedimento esperando la crecida con compuertas cerradas.....	36
Tabla 6: Aporte de sedimento esperando la crecida con compuertas abiertas.....	37
Tabla 7: Caudales sólidos necesarios si se espera la crecida con compuertas cerradas .....	43
Tabla 8: Caudales sólidos necesarios si se espera la crecida con compuertas abiertas .....	44
Tabla 9: Caudales sólidos con abertura de tolva chica 1,20 m y arena con humedad natural .....	47
Tabla 10: Caudales sólidos con abertura de tolva chica 1,20 m y humedad de arena moderada .....	47
Tabla 11: Caudales sólidos con abertura de tolva chica 1,00 m y humedad de arena moderada .....	48
Tabla 12: Resumen de aporte de sedimentos con tolva chica .....	48
Tabla 13: Caudales sólidos con abertura de tolva grande 2,00 m.....	49
Tabla 14: Caudales sólidos con abertura de tolva grande 1,30 m.....	49
Tabla 15: Caudales sólidos con abertura de tolva grande 1,10 m.....	50
Tabla 16: Caudales sólidos con abertura de tolva grande 0,80 m.....	50
Tabla 17: Caudales sólidos con abertura de tolva grande 0,70 m.....	50
Tabla 18: Caudales sólidos con abertura de tolva grande 0,60 m.....	51
Tabla 19: Caudales sólidos con abertura de tolva grande 0,20 m.....	51
Tabla 20: Caudales sólidos con abertura de tolva grande 0,05 m.....	51
Tabla 21: Volúmenes para peso específico de arena natural.....	54
Tabla 22: Pesos para peso específico de arena natural.....	55
Tabla 23: Pesos específicos de arena natural .....	55
Tabla 24: Volúmenes para peso específico de arena saturada con tolva chica.....	55
Tabla 25: Pesos para peso específico de arena saturada con tolva chica .....	56
Tabla 26: Pesos específicos de arena saturada con tolva chica .....	56
Tabla 27: Volúmenes para peso específico de arena saturada con tolva grande.....	56
Tabla 28: Pesos para peso específico de arena saturada con tolva grande.....	56
Tabla 29: Pesos específicos de arena saturada con tolva grande .....	57
Tabla 30: Volumen de sedimentos retenidos en la tolva en ensayo en que se espera la crecida con compuertas cerradas con aporte de sedimentos continuo .....	62
Tabla 31: Volumen de sedimentos retenidos en la tolva en ensayo en que se espera la crecida con compuertas abiertas con aporte de sedimentos continuo .....	65
Tabla 32: Volúmenes de material suelto removido durante los ensayos en los que se espera la crecida con compuertas cerradas.....	69
Tabla 33: Volúmenes de material suelto removido durante los ensayos en los que se espera la crecida con compuertas abiertas.....	75

## **1 MARCO REFERENCIAL DEL TRABAJO**

### **1.1 Introducción**

En el presente trabajo se modelaron los escenarios hidrosedimentológicos propuestos para las políticas de operación del Dique los Molinos, provincia de Jujuy, en el modelo físico construido en el Laboratorio de Hidráulica de la FCEFyN de la UNC. Estas modelaciones se realizaron considerando los escenarios de crecidas con aportes de sedimentos de forma continua utilizando dos tolvas mecánicas. El objetivo propuesto fue validar las metodologías de operación evaluando condiciones más reales, ya que en la realidad los ríos transportan y acarrear un volumen sólido que pueden producir efectos al llegar a un dique, como el tarquinamiento.

Este informe contiene una breve descripción de la problemática actual que presenta el dique en estudio y las políticas de operación establecidas en base a estudios previos en el modelo físico que aquí se utiliza. Se realizó una revisión del fenómeno de transporte de sedimentos y las variables que intervienen. Luego se presentaron y analizaron los resultados de los ensayos hidrosedimentológicos realizados. Estos resultados se compararon con los casos en donde no existe aporte de sedimentos y donde el aporte se realiza en forma manual y semidiscreta. Finalmente se evaluó si los resultados obtenidos durante los ensayos son representativos del prototipo.

### **1.2 Localización y descripción del Dique Los Molinos**

El dique Los Molinos está ubicado en la provincia de Jujuy a pocos kilómetros de su capital, San Salvador de Jujuy. Se encuentra sobre el río Grande aproximadamente a 3 Km aguas abajo de la confluencia con el río Reyes. En la imagen satelital de la Figura 1 observa la ubicación del mismo.



**Figura 1: Ubicación del Dique Los Molinos, provincia de Jujuy**

Esta estructura cumple la función de proporcionar carga para derivar el agua hacia un canal de riego, el cual alimenta al dique “Las Maderas” y “La Ciénaga”. Para ello se puede derivar hasta un máximo de  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  a través de una toma de agua ubicada sobre la margen derecha del dique.

La presa está constituida por los siguientes elementos (ver Figura 2):

- ✓ Terraplén de materiales sueltos (TMI) de 340 metros de longitud y 13.1 metros de altura, sobre la margen izquierda.
- ✓ Un vertedero fijo que se denomina en este informe como dique fijo (DF) de 200 metros de longitud, con una cota de umbral de 1373 msnm.
- ✓ Un vertedero controlado por compuertas circulares de 3 metros de radio que se denomina como dique móvil (DM) de 70 metros de longitud con cuatro vanos de 15 metros cada uno, con umbrales a cota 1369 msnm.
- ✓ Un canal de limpieza de 10 metros de longitud al cual se llama canal moderador (CM), cuya cota de umbral es 1365,4 msnm.
- ✓ Una obra de toma, ubicada sobre la margen derecha de la presa, de la entrada del Canal Moderador (CM).
- ✓ Terraplén de materiales sueltos (TMD) de 440 metros de longitud y 12.3 metros de altura, sobre la margen derecha.

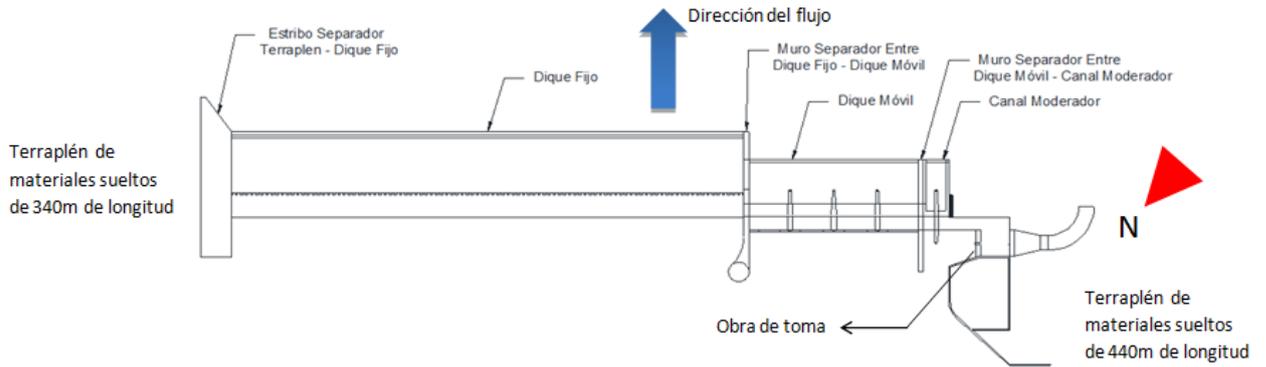


Figura 2: Estructuras del dique Los Molinos

En la Figura 3 se observa la estructura de descarga (Dique Fijo) evacuando los excedentes durante una crecida. Además se indica el emplazamiento del Dique Móvil.



Figura 3: Imagen aérea tomada durante una crecida

### 1.3 Problemática actual del Dique Los Molinos

Se distinguen cuatro problemas que se presentan en el dique Los Molinos:

- ✓ Debido al gran aporte de sedimentos provenientes de la cuenca y del cauce de los ríos Reyes y Grande el dique comenzó un proceso de tarquinamiento y colmatación de sedimentos. Este proceso se debe a que los sedimentos transportados por los ríos al encontrarse con la obra de cierre reducen su velocidad produciendo el asentamiento de los mismos. En la Figura 4 se observa como el sedimento se fue depositando aguas arriba de las estructuras de descarga hasta llegar a la cota del labio del vertedero (DF).



**Figura 4: Tarquinamiento del Dique Fijo**

- ✓ Se observa una erosión generalizada aguas abajo del dique, además de una importante erosión local al pie de las estructuras de descarga. En la Figura 5 se observa cómo se fue erosionando el pie del canal moderador (CM) debido a la gran velocidad de salida del agua por dicha estructura y a la falta de una protección adecuada.



**Figura 5: Erosión local al pie de la estructura de descarga**

- ✓ Debido al problema de colmatación del Dique Móvil muchos sedimentos gruesos atraviesan el mismo, pasando por los vertederos y produciendo abrasión. En la Figura 6 se observa que la abrasión del Dique Fijo logró exponer las armaduras del mismo.



**Figura 6: Abrasión en el perfil del vertedero del Dique Fijo (DF)**

- ✓ La 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. Esto llevo a que el sedimento se acumule y a tener que realizar intervenciones sobre el cauce del río mediante retroexcavadoras para poder mantener la funcionalidad de las obras de toma de agua hacia el canal derivador. En Figura 7 se puede ver la falta de mantenimiento en las compuertas del Dique Móvil al presentar escurrimiento a través de los sellos.



**Figura 7: Problema en los sellos del Dique Móvil (DM)**

## **1.4 Modelo físico del Dique Los Molinos en el Laboratorio de Hidráulica, UNC**

Debido a los problemas antes mencionados se abordó la reparación y refuncionalización del mismo a cargo de la empresa Benito Roggio e Hijos S.A. En este marco de trabajo se encargó al Laboratorio de Hidráulica de la UNC la construcción del modelo físico del dique para estudiar el funcionamiento del mismo.

### **1.4.1 Descripción del modelo físico del Dique Los Molinos**

El modelo físico tridimensional se construyó siguiendo los lineamientos impuestos por el Criterio de Semejanza de Froude, esto es, las fuerzas que gobiernan el flujo a pelo libre son las gravitacionales, siendo preponderantes por sobre las viscosas, las de capilaridad, las elásticas, etc.

Este modelo físico se construyó en escala 1:65 no distorsionada, seleccionada en función de las variables a estudiar, los efectos de escala y las capacidades del Laboratorio (capacidad de bombeo, espacio disponible, entre otros).

El modelo físico se encuentra emplazado en la parte posterior del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, y ocupa una superficie modelada de 258 m<sup>2</sup>, que en prototipo representa un área total de 1,10 km<sup>2</sup>. En la Figura 8 se observa el modelo físico construido.



**Figura 8: Modelo físico del dique “Los Molinos” en el Laboratorio de Hidráulica, UNC**

#### **1.4.2 Área de estudio**

Este modelo físico representa todas las estructuras presentes en el cuerpo de la presa. Incluye las tres estructuras de control (Dique Móvil, Dique Fijo y Canal Moderador), conjuntamente con sus respectivos órganos de regulación (compuerta sector, compuerta plana, etc.).

Aguas arriba, el dominio de análisis del modelo físico se extiende a través de un desarrollo longitudinal, tanto sobre el río Grande como sobre el río Reyes, representando el cauce hasta unos 1000 m aguas arriba de la presa en prototipo, de modo tal que asegure la correcta representación de los parámetros hidrodinámicos, hidráulicos y sedimentológicos que afectan al comportamiento y desempeño de las estructuras analizadas.

La longitud representada aguas abajo del cuerpo del dique (500 m en prototipo) se ha definido de tal forma que las condiciones de borde no afecten los procesos hidráulicos y sedimentológicos bajo estudio.

#### **1.5 Objetivos generales del modelo físico del Dique Los Molinos**

El trabajo solicitado al Laboratorio de Hidráulica (UNC) específica para el modelo físico distintas etapas claramente diferenciadas en sus objetivos particulares:

- ✓ Verificar las capacidades hidráulicas de evacuación de las estructuras presentes en las obras 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, junto a las erosiones locales asociadas, que se esperan aguas abajo de las estructuras de descarga a los fines de constatar el funcionamiento de las obras previstas en el proyecto. Esta evaluación se llevará a cabo para escenarios hidrológicos de diseño.
- ✓ Verificar y optimizar las consignas de operación de las estructuras de control, a los fines de regular los procesos hidrosedimentológicos presentes en las proximidades de la presa aguas arriba y permitir el paso de los sedimentos a través de las estructuras de control.

#### **1.6 Objetivos específicos de esta Práctica Supervisada**

- ✓ Evaluar el aporte de sedimentos para el modelo físico del Dique Los Molinos, aplicando las políticas de operación de compuertas preestablecidas para eventos de crecidas.
- ✓ Diseñar, preparar y realizar ensayos hidrosedimentológicos.
- ✓ Medir y procesar los resultados obtenidos de cada ensayo.
- ✓ Analizar las principales condiciones hidrosedimentológicas observadas y medidas.

## 2 POLÍTICAS DE OPERACIÓN DE APERTURA DE COMPUERTAS EN EL DIQUE “LOS MOLINOS”

En trabajos previos realizados sobre este modelo físico, se evaluaron y definieron dos metodologías de aperturas de compuertas analizadas en Avila (2014). El objetivo que prima con estas metodologías fue definir un procedimiento de manejo de las compuertas del Dique Móvil y el Canal Moderador, ante crecidas que permitan la remoción de sedimentos y la limpieza de la obra de toma hacia el canal derivador. En otras palabras se busca producir el mayor transporte de sedimento posible evitando erosiones muy locales que comprometan la estabilidad estructural de la obra.

Dichas políticas de operación se obtuvieron al ensayar diversas combinaciones de aperturas de compuertas sin aporte de sedimentos hasta lograr una morfología de cauce adecuada.

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de las políticas de manejo definidas.

Se presentan dichas políticas ya que, como se verá más adelante, lo que se buscó es validar estos procedimientos teniendo en cuenta el aporte de sedimentos en forma mecánica y su transporte hacia las estructuras del dique.

### 2.1 Política de operación I: Esperar la crecida con compuertas cerradas

El Ing. Quintana, quien fue operador por muchos años del dique móvil, propuso la siguiente metodología de aperturas de compuertas.

El ensayo brindó resultados muy aceptables, en cuanto a la morfología del lecho aguas arriba de la obra de toma y en cercanías al dique.

Las etapas involucradas en esta Política se resumen de la siguiente manera:

**Primera etapa** ( $Q = 600 \text{ m}^3/\text{s}$  en prototipo - cota 1374,6 m.s.n.m en Margen Derecha Dique Fijo).

Se espera el pico de la crecida con todas las compuertas del Dique Móvil y del Canal Moderador cerradas.

Esto no genera transporte de sedimentos en la zona aguas arriba del dique.

En la Figura 9 observa como todo el caudal es evacuado por el Dique Fijo al estar el Dique Móvil cerrado.



**Figura 9: Primera etapa de la metodología I de aperturas de compuertas**

**Segunda etapa** ( $Q = 600 \text{ m}^3/\text{s}$  en prototipo - cota 1374,2 m.s.n.m en Margen Derecha Dique Fijo).

Una vez alcanzada esta cota, se procede a la apertura del 10% de cada una de las compuertas del DM en el siguiente orden: DM3 – DM2 – DM4 – DM1.

Esto sólo genera transporte de sedimentos en la zona inmediatamente aguas arriba del DM (erosión local).

Todas las compuertas trabajan a presión.

**Tercera etapa** ( $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$  en prototipo - cota 1373,1 m.s.n.m en Margen Derecha Dique Fijo)

Una vez alcanzada esta cota, se procede a la apertura de otro 10% de cada una de las compuertas del DM, respetando el siguiente orden: DM3 – DM2 – DM4 – DM1. Todas las compuertas quedan abiertas en un 20%.

Esto solo genera transporte de sedimentos en la zona inmediatamente aguas arriba del DM (erosión local).

Todas las compuertas trabajan a presión.

En la Figura 10 observa la apertura de las compuertas de Dique Móvil a un 20%.



**Figura 10: Tercera etapa de la metodología I de aperturas de compuertas**

**Cuarta etapa** ( $Q = 225 \text{ m}^3/\text{s}$  en prototipo - cota 1373 m.s.n.m en Margen Derecha Dique Fijo)

Una vez alcanzada esta cota, se procede a la apertura de las compuertas del DM hasta llegar al 50% de la apertura total de las mismas respetando el mismo orden del paso precedente (DM3 – DM2 – DM4 – DM1).

Además se abren las 2 compuertas del CM en un 100% (primero CM1 y luego CM2).

En esta etapa comienza la evacuación de sedimentos en la zona aguas arriba del dique provocando la llamada desde un entorno más alejado al dique móvil (100m).

Todas las compuertas tanto del DM como del CM trabajan a pelo libre.

En la Figura 11 y Figura 12 se observa que al abrir un 50% las compuertas del Dique Móvil y al escurrir un menor caudal, estas trabajan a pelo libre produciendo una mayor llamada aguas arriba y provocando la formación de canales.



Figura 11: Cuarta etapa de la metodología I de aperturas de compuertas



Figura 12: Cuarta etapa de la metodología I de aperturas de compuertas

**Quinta etapa** (cota 1369 m.s.n.m en Margen Derecha Dique Móvil).

Se cierra CM y los DM y se procede a la apertura de la obra de toma.

Una vez colmado el desripiador se procede a la apertura del CM2 hasta evacuar el canal aductor.

Cierro CM y repito los pasos anteriormente mencionados.

Esta última etapa no se realizó en el modelo físico ya que no cuenta con la obra de toma.

En la Tabla 1 se observa un resumen del procedimiento si se espera la crecida con compuertas cerradas.

**Tabla 1: Resumen del orden de aperturas de compuertas cuando se espera la crecida con compuertas cerradas**

Etapa	% de apertura							Q en prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Cota sup. DF (m)	Observaciones
	DM1	DM2	DM3	DM4	CM 1	CM2	Toma			
1	-	-	-	-	-	-	-	600	1374,6	Se hace pasar el agua totalmente por el DF
2	10%	10%	10%	10%	-	-	-	600	1374,2	Orden de apertura: DM 3,2,4,1
3	20%	20%	20%	20%	-	-	-	250	1373,1	Orden de apertura: DM 3,2,4,1
4	50%	50%	50%	50%	100%	100%	-	225	1373	Orden de apertura: DM 3,2,4,1 - CM1,2
5	-	-	-	-	-	-	100%		1369 (Cota en DM)	Cierro CM. Abro toma hasta cargar desripiador. Abro CM hasta evacuar flujo. Repito pasos.

## 2.2 Política de operación II: Esperar la crecida con compuertas abiertas

En base a los ensayos realizados se arribó a una metodología de aperturas de compuertas propuesta por el Laboratorio de Hidráulica y presentada por Ávila (2014).

El procedimiento resultante se divide en las siguientes etapas:

**Primera etapa** (Q = 600 m<sup>3</sup>/s en prototipo - cota 1372,5 m.s.n.m en Margen Izquierda Dique Móvil).

Se espera el pico de la crecida con todas las compuertas del Dique Móvil abiertas y del Canal Moderador cerrado.

Esto genera transporte de sedimentos en la zona aguas arriba del dique.

Todas las compuertas del DM trabajan a pelo libre. (Ver Figura 13).



**Figura 13: Primera etapa de la metodología II de aperturas de compuertas**

**Segunda etapa** ( $Q = 600 \text{ m}^3/\text{s}$  en prototipo - cota 1372,5 m.s.n.m en Margen Izquierda Dique Móvil).

Una vez alcanzada esta cota, se procede a la apertura de los canales moderadores en el siguiente orden: CM1 – CM2.

Esto genera transporte de sedimentos en la zona aguas arriba del dique.

Todas las compuertas (tanto del DM como del CM) trabajan a pelo libre.

Los descargadores del CM no deben abrirse por un lapso mayor a 5 minutos (en modelo, lo que equivale a 40 minutos en prototipo), caso contrario se produce una socavación importante aguas arriba sobre la margen derecha de DM1. (Ver Figura 14).



**Figura 14: Segunda etapa de la metodología II de aperturas de compuertas**

**Tercera etapa** ( $Q = 450 \text{ m}^3/\text{s}$  en prototipo - cota 1372 m.s.n.m en Margen Izquierda Dique Móvil)

Una vez alcanzada esta cota, se procede a cerrar DM4. Por lo tanto, quedan abiertas DM1, DM2 y DM3 (las que trabajan semiahogadas, es decir mitad a presión y mitad a superficie libre).

Esto no genera transporte de sedimentos en la zona aguas arriba del dique. (Ver Figura 15).



**Figura 15: Tercera etapa de la metodología II de aperturas de compuertas**

**Cuarta etapa** ( $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  en prototipo - cota 1372 m.s.n.m en Margen Izquierda Dique Móvil)

Una vez alcanzada esta cota, se procede a cerrar DM3. Por lo tanto, quedan abiertas DM1 y DM2.

DM1 comienza a trabajar a presión, mientras que DM2 trabaja semiahogada.

Esto no genera transporte de sedimentos en la zona aguas arriba del dique. (Ver Figura 16).



**Figura 16: Cuarta etapa de la metodología II de aperturas de compuertas**

**Quinta etapa** ( $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  en prototipo - cota 1372 m.s.n.m en Margen Izquierda Dique Móvil).

Una vez alcanzada esta cota, se procede a abrir los canales moderadores en el siguiente orden: CM1 – CM2.

Esto genera transporte de sedimentos en la zona aguas arriba del dique.

Todas las compuertas (tanto del DM como del CM) trabajan a pelo libre.

Los descargadores del CM no deben abrirse por un lapso mayor a 5 minutos (en modelo, lo que equivale a 40 minutos en prototipo), caso contrario se produce una socavación importante aguas arriba sobre la margen derecha de DM1. (Ver Figura 17).



**Figura 17: Quinta etapa de la metodología II de aperturas de compuertas**

**Sexta etapa** ( $Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$  en prototipo - cota 1371,5 m.s.n.m en Margen Izquierda Dique Móvil)

Una vez alcanzada esta cota, se cierra DM2. Por lo tanto, solo queda abierta DM1.

DM1 trabaja a presión.

Esto no genera transporte de sedimentos en la zona aguas arriba del dique. (Ver Figura 18).



**Figura 18: Sexta etapa de la metodología II de aperturas de compuertas**

En la Tabla 2 se muestra un resumen del procedimiento de manejo de las compuertas cuando se espera la crecida con compuertas abiertas.

**Tabla 2: Resumen del orden de aperturas de compuertas cuando se espera la crecida con compuertas abiertas**

Etapa	% de apertura							Q en prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Cota sup. agua DF (m)	Observaciones
	DM4	DM3	DM2	DM1	CM2	CM1	Toma			
1	100%	100%	100%	100%	-	-	-	600	1372,5 (Cota en DM)	Orden de apertura: DM 3,2,4,1
2	100%	100%	100%	100%	100%	100%	-	600	1372,5 (Cota en DM)	Orden de apertura: CM1,2 - Abro solo para la limpieza de la zona de toma y luego cierro nuevamente
3	-	100%	100%	100%	-	-	-	450	1372 (Cota en DM)	Cierro DM4. No vierte agua por DF
4	-	-	100%	100%	-	-	-	300	1372 (Cota en DM)	Cierro DM3. No vierte agua por DF
5	-	-	100%	100%	100%	100%	-	300	1372 (Cota en DM)	Orden de apertura: CM1,2 - Abro solo para la limpieza de la zona de toma y luego cierro nuevamente
6	-	-	-	100%	-	-	-	150	1371,5 (Cota en	Cierro DM2. No vierte agua por DF

Etapa	% de apertura							Q en prototipo	Cota sup. agua DF	Observaciones
									DM)	
7	-	-	-	-	100%	100%	-	100	1369 (Cota en DM)	Cierro DM1. Orden de apertura: CM1,2
8	-	-	-	-	-	-	100%			Cierro CM. Abro toma hasta cargar desripiador. Abro CM hasta evacuar flujo. Repito pasos.

## 2.3 Ventajas y desventajas de cada política

Las principales ventajas y desventajas de cada metodología de apertura de compuerta analizada se presentan a continuación:

### 2.3.1 Política de operación I: Esperar la crecida con Compuertas Cerradas

#### Ventajas.

- ✓ No se deteriora el Hormigón de los saltos esquí del Dique Móvil ya que se evita el paso de grandes caudales con sedimentos a través de ellos.

#### Desventajas.

- ✓ La apertura parcial de compuertas del Dique Móvil ocasiona el deterioro de los sellos inferiores y de los labios metálicos de las compuertas por el choque de las rocas sobre la estructura.
- ✓ Los canales de llamada aguas arriba de la obra son de menor magnitud.

### 2.3.2 Política de operación II: Esperar la crecida con Compuertas Abiertas

#### Ventajas.

- ✓ La apertura total de compuertas del Dique Móvil evita el deterioro de los sellos inferiores y de los labios metálicos de las compuertas.
- ✓ Los canales de llamada aguas arriba de la obra son de mayor magnitud y favorecen la operación de la obra de toma una vez transcurrido el evento hidrológico.

#### Desventajas.

- ✓ Se deteriora el Hormigón de los saltos esquí del Dique Móvil ya que pasan grandes caudales con sedimentos a través de ellos.

### 3 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO DEL APORTE DE SEDIMENTOS PARA LAS POLÍTICAS DE OPERACIÓN EN EL DIQUE LOS MOLINOS

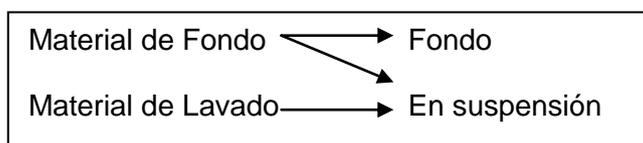
La evaluación de las políticas de operación de compuertas propuestas en el Dique Los Molinos con aporte manual de sedimentos se presentó en Marassa (2013). En esta Práctica Supervisada se estudiaron tres fórmulas empíricas, para luego compararlas y seleccionar la que más se adecuó al comportamiento real del modelo físico estudiado.

Es importante mencionar que en este trabajo solo se consideró el transporte de sedimentos de fondo y no el de lavado. El material de fondo puede rodar o deslizarse por el lecho del río, mientras que el de lavado está formado por partículas muy finas como limos y arcillas que el agua transporta en suspensión.

La diferencia principal en el comportamiento entre el material del fondo y el material de lavado consiste en que el transporte de fondo depende de las características hidráulicas de la corriente y de las características físicas del material; mientras que con el material de lavado, un río puede transportar tanto material como llegue a él, casi independientemente de las características hidráulicas de la corriente.

De lo dicho anteriormente se puede decir que dos ríos semejantes pueden tener igual transporte de fondo, pero el material de lavado dependerá de las características de la cuenca en donde se encuentra.

El transporte de lavado siempre tiene lugar en suspensión, mientras que el transporte del material del fondo puede tener lugar dentro de la capa del fondo o en suspensión. La capa del fondo se encuentra justo arriba del lecho de un cauce.



En este trabajo las fórmulas estudiadas solo hacen referencia al material transportado en la capa de fondo y no al material en suspensión.

Las fórmulas de transporte de fondo analizadas fueron:

- ✓ Ecuación de Meyer – Peter y Muller.
- ✓ Ecuación de Du Boys – Straub.
- ✓ Ecuación de Einstein – Brown.

No se aplicaron las fórmulas de Shields debido a las limitaciones de la fórmula con respecto al diámetro mínimo del sedimento.

La aplicación de las fórmulas empíricas que cuantifican el transporte de sedimento requirió la determinación tanto de parámetros del cauce como del sedimento que se determinaron en el modelo para luego aplicar las fórmulas de transporte.

### 3.1 Parámetros del cauce

Los parámetros del cauce necesarios para la aplicación de las fórmulas son el radio hidráulico (**R**), el ancho del cauce (**b**) y la pendiente longitudinal (**S<sub>o</sub>**), tanto del río Grande como del río Reyes. Para su determinación se analizaron diversos caudales para luego mediante regresión, obtener la relación entre el caudal líquido y los parámetros anteriores.

Los resultados obtenidos mediante el modelo físico son los siguientes:

#### 3.1.1 Radio hidráulico (R)

Se confeccionó un gráfico por río (Figura 19 y Figura 20) que muestra la relación entre el caudal estudiado y el radio hidráulico (**R**) asociado.

##### Río Reyes

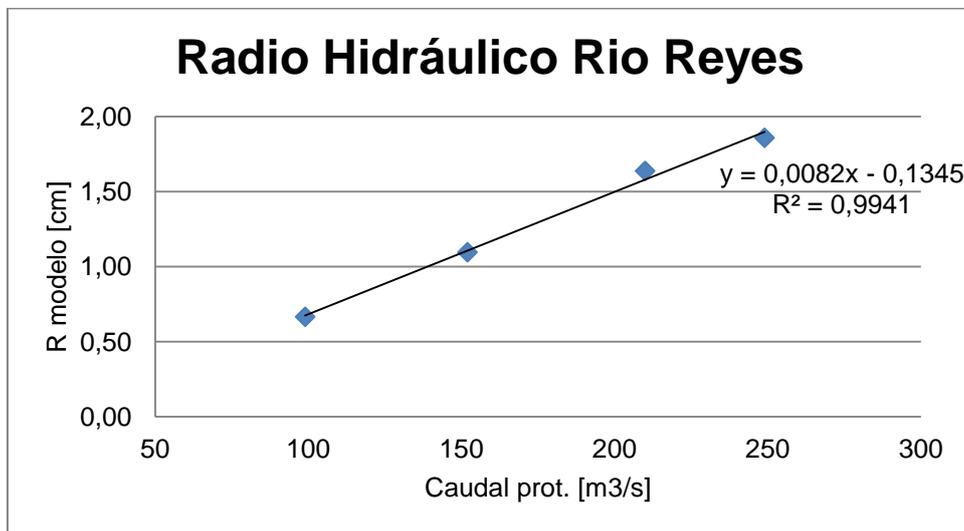


Figura 19: Gráfico Caudal prototipo Vs Radio Hidráulico Modelo Río Reyes

Río Grande

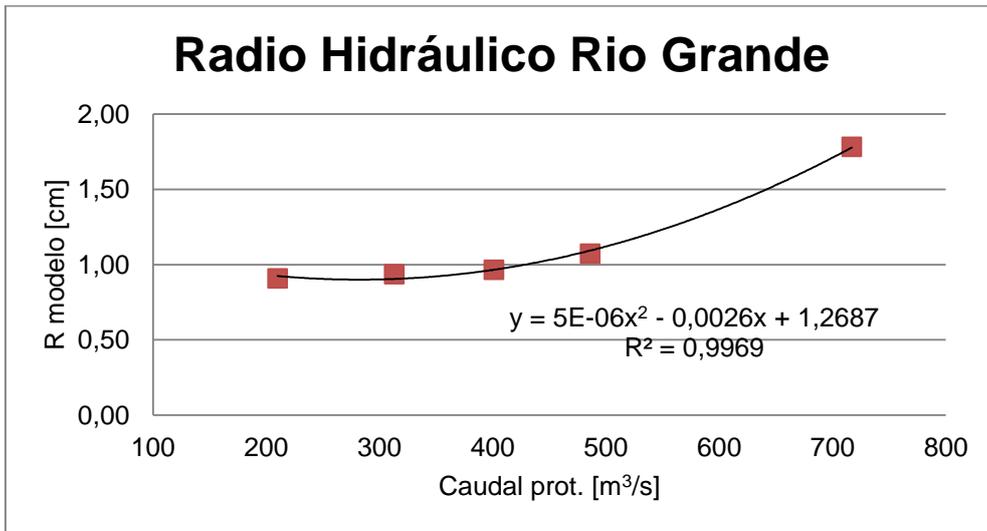


Figura 20: Gráfico Caudal prototipo Vs Radio Hidráulico Modelo Río Grande

**3.1.2 Ancho del cauce (b)**

Se confeccionó un gráfico por río (Figura 21 y Figura 22) que relaciona el caudal líquido y el ancho (b).

En general las fórmulas de transporte de sedimento dan el caudal sólido transportado por metro de ancho del cauce, por ello es necesario conocer el ancho del mismo.

Río Reyes

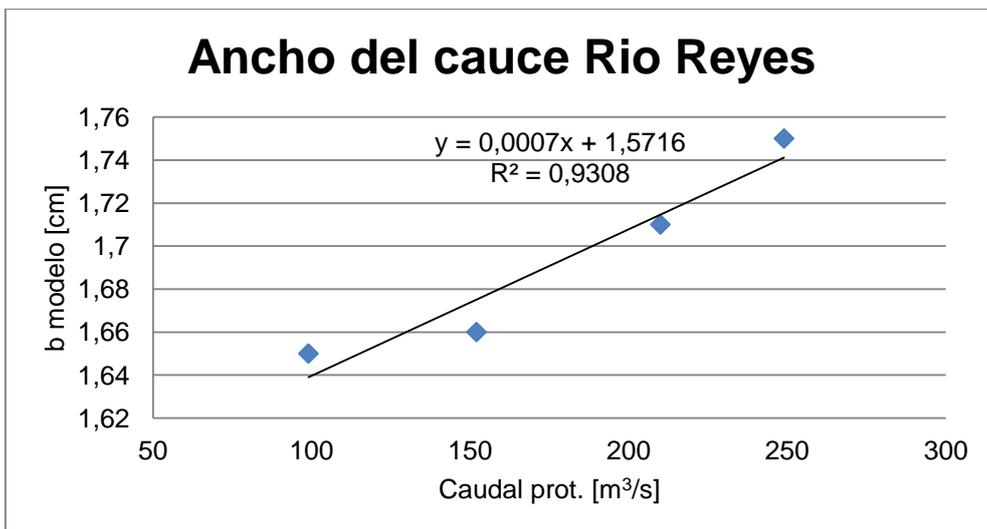


Figura 21: Gráfico Caudal prototipo Vs Ancho del cauce Modelo Río Reyes

### Río Grande

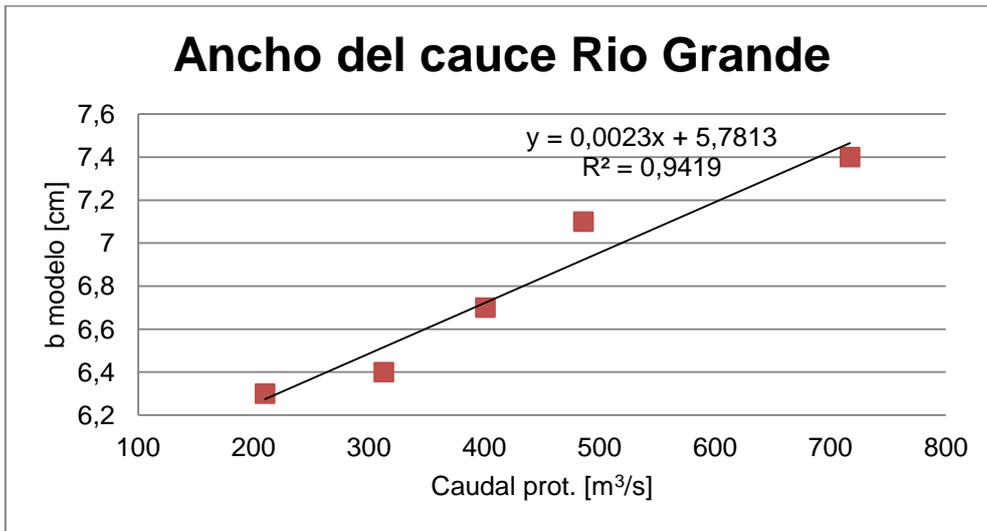


Figura 22: Gráfico Caudal prototipo Vs Ancho del cauce Modelo Río Grande

### 3.1.3 Pendiente longitudinal del cauce ( $S_o$ )

La pendiente de fondo del cauce ( $S_o$ ) influye directamente en la tensión de corte sobre el lecho. A medida que aumenta la pendiente a igualdad de las otras condiciones, la tensión de corte en el lecho aumenta y aumenta la erosión sobre el cauce. Los resultados obtenidos mediante medición se muestran en la Figura 23 y Figura 24.

### Río Reyes

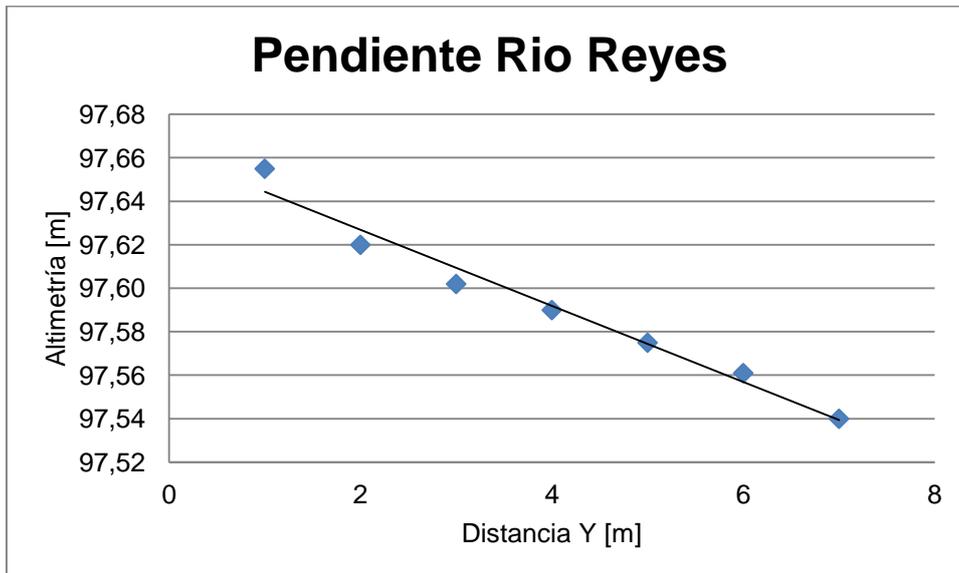


Figura 23: Pendiente longitudinal de Río Reyes

En el gráfico se puede obtener una cierta linealidad en las mediciones, obteniendo una pendiente promedio de 1,90%.

## Río Grande

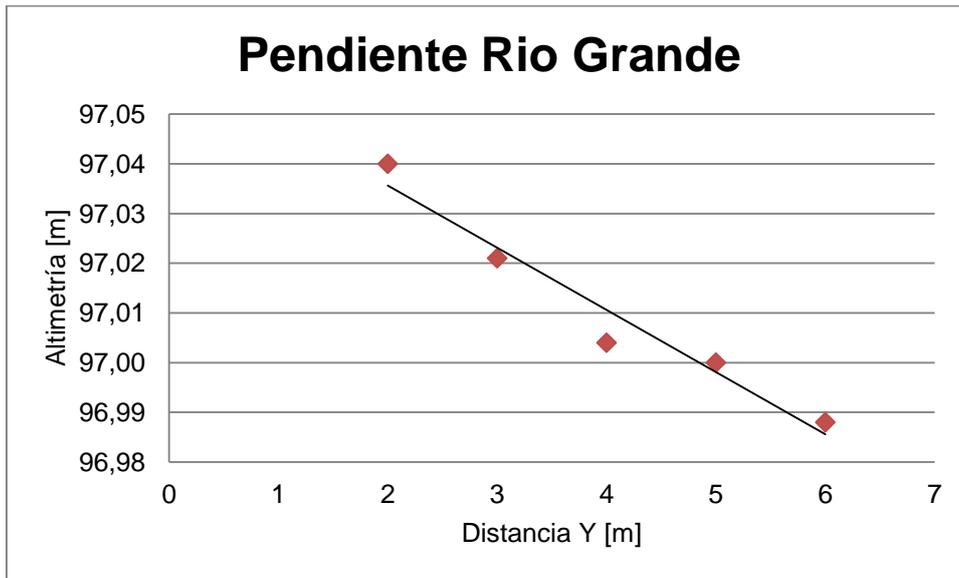


Figura 24: Pendiente longitudinal de Río Grande

En el gráfico se puede obtener una cierta linealidad en las mediciones, obteniendo una pendiente promedio de 1,30%.

## 3.2 Parámetros del sedimento

### 3.2.1 Granulometría

Se realizó la curva granulométrica del sedimento utilizado para poder obtener el diámetro  $d_{50}$ , los resultados son los mostrados en la Figura 25.

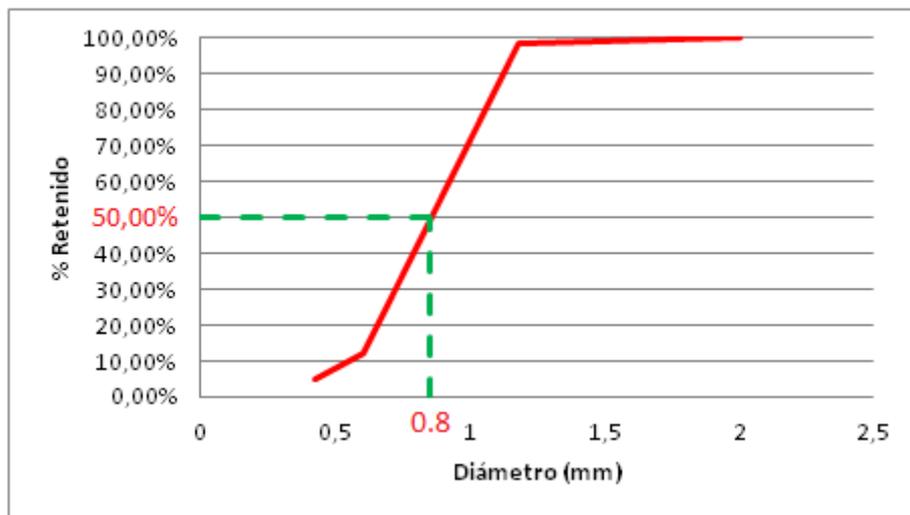


Figura 25: Curva granulométrica del sedimento en el modelo físico

Siendo el diámetro representativo:  $d_{50} = 0,8 \text{ mm}$

### 3.2.2 Peso específico

El peso propio de la partícula es la única fuerza estabilizante que mantiene a la misma en reposo. Se midió el peso específico del sedimento llenando un volumen conocido con sedimento y luego pesando el mismo para luego hacer la relación del peso y el volumen.

El parámetro obtenido es el peso específico saturado a superficie seca del sedimento. El valor medido es:

$$\gamma_s = 1850 \text{ Kg/m}^3.$$

### 3.3 Comparación de las fórmulas propuestas

Se cuantificaron las fórmulas de transporte de sedimentos propuestas utilizando los parámetros antes mencionados. De cada fórmula se obtuvo un caudal sólido para cada río asociado a diversos caudales líquidos, obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 26 y Figura 27.

#### Río Reyes

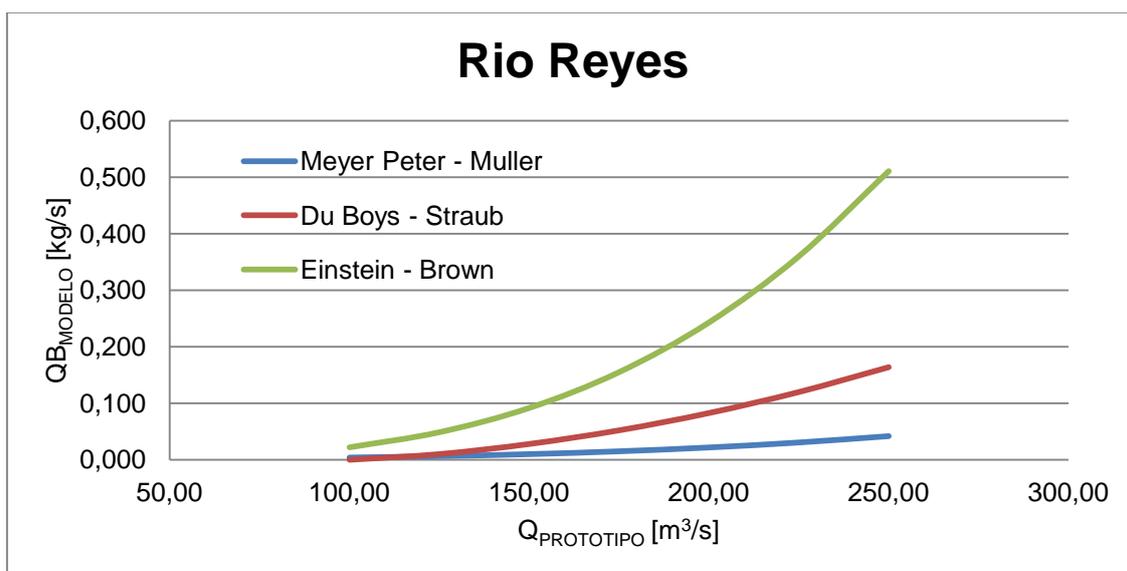


Figura 26: Comparación de las fórmulas de transporte para el Río Reyes

## Río Grande

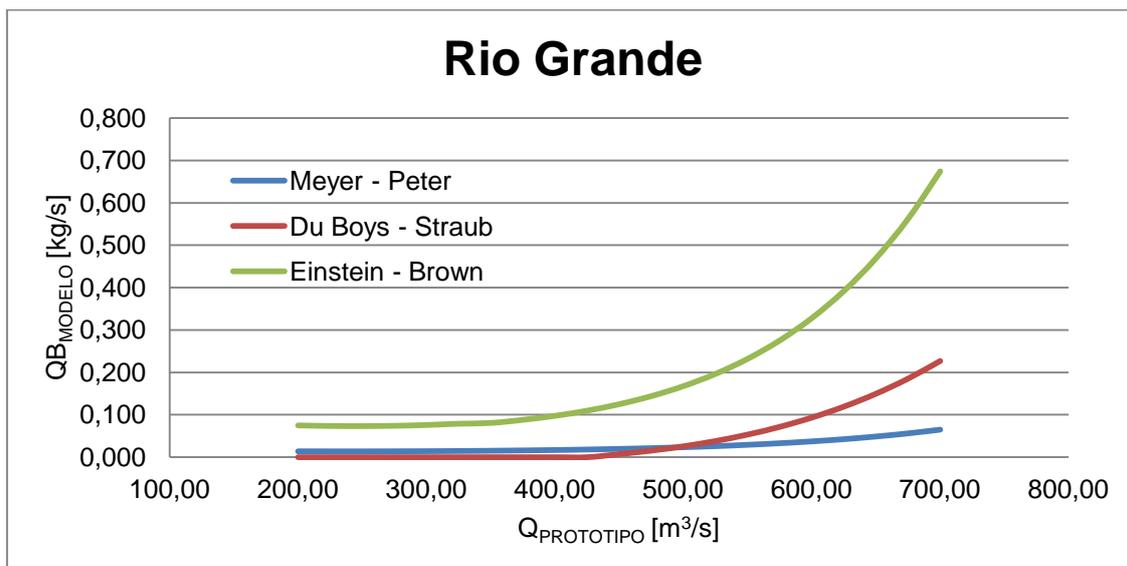


Figura 27: Comparación de las fórmulas de transporte para el Río Grande

A partir del análisis anterior se observa la discrepancia entre las fórmulas, por lo que se buscó un criterio para poder elegir la que más se adecúe a nuestro modelo.

### 3.3.1 Selección de la fórmula de transporte a aplicar

Para seleccionar la fórmula de transporte a utilizar, se ensayaron las dos políticas propuestas sin aporte de sedimentos y se calculó el volumen de arena erosionado en estos casos. Luego se simuló el transporte de sedimento con las fórmulas antes mencionadas (Figura 26 y Figura 27) para poder determinar cuál se ajustaba mejor a lo que se observó en el modelo físico y al volumen de sedimento calculado. Es importante mencionar que las tres fórmulas propuestas eran igualmente válidas en nuestro caso, por lo que el criterio de elección era puramente por experiencia y comparación de algún parámetro conocido.

En las Tabla 3 y Tabla 4 se resume la capacidad de transporte de sedimentos calculada para ambos ríos mediante cada fórmula según las dos políticas de manejo de compuertas.

Tabla 3: Tabla resumen transporte de sedimentos Política I

	Política de Manejo I			
	Meyer Peter - Muller [lt]	Du Boys - Straub [lt]	Einstein - Brown [lt]	Sin aporte [lt]
Río Reyes	30,0	58,0	171,7	
Río Grande	52,5	0,0	287,4	
<b>TOTAL</b>	82,5	58,0	459,1	145,0

**Tabla 4: Tabla resumen transporte de sedimentos Política II**

	Política de Manejo II			
	Meyer Peter - Muller [lt]	Du Boys - Straub [lt]	Einstein - Brown [lt]	Sin aporte [lt]
Río Reyes	38,4	129,5	408,0	
Río Grande	53,6	0,0	291,4	
<b>TOTAL</b>	92,0	129,5	699,4	115,0

Se pudo analizar que las dos fórmulas que menos discrepancias tienen con respecto al volumen de sedimentos transportado en el caso sin aportes son las de Meyer Peter – Muller y Du Boys – Straub. Con la fórmula de Einstein – Brown se obtuvieron valores de aportes de entre 2 y 5 veces más que los que se obtuvieron sin aportes, por lo que se la descartó.

En la fórmula de Du Boys – Straub se pudo ver que el caudal sólido transportado por el río Grande es nulo, esto es porque la tensión de corte en el fondo es menor que la tensión crítica para comenzar el movimiento de las partículas. Esto es irreal en la práctica así que también se descartó dicha fórmula.

*Por todo lo comentado anteriormente, se seleccionó la fórmula de Meyer Peter – Muller para de aplicación en nuestro modelo, ya que es la que se cree que mejor se ajusta a nuestro caso.*

Ecuación Meyer Peter –Muller.

La ecuación de Meyer – Peter y Müller para calcular el arrastre de la capa de fondo, fue obtenida a partir de experiencias realizadas de 1932 a 1948 en el Instituto Tecnológico Federal de Zúrich.

Es válida para sedimentos con los siguientes límites:

$$0.4\text{mm} < d_{50} < 30\text{mm}$$

$$1250\text{kg/m}^3 < \gamma_s < 4200\text{kg/m}^3$$

La expresión final es:

$$GB = b * \phi * \gamma_s * \sqrt{g * \Delta * d_{50}^3}$$

Donde:

**GB** = Caudal sólido en **Kg/s**

**Φ** = Es un parámetro de caudal sólido adimensional, o intensidad de transporte, que vale:

$$\phi = 8 * (\tau_*' - 0.047)^{3/2}$$

$\tau_*'$  = Es la tensión de corte adimensional debido únicamente a la fricción (rugosidad del grano) se determina a partir del procedimiento de Engelund – Hansen. Las expresiones son:

$$\tau_*' = 0,06 + 0,4 * \tau_*^2 \quad \text{Para Arenas}$$

$$\tau_*' = 0,06 + 0,3 * \tau_*^2 \quad \text{Para Gravas}$$

En este caso se utilizó la fórmula para arenas dada la granulometría del sedimento.

**b** = Ancho del cauce en **m**.

$\gamma_s$  = Es el peso específico del sedimento. En este caso lo medimos dando un valor de **1850Kg/m<sup>3</sup>**.

**g** = aceleración de la gravedad (**9,81 m/s<sup>2</sup>**).

$\Delta$  = Peso específico sumergido relativo del sedimento. En este caso es de **0.85**.

$d_{50}$  = Diámetro característico del sedimento. Diámetro del tamiz en “m” en el cual queda retenido el 50% del material. En este caso es de **0,0008 m**.

### **3.4 Procedimientos de apertura de compuertas con aporte de sedimentos en forma manual (semidiscreta)**

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos por Marassa (2013) realizando las mismas operaciones de apertura de compuertas propuestas inicialmente sin aporte de sedimentos, pero en este caso teniendo en cuenta un caudal sólido obtenido mediante la fórmula seleccionada Meyer Peter – Müller. El aporte de sedimentos se realizó de forma semidiscreta. Para ello se calculó el volumen total de sólido aportado en una hora de ensayo para cada río (Tabla 3 y Tabla 4) y se discretizó en intervalos de 5 minutos para arrojar el material uniformemente de forma manual.

#### **3.4.1 Política de operación I: Esperar la crecida con las compuertas cerradas**

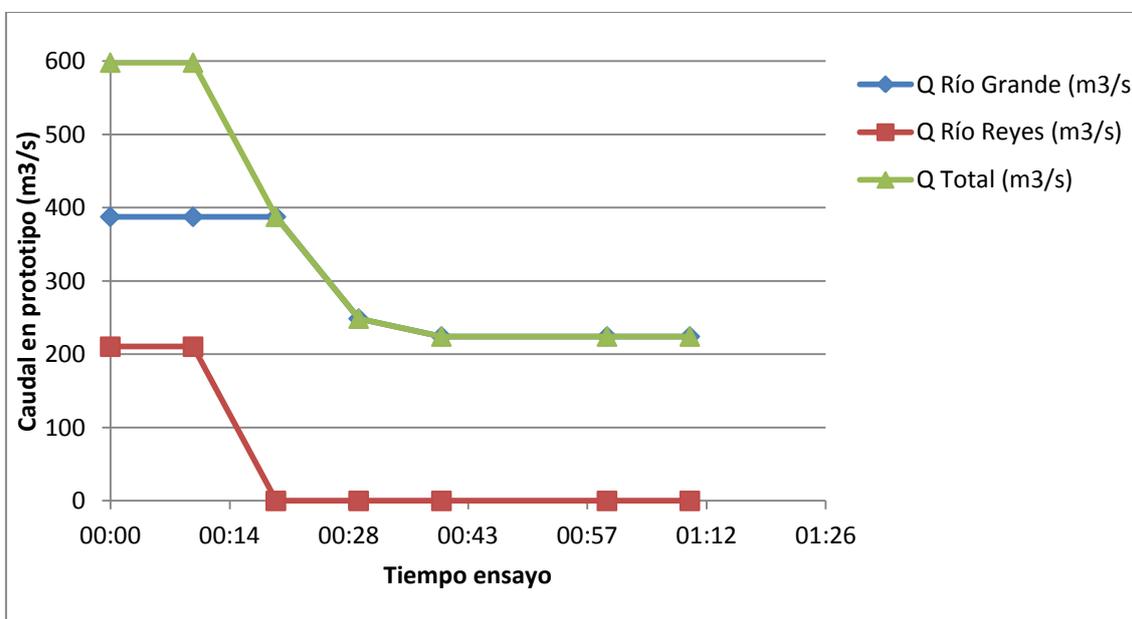
En este caso, a partir de los 20 minutos de ensayo, el caudal en el río Reyes disminuye hasta tal punto que es complicado derivarlo por ese cauce en el modelo, por lo que todo se proporciona por el río Grande, habiendo un aumento en el caudal de sólido de aporte. Esta particularidad en el ensayo se debe a que todo el sólido, tanto el del río Reyes como el del río Grande, será aportado en el cauce de este último, debido a la dificultad en el manejo de las bombas para proporcionar caudales menores a 100 m<sup>3</sup>/s por el río Reyes. Los caudales líquidos y sólidos de ensayo de cada río se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5: Aporte de sedimento esperando la crecida con compuertas cerradas**

Tiempo ensayo [min]	Q <sub>PROTOTIPO</sub> [m <sup>3</sup> /s]				TOTAL	Q <sub>SOLIDO</sub> [lt/s]	
	Que sale por el modelo		Que debería salir			Río Reyes	Río Grande
	Río Reyes	Río Grande	Río Reyes	Río Grande			
0	210	390	210	390	600,00	0,025	0,016
10	210	390	210	390	600,00	0,025	0,016
20	0	390	137	254	390,00	0,000	0,022
30	0	250	88	163	250,00	0,000	0,017
40	0	225	79	146	225,00	0,000	0,017
60	0	225	79	146	225,00	0,000	0,017

Tal como dicta el estudio hidrológico realizado sobre la cuenca por la Universidad Nacional de La Plata en el año 1970, el 65% del caudal total es proveniente del río Grande y el 35% restante proviene del río Reyes.

El hidrograma de la Figura 28 es el que se utilizó tanto para los ensayos sin y con aporte de sedimentos. En el hidrograma se observa no sólo el caudal total, sino el derivado por el río Grande y el río Reyes para cada tiempo de ensayo.



**Figura 28: Hidrograma medio anual esperando la crecida con compuertas cerradas**

En la Figura 29 se muestra el flujograma del ensayo en el que se esperó la crecida con las compuertas cerradas. Se observa, como se comentó anteriormente, que a los 20 minutos de ensayo el caudal sólido del río Reyes se hace nulo (no se proporciona más

agua en ese curso), mientras que en el río Grande existe un aumento en el caudal sólido (se proporciona todo el caudal, tanto líquido como sólido, por ese cauce).

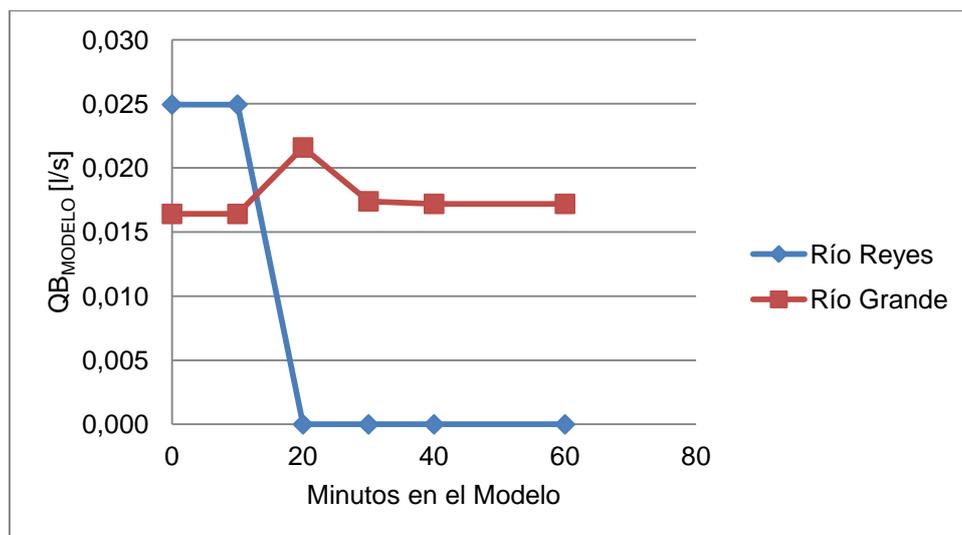


Figura 29: Flujograma para el hidrograma esperando la crecida con compuertas cerradas

### 3.4.2 Política de operación II: Esperar la crecida con las compuertas abiertas

Análogamente a lo mencionado en el punto anterior, se realizó el mismo análisis para esta política de operación. En la Tabla 6 se tienen los caudales ensayados con su correspondiente caudal sólido. En la tabla se observa que todo el caudal, tanto sólido como líquido, se proporciona por el río Grande a partir de los 50 minutos.

Tabla 6: Aporte de sedimento esperando la crecida con compuertas abiertas

Tiempo ensayo [s]	Q <sub>PROTOTIPO</sub> [m <sup>3</sup> /s]					Q <sub>SOLIDO</sub> [lt/s]	
	Que sale por el modelo		Que debería salir		TOTAL	Río Reyes	Río Grande
	Río Reyes	Río Grande	Río Reyes	Río Grande			
0	210,00	390,00	210	390	600,00	0,025	0,016
15	210,00	390,00	210	390	600,00	0,025	0,016
20	210,00	388,00	209	389	598,00	0,025	0,016
25	168,00	308,00	167	309	476,00	0,013	0,014
32	99,00	197,00	104	192	296,00	0,004	0,014
39	99,00	197,00	104	192	296,00	0,004	0,014
44	99,00	197,00	104	192	296,00	0,004	0,014
50	0,00	152,00	53	99	152,00	0,000	0,018

Tiempo ensayo [s]	Q <sub>PROTOTIPO</sub> [m <sup>3</sup> /s]					Q <sub>SOLIDO</sub> [lt/s]	
	Que sale por el modelo		Que debería salir		TOTAL	Río Reyes	Río Grande
	Río Reyes	Río Grande	Río Reyes	Río Grande			
55	0,00	134,00	47	87	134,00	0,000	0,018
60	0,00	134,00	47	87	134,00	0,000	0,018

El hidrograma de la Figura 30 es el mismo que se utilizó tanto para el ensayo sin como con aporte de sedimentos. Análogamente a la anterior política, cuando se dificulta el manejo de las bombas en el modelo para la proporción de caudales bajos en el río Reyes, se optó por derivar todo el flujo por el río Grande.

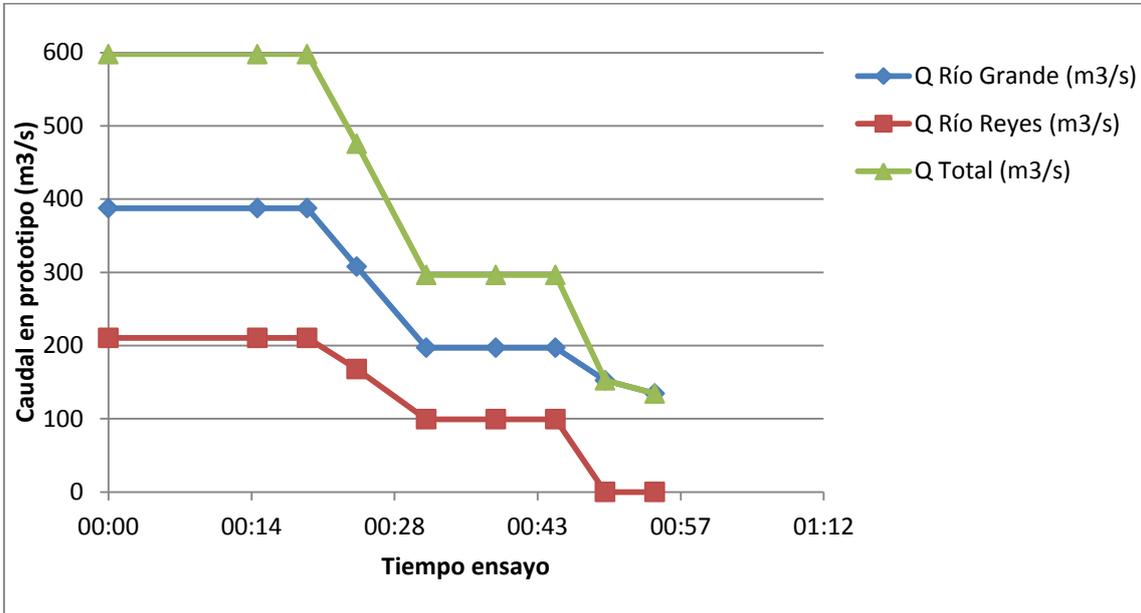


Figura 30: Hidrograma medio anual esperando la crecida con compuertas abiertas

En la Figura 31 se observa el flujograma utilizado durante los ensayos en los que se esperó la crecida con compuertas abierta. Por el mismo criterio explicado anteriormente, el caudal sólido en el río Reyes se hace nulo a los 50 minutos, y eso genera el aumento en el caudal sólido del río Grande.

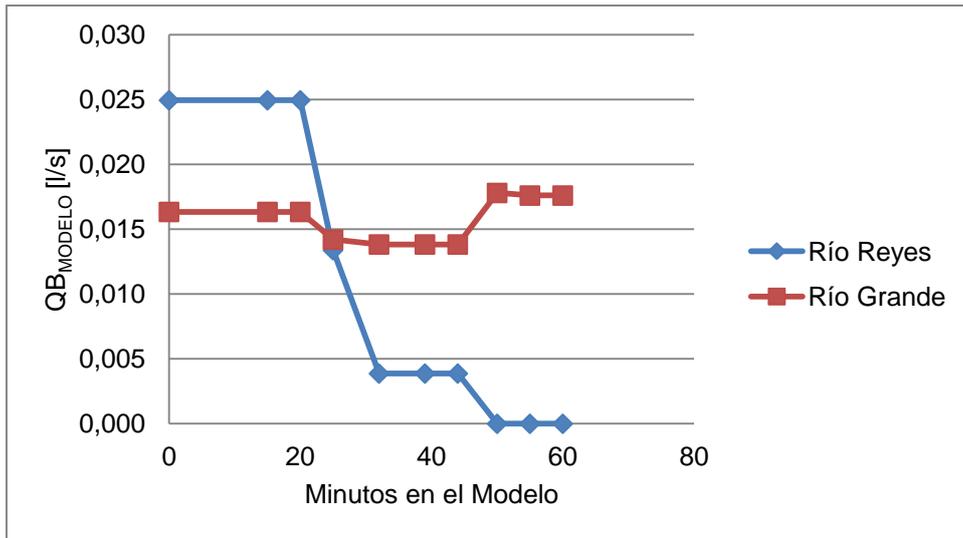


Figura 31: Flujograma para el hidrograma esperando la crecida con compuertas abiertas

Los resultados obtenidos en los flujogramas son de utilidad para conocer la cantidad de material sólido que se debe aportar en el momento de realizar los ensayos, de acuerdo al caudal líquido que es suministrado en cada instante.

Como se presentó cierta dificultad para proporcionar un flujograma constante para alimentar a los ríos con sedimentos, se optó por escalonarlo cada 5 minutos y arrojar el volumen de sedimentos especificado de forma discreta.

Debido a las limitaciones a la hora de aportar los sedimentos de forma manual y semidiscreta, en el presente trabajo se utilizaron dos tolvas vibratorias, mediante las cuales se aportarán sedimentos tanto al río Reyes como al Grande durante los ensayos. El empleo de estos mecanismos tiene la ventaja de que el aporte se realiza de forma continua y distribuida, asemejándose lo mejor posible a un caso real de prototipo, teniendo en cuenta las hipótesis del modelo.

## **4 CALIBRACIÓN DE LAS TOLVAS**

### **4.1 Principio de funcionamiento de las tolvas**

Como se comentó anteriormente, el aporte de sedimentos en nuestro caso se realizó con la utilización de tolvas vibratorias. A continuación se describe como están compuestas:

- ✓ Recipiente de forma trapezoidal. Sus dimensiones son de 0,22 m en su lado mayor, 0,10 m en su lado menor y 0,20 m en altura. El largo de la tolva chica es de 1,20 m, mientras que el largo de la tolva grande es de 2,00 m. Estos recipientes son las tolvas propiamente dichas y es en donde se carga el material. La parte inferior y lateral tiene orificios de 2 mm de diámetro por donde se cae el sedimento. (Ver Figura 32).



**Figura 32: Tolva trapezoidal vibratoria**

- ✓ Mecanismo de nivelación. Cada tolva dispone de cuatro roscas sinfín con las cuales se logra realizar una nivelación horizontal, de forma que la distribución del material sea parejo dentro del recipiente. (Ver Figura 33).



**Figura 33: Tornillos de nivelación de tolva**

- ✓ Motor de vibración. Es un motor eléctrico conectado a un circuito trifásico. Dispone de una excentricidad regulable que permite corregir la velocidad de vibración. (Ver Figura 34).



**Figura 34: Motor vibratorio de excentricidad regulable**

- ✓ Soporte de la tolva. Consiste en dos soportes de hierro por tolva de dos patas cada uno, los cuales son regulables en altura para que apoyen en forma conjunta sobre la superficie. (Ver Figura 35).



**Figura 35: Soporte de las tolvas**

- ✓ Celda de carga. Cada tolva cuenta con dos celdas de carga con su correspondiente display para pesar la cantidad de sedimento con que se carga la tolva al inicio del ensayo y con cuanto se dispone al finalizar el mismo. (Ver Figura 36).



**Figura 36: Celda de carga**

El principio de funcionamiento de las tolvas es mediante la vibración del recipiente en el cual se encuentra el sedimento de aporte. Para el correcto funcionamiento es necesario armar correctamente cada componente, de manera que su comportamiento sea el mismo para cada ensayo de calibración. Este armado consiste en colocar las tolvas en sus soportes, nivelarlas en forma longitudinal y transversal mediante los tornillos sinfín y un nivel de mano y por último fijarlas con contratueras de manera que no se pierda rendimiento del motor durante su funcionamiento. En la Figura 37 se muestra una de las tolvas lista para funcionar.



Figura 37: Tolva vibratoria armada sobre el cauce del río en el modelo físico

Se dispone de una tolva chica para realizar el aporte de sedimentos en forma continua sobre el cauce del río Grande y otra tolva mas grande para utilizarla sobre el caudal del río Reyes en el modelo físico.

## 4.2 Caudales sólidos necesarios

Como se comentó en la sección 3.3.1 y según los ensayos realizados por Marassa (2013), el caudal sólido de aporte se determinó mediante la ecuación de Meyer – Peter y Müller, ya que es la que mejor se ajusta a nuestro caso.

### 4.2.1 Política de operación I: Esperar la crecida con las compuertas cerradas

A partir del flujograma de la Figura 29 los caudales necesarios son:

Tabla 7: Caudales sólidos necesarios si se espera la crecida con compuertas cerradas

Tiempo ensayo [s]	Q <sub>SOLIDO</sub> [lt/s]	
	Río Reyes	Río Grande
0	0,025	0,016
10	0,025	0,016
20	0,000	0,022
30	0,000	0,017
40	0,000	0,017
60	0,000	0,017

El aumento en el caudal sólido del río Grande a los 20 minutos corresponde, como se explicó anteriormente, al sólido de aporte total (el del río Reyes y el del río Grande).

## 4.2.2 Política de operación II: Esperar la crecida con las compuertas abiertas

De la misma forma que en el punto anterior, en este caso se utilizó el flujograma de la Figura 31.

Tabla 8: Caudales sólidos necesarios si se espera la crecida con compuertas abiertas

Tiempo ensayo [s]	Q <sub>SOLIDO</sub> [lt/s]	
	Río Reyes	Río Grande
0	0,025	0,016
15	0,025	0,016
20	0,025	0,016
25	0,013	0,014
32	0,004	0,014
39	0,004	0,014
44	0,004	0,014
50	0,000	0,018
55	0,000	0,018
60	0,000	0,018

A partir de los 50 minutos en modelo todo el caudal, tanto sólido como líquido, se proporciona por el río Grande.

Se observa que en ambos casos el río Reyes tiene un transporte de sedimento máximo (0,025 lt/s) mayor que el del río Grande (0,022 lt/s), por más que el caudal de agua sea más grande en este último. Esta particularidad es debido a que la tensión de corte crítica  $\tau_0$  que genera el flujo de fondo es proporcional a la pendiente longitudinal del cauce, siendo la del río Reyes (1,90%) mayor que la del río Grande (1,30%).

## 4.3 Calibración de las tolvas vibratorias

Los caudales sólidos necesarios son los que se especificaron en las tablas de la sección 4.2. Para determinar cómo se pueden suministrar dichos caudales se procedió a una calibración de las tolvas. Este procedimiento se realizó en forma independiente en cada una de las tolvas.

La calibración consistió en disponer una cierta cantidad de arena y cuantificar cuánto fue el volumen pasante por el tamiz de la tolva en un tiempo determinado. Para analizar la sensibilidad de la erogación de la tolva en el tiempo, se analizó el volumen pasante a través de la misma para 1 minuto, 2 minutos, 3 minutos, 5 minutos y 10 minutos. En cada caso se juntó la arena caída y se midió su altura (h) en un recipiente de diámetro conocido ( $d = 0,24\text{m}$ ) que a partir de él es posible conocer el volumen de sedimento erogado (ver Figura 38). Luego conociendo la cantidad pasante en cierto tiempo se determinó el caudal sólido (lt/s).



**Figura 38: Medición de volumen de arena para calibración**

En un principio se utilizó la arena con su humedad natural, ya que se sabe que la humedad influye en la cantidad pasante por el tamiz de la tolva. Al ir obteniendo los caudales sólidos con esta arena se verificó que el orden de magnitud de los mismos era cercano al de los necesarios para los ensayos, por lo que se continuó el estudio con el material en este estado.

Luego de realizar este ensayo con las dos tolvas, se calculó el caudal sólido máximo erogable por cada uno de estos instrumentos. Como se necesitaban diferentes caudales sólidos se decidió limitar el ancho de aporte de las tolvas para así regular fácilmente el volumen de sedimentos pasante en el tiempo.

Entonces, para hacer variar la cantidad de sedimento aportante, se limitó el ancho de aporte de las tolvas con un separador de polipropileno de  $\frac{1}{2}$ " de espesor (ver Figura 39). Luego de varias pruebas se pudo evaluar la variación del caudal sólido con el ancho aportante de las tolvas y así se fueron obteniendo los diferentes caudales sólidos buscados. (Ver Figura 40).



**Figura 39: Vista frontal del limitador de aporte de sedimento**



**Figura 40: Vista lateral del limitador de aporte de sedimento**

### 4.3.1 Resultados con la tolva chica

Al utilizar el ancho total de la tolva (1,20 m), el caudal sólido obtenido para diferentes tiempos de ensayo se observa en la Tabla 9.

**Tabla 9: Caudales sólidos con abertura de tolva chica 1,20 m y arena con humedad natural**

Ancho abierto de la tolva		1,20 m		
Tiempo [min]	Tiempo [seg]	h [cm]	V [m3]	Qs [lt/s]
1	60	1,9	0,00085954	0,014
2	120	2,9	0,00131193	0,011
3	180	5,4	0,00244290	0,014
5	300	9,2	0,00416198	0,014
10	600	19,2	0,00868588	0,014
<b>PROMEDIO</b>				0,013

Al evaluar que el caudal máximo erogable por esta tolva utilizando humedad natural era de esta magnitud, se concluye que fue insuficiente para el aporte al río Reyes ( $Q_{s_{max}} = 0,025$  lt/s). Es por ello se decidió ajustar esta tolva al río Grande. Tal como se explicó en la sección 4.2 los caudales sólidos necesarios en el río Grande son: 0,022 lt/s; 0,018 lt/s; 0,017 lt/s; 0,016 lt/s y 0,014 lt/s. Como con el ensayo realizado con la tolva chica se obtuvo 0,013 lt/s y esta cifra es muy cercana a 0,014 lt/s, los caudales que faltan calibrar en esta tolva son: 0,022 lt/s; 0,018 lt/s; 0,017 lt/s y 0,016 lt/s. La alternativa más sencilla para lograr esto consiste en hacer variar la humedad de la arena. Por ello se uso arena menos húmeda y al analizar qué pasa si todo el ancho aporta sedimento (o sea 1,20 m) se obtuvo lo siguiente:

**Tabla 10: Caudales sólidos con abertura de tolva chica 1,20 m y humedad de arena moderada**

Ancho abierto de la tolva		1,20 m		
Tiempo [min]	Tiempo [seg]	h [cm]	V [m3]	Qs [lt/s]
1	60	3,3	0,00149288	0,025
2	120	5,9	0,00266910	0,022
3	180	8,3	0,00375483	0,021
5	300	12,9	0,00583582	0,019
10	600	20,8	0,00940970	0,016
<b>PROMEDIO</b>				0,021

Con este último ensayo se puede alcanzar el caudal necesario de 0,022 lt/s, siendo faltantes a calibrar 0,018 lt/s; 0,017 lt/s y 0,016 lt/s. Para ello se decidió acortar el ancho colaborante de la tolva (1,00 m) usando esta última arena que es un poco más seca que la natural. Los resultados de este ensayo se muestran en la Tabla 11.

**Tabla 11: Caudales sólidos con abertura de tolva chica 1,00 m y humedad de arena moderada**

Ancho abierto de la tolva		1,00 m		
Tiempo [min]	Tiempo [seg]	h [cm]	V [m3]	Qs [lt/s]
1	60	2,8	0,00126669	0,021
2	120	5,1	0,00230719	0,019
3	180	7,5	0,00339292	0,019
5	300	11,9	0,00538343	0,018
10	600	19,1	0,00864064	0,014
<b>PROMEDIO</b>				0,018

Con esta metodología se pueden cubrir los caudales sólidos 0,018 lt/s; 0,017 lt/s y 0,016 lt/s.

Una conclusión importante es que la variación de los caudales sólidos en el tiempo es poco significativa. Al principio siempre eroga un poco más y luego se estabiliza en el tiempo. En nuestro trabajo el caudal usado para calibrar el instrumento es el promedio del obtenido para los diferentes tiempos.

En resumen, para aportar los caudales necesarios en el río Grande se propuso la siguiente metodología:

**Tabla 12: Resumen de aporte de sedimentos con tolva chica**

Qs <sub>necesario</sub> [lt/s]	Qs <sub>alcanzado</sub> [lt/s]	Humedad arena	Ancho colaborante [m]
0,022	0,021	Reducida	1,20
0,018	0,018	Reducida	1,00
0,017	0,018	Reducida	1,00
0,016	0,018	Reducida	1,00
0,014	0,013	Natural	1,20

### 4.3.2 Resultados con la tolva grande

Debido a los resultados mostrados anteriormente, esta tolva se calibrará para que aporte al río Reyes. Análogamente a las pruebas realizadas con la tolva chica, se realizó el mismo análisis con la tolva grande, obteniendo los siguientes resultados:

En primer lugar se analizó el máximo caudal sólido erogable por la tolva con arena con humedad natural y ancho colaborante total (2,00 m). (Ver Tabla 13).

**Tabla 13: Caudales sólidos con abertura de tolva grande 2,00 m**

Ancho abierto de la tolva		2,00 m		
Tiempo [min]	Tiempo [seg]	h [cm]	V [m3]	Qs [lt/s]
1	60	7,6	0,00343816	0,057
2	120	12,3	0,00556439	0,046
3	180	18,3	0,00827872	0,046
5	300	27,5	0,01244071	0,041
10	600	49,8	0,02252899	0,038
<b>PROMEDIO</b>				0,046

Aquí se observa que el caudal sólido es excesivo para el caso en estudio ya que el caudal máximo necesario por el río Reyes (que es el que más aporta) es 0,025 lt/s. Como los caudales necesarios son 0,025 lt/s; 0,013 lt/s y 0,004 lt/s, se buscó alcanzar dichos valores limitando el ancho colaborante de la tolva. A continuación, de la Tabla 14 a la Tabla 20 se observan los caudales sólidos obtenidos para diferentes tiempos de ensayo cambiando el ancho colaborante.

**Tabla 14: Caudales sólidos con abertura de tolva grande 1,30 m**

Ancho abierto de la tolva		1,30 m		
Tiempo [min]	Tiempo [seg]	h [cm]	V [m3]	Qs [lt/s]
1	60	4,2	0,00190004	0,032
2	120	7,3	0,00330244	0,028
3	180	9,9	0,00447865	0,025
5	300	14,1	0,00637869	0,021
10	600	22,9	0,01035972	0,017
<b>PROMEDIO</b>				0,025

**Tabla 15: Caudales sólidos con abertura de tolva grande 1,10 m**

Ancho abierto de la tolva		1,10 m		
Tiempo [min]	Tiempo [seg]	h [cm]	V [m3]	Qs [lt/s]
1	60	3,8	0,00171908	0,029
2	120	6,8	0,00307625	0,026
3	180	9,5	0,00429770	0,024
5	300	14,9	0,00674060	0,022
10	600	25,3	0,01144545	0,019
<b>PROMEDIO</b>				0,024

**Tabla 16: Caudales sólidos con abertura de tolva grande 0,80 m**

Ancho abierto de la tolva		0,80 m		
Tiempo [min]	Tiempo [seg]	h [cm]	V [m3]	Qs [lt/s]
1	60	2,4	0,00108573	0,018
2	120	4,7	0,00212623	0,018
3	180	6,4	0,00289529	0,016
5	300	9,0	0,00407150	0,014
10	600	13,4	0,00606202	0,010
<b>PROMEDIO</b>				0,015

**Tabla 17: Caudales sólidos con abertura de tolva grande 0,70 m**

Ancho abierto de la tolva		0,70 m		
Tiempo [min]	Tiempo [seg]	h [cm]	V [m3]	Qs [lt/s]
1	60	2,1	0,00095002	0,016
2	120	3,5	0,00158336	0,013
3	180	5,0	0,00226195	0,013
5	300	7,3	0,00330244	0,011
10	600	10,5	0,00475009	0,008
<b>PROMEDIO</b>				0,012

**Tabla 18: Caudales sólidos con abertura de tolva grande 0,60 m**

Ancho abierto de la tolva		0,60 m		
Tiempo [min]	Tiempo [seg]	h [cm]	V [m3]	Qs [lt/s]
1	60	1,6	0,00072382	0,012
2	120	2,8	0,00126669	0,011
3	180	3,9	0,00176432	0,010
5	300	5,3	0,00239766	0,008
10	600	8,9	0,00402627	0,007
<b>PROMEDIO</b>				0,009

**Tabla 19: Caudales sólidos con abertura de tolva grande 0,20 m**

Ancho abierto de la tolva		0,20 m		
Tiempo [min]	Tiempo [seg]	h [cm]	V [m3]	Qs [lt/s]
1	60	0,7	0,00031667	0,005
2	120	1,5	0,00067858	0,006
3	180	2,1	0,00095002	0,005
5	300	3,3	0,00149288	0,005
10	600	5,8	0,00262386	0,004
<b>PROMEDIO</b>				0,005

**Tabla 20: Caudales sólidos con abertura de tolva grande 0,05 m**

Ancho abierto de la tolva		0,05 m		
Tiempo [min]	Tiempo [seg]	h [cm]	V [m3]	Qs [lt/s]
1	60	0,3	0,00013572	0,002
2	120	0,6	0,00027143	0,002
3	180	0,8	0,00036191	0,002
5	300	1,2	0,00054287	0,002
10	600	2,1	0,00095002	0,002
<b>PROMEDIO</b>				0,002

Se observa en los caudales promedios que limitando el ancho de la tolva con el separador mencionado anteriormente (ver Figura 40), se puede modificar el aporte de sólidos de acuerdo a lo necesario en cada caso. La relación entre la abertura de la tolva y el caudal de sólido se puede ver en la Figura 41.

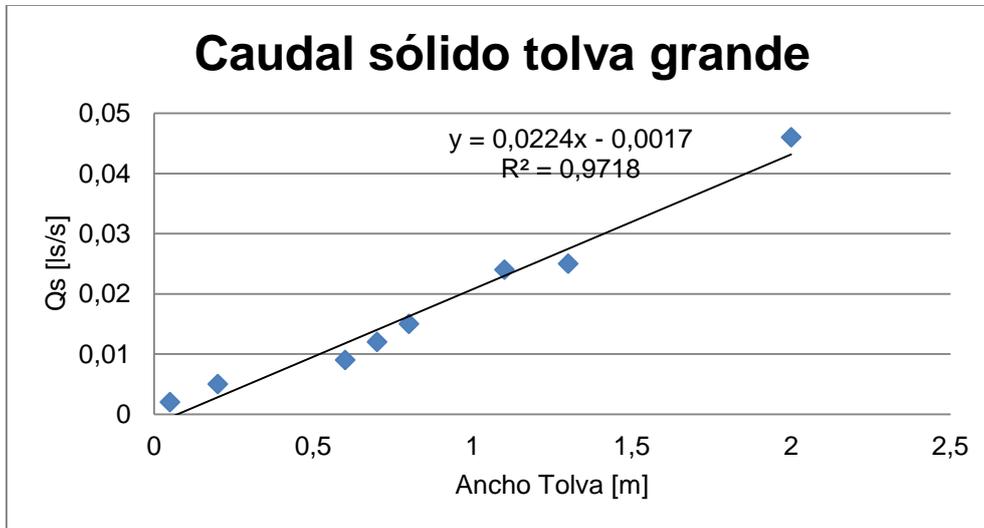


Figura 41: Relación ancho de tolva grande Vs Caudal sólido

En la Figura 42 se puede ver una imagen de la utilización de ambas tolvas vibratorias en un ensayo hidrosedimentológico. Como se dijo anteriormente, la tolva de mayor tamaño aporta sedimentos al río Reyes, mientras que la tolva menor aporta sedimentos al río Grande.



Figura 42: Ensayo hidrosedimentológico en el modelo físico del Dique Los Molinos

#### 4.4 Estimación del peso específico de la arena utilizada

Como se mencionó en el Capítulo 3, uno de los parámetros necesarios para calcular el caudal sólido transportado en la capa de fondo mediante la ecuación de Meyer – Peter y Muller, es el peso específico de saturación del material transportado.

Para verificar que el peso específico de la arena utilizada en los ensayos haya sido bien calculada por Marassa en su trabajo presentado en 2013, se utilizaron dos celdas de carga que miden con precisión el peso de la arena con que se trabaja.

Por otro lado, además de obtener el peso específico de saturación de la arena utilizada, también se calculó el peso específico de la arena con humedad natural. Cabe mencionar que este valor es solo representativo, ya que en nuestro caso la variación de éste peso específico no influyó considerablemente en los caudales erogados por las tolvas.

El procedimiento realizado consistió en tener un volumen de arena conocido y pesarlo mediante las celdas de carga en las tolvas (ver Figura 43). Luego se hizo vibrar cada una de las tolvas por 10 minutos y se midió el volumen pasante. La arena retenida en las tolvas fue pesada y conociendo el volumen inicial y el pasante se obtuvo el volumen retenido. Por último, se pesó la arena caída durante la vibración para poder determinar los pesos específicos en cada caso. Este procedimiento se hizo tanto para la arena con humedad natural (que fue la utilizada en las pruebas de calibración) como con humedad de saturación (necesaria para calibrar la ecuación Meyer – Peter y Müller y que fue calculada por Marassa).



Figura 43: Display de celdas de carga al iniciar ensayo

En cada extremo de la tolva se colocó una celda de carga como muestra la Figura 44.



**Figura 44: Celda de carga instalada en tolva**

Para el peso específico con humedad natural se utilizó arena que se mantuvo acopiada bajo techo durante los ensayos para que su condición de humedad no variara, mientras que para obtener la humedad saturada se hidrató un volumen conocido de arena procurando no sumergir la arena en agua (si no se obtiene el peso específico sumergido), sino solo saturarla.

Si bien la humedad de la arena de aporte es una variable a controlar durante los ensayos, se considera que debido a la complejidad del sistema a representar, esta variable se encuentra en el orden de error de un caso de hidráulica fluvial.

#### 4.4.1 Peso específico natural

Este ensayo se realizó solo con la tolva chica. En la Tabla 21 se muestran los volúmenes obtenidos:

**Tabla 21: Volúmenes para peso específico de arena natural**

	h [cm]	V [m3]	V [lt]
Inicial arena en Tolva	40,0	0,02	18,10
Arena pasante de la tolva luego de 10 min de ensayo	12,5	0,01	5,65
Final arena en Tolva	27,50	0,01	12,44

En la Tabla 22 se puede ver los pesos inicial, pasante y retenido y en el ensayo realizado. El peso total en cada caso se obtiene de sumar los valores en cada celda de carga dispuesta en los extremos de la tolva.

**Tabla 22: Pesos para peso específico de arena natural**

	Celda 1 [KN]	Celda 2 [KN]	TOTAL [KN]	TOTAL [Kg]
Inicial arena en Tolva	103,6	108,2	211,8	21,60
Arena pasante de la tolva luego de 10 min de ensayo	36,1	31,9	68,0	6,93
Final arena en Tolva	66,1	76,8	142,9	14,57

En la Tabla 23 se muestra el peso específico inicial en la tolva, el de la arena pasante y el de la arena retenida (que deberían ser similares por ser todos de la misma arena). Por último se tiene un peso específico promedio con humedad natural.

**Tabla 23: Pesos específicos de arena natural**

	$\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Inicial arena en Tolva	1193,61
Arena pasante de la tolva luego de 10 min de ensayo	1226,29
Final arena en Tolva	1171,37
<b>PROMEDIO</b>	<b>1197,09</b>

#### 4.4.2 Peso específico saturado

El ensayo con humedad de saturación se realizó tanto con la tolva chica como con la tolva grande.

##### Tolva chica

Los volúmenes inicial, pasante y retenido son mostrados en la Tabla 24 y los respectivos pesos en la Tabla 25.

**Tabla 24: Volúmenes para peso específico de arena saturada con tolva chica**

	h [cm]	V [m <sup>3</sup> ]	V [lt]
Inicial arena en Tolva	26,3	0,01	11,90
Arena pasante de la tolva luego de 10 min de ensayo	7,5	0,00	3,39
Final arena en Tolva	18,80	0,01	8,50

**Tabla 25: Pesos para peso específico de arena saturada con tolva chica**

	Celda 1 [KN]	Celda 2 [KN]	TOTAL [KN]	TOTAL [Kg]
Inicial arena en Tolva	99,8	105,7	205,5	20,96
Arena pasante de la tolva luego de 10 min de ensayo	40,5	16,5	57,0	5,81
Final arena en Tolva	69,3	73,0	142,3	14,51

En la Tabla 26 se muestra el peso específico inicial, con la arena pasante y con la arena retenida. Por último se tiene un peso específico promedio con humedad de saturación.

**Tabla 26: Pesos específicos de arena saturada con tolva chica**

	$\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Inicial arena en Tolva	1761,37
Arena pasante de la tolva luego de 10 min de ensayo	1713,21
Final arena en Tolva	1706,25
<b>PROMEDIO</b>	<b>1726,94</b>

### Tolva grande

Los volúmenes inicial, pasante y retenido son mostrados en la Tabla 27 y los respectivos pesos en la Tabla 28.

**Tabla 27: Volúmenes para peso específico de arena saturada con tolva grande**

	h [cm]	V [m <sup>3</sup> ]	V [lt]
Inicial arena en Tolva	38,4	0,02	17,37
Arena pasante de la tolva luego de 10 min de ensayo	8,3	0,00	3,75
Final arena en Tolva	30,1	0,01	13,62

**Tabla 28: Pesos para peso específico de arena saturada con tolva grande**

	Celda 1 [KN]	Celda 2 [KN]	TOTAL [KN]	TOTAL [Kg]
Inicial arena en Tolva	158,3	139,0	297,3	30,32
Arena pasante de la tolva luego de 10 min de ensayo	38,0	25,0	63,0	6,42
Final arena en Tolva	114,2	113,4	227,6	23,21

En la Tabla 29 se muestra el peso específico inicial, con la arena pasante y con la arena retenida. Por último se tiene un peso específico promedio con humedad de saturación.

**Tabla 29: Pesos específicos de arena saturada con tolva grande**

	$\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Inicial arena en Tolva	1745,26
Arena pasante de la tolva luego de 10 min de ensayo	1711,03
Final arena en Tolva	1704,52
<b>PROMEDIO</b>	<b>1720,27</b>

Con estos resultados se observa, como era de esperar, que el peso específico natural es menor que el de peso específico saturado, siendo este último el máximo posible con cualquier material.

Además, analizando los valores obtenidos en cada tolva, los pesos específicos con humedad de saturación son similares con ambas, arrojando una diferencia de menos de 0,4%.

Por otro lado, si se comparan los pesos específicos determinados por Marassa en el año 2013 (1850 kg/m<sup>3</sup>) mediante una balanza convencional y los obtenidos con las celdas de carga, la diferencia no es de mayor consideración teniendo en cuenta que es menor a 6,7%.

## 5 ENSAYOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS DE LAS POLÍTICAS DE OPERACIÓN CON APOORTE DE SEDIMENTOS DE FORMA CONTINUA

En este capítulo se presentan los resultados de dos ensayos hidrosedimentológicos evaluando los procedimientos de aperturas de compuertas descritos en el Capítulo 2 y considerando los aportes de sedimentos de forma continua según la fórmula de Meyer Peter - Muller.

### 5.1 Política de operación I: Esperar la crecida con las compuertas cerradas

En este caso el manejo de las compuertas se realizó según las etapas vistas en la Tabla 1. Los caudales tanto líquidos como sólidos ensayados en el modelo fueron los tabulados en la Tabla 5. Se modeló con el mismo hidrograma con el cual se ensayó sin aporte de sedimentos y con aporte manual (ver Figura 28).

Al mismo tiempo, durante la realización del ensayo, se tomaron 5 puntos de referencia aguas arriba del dique. Dichos puntos se seleccionaron sobre el centro de cada compuerta y el centro del CM y fueron utilizados para evaluar la variación de cota de fondo y la consecuente evolución y descenso del lecho a lo largo del tiempo. (Ver Figura 45; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

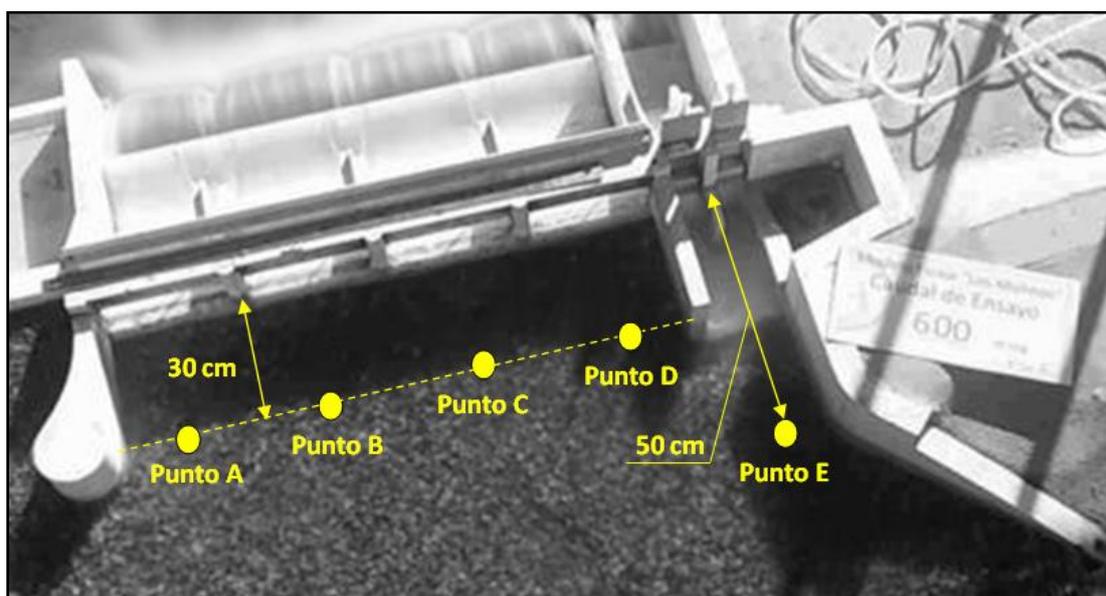
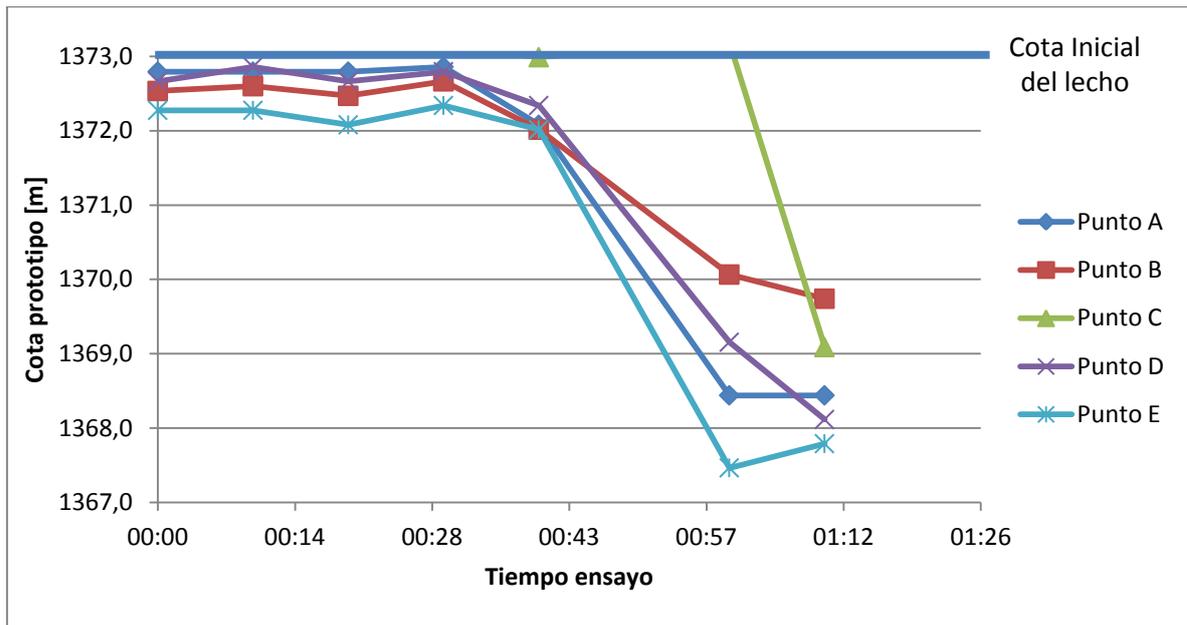


Figura 45: Puntos característicos medidos en cada instante del ensayo

La variación de la cota de fondo a lo largo del ensayo se presenta en la Figura 46.



**Figura 46: Variación de las cotas del lecho en los puntos característicos con respecto al tiempo. Ensayo en que se espera la crecida con compuertas cerradas con aporte de sedimentos continuo**

Se observa claramente que antes de la etapa 3 (ver Tabla 1), que ocurre luego de la primera media hora de ensayo, prácticamente no hay transporte de sedimentos ni erosión en la zona aguas arriba de la presa. Una vez que se abren las compuertas al 20% (etapa 3) se comienza a ver la tendencia a la erosión del fondo, mientras que después de la apertura de los 2 CM y los 4 DM en un 50%, se observa gran variación del lecho de fondo en el tiempo (etapa 4).

Por otro lado se observa una gran variación de cota en el punto C recién a partir de la primera hora de ensayo, esto es porque en ese momento se produce erosión del material del lecho en ese lugar, formando un canal de llamada prácticamente paralelo a la obra. Para explicar mejor esto, en la Figura 47 se observa el lecho a los 45 minutos de ensayo (5 minutos después de abrir los 2 canales moderadores al 100% y las 4 compuertas del dique móvil al 50%), donde se observa que la cota del punto C aún no ha sufrido gran erosión y permanece cercana a 1373 m (que es la cota inicial del ensayo). En el momento de la imagen, se estaba iniciando la formación del cauce hacia el canal moderador.



**Figura 47: Ensayo en que se espera la crecida con compuertas cerradas con aporte de sedimentos continuo. 45 minutos**

Por otra parte, en la Figura 48 se muestra el lecho a los 60 minutos de ensayo. Aquí sí el efecto de la apertura de las 6 estructuras de descarga ya erosionó el lecho cercano a la obra. La cota del punto C ya se redujo a un valor cercano a 1369 m, que es igual a la cota del labio de las compuertas del dique móvil.



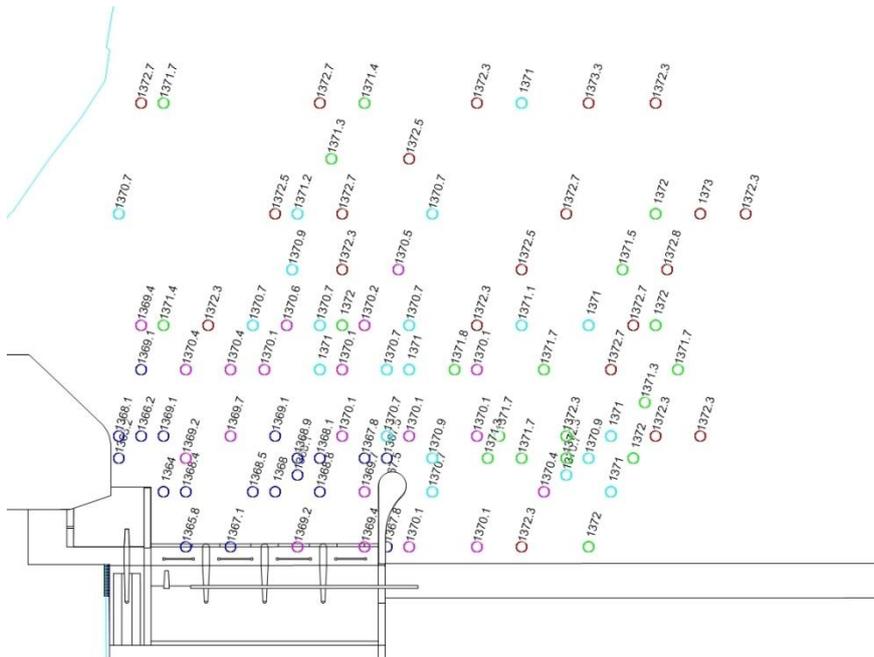
**Figura 48: Ensayo en que se espera la crecida con compuertas cerradas con aporte de sedimentos continuo. 60 minutos**

Una vez completado el ensayo, se relevó mediante mira y nivel la superficie resultante. (Ver Figura 49).



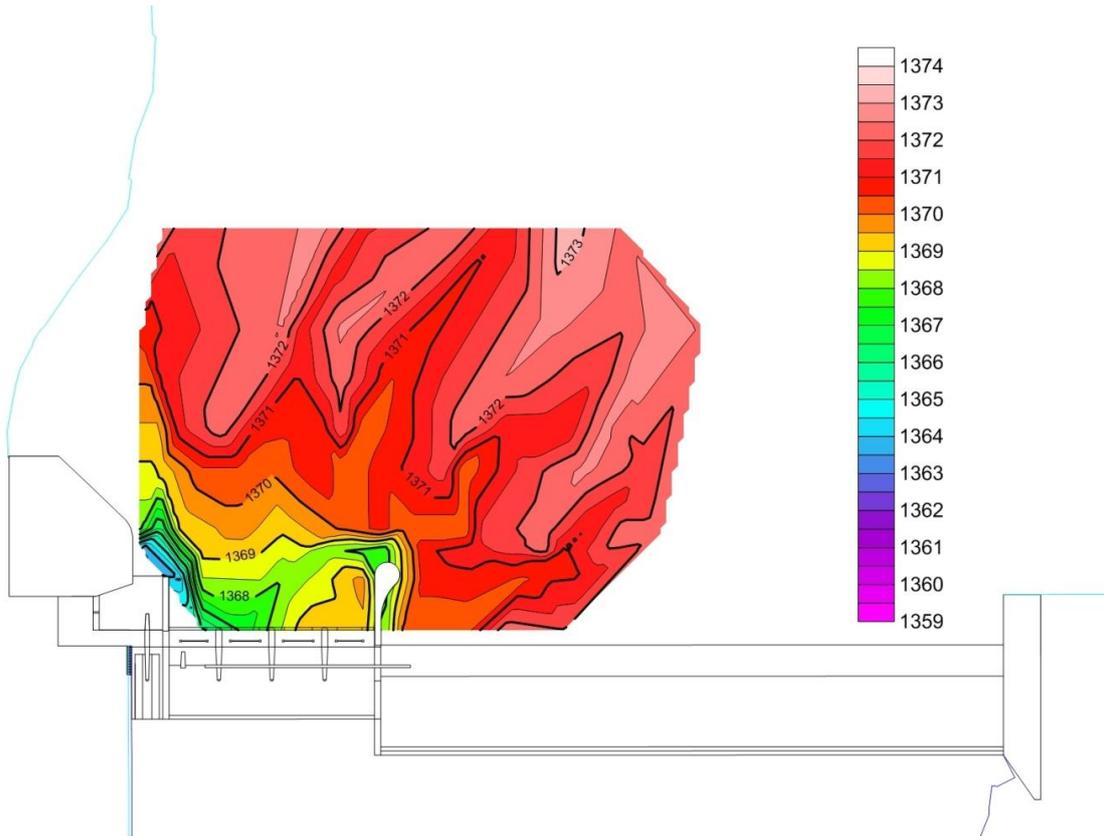
**Figura 49: Superficie obtenida durante el ensayo en que se espera la crecida con compuertas cerradas con aporte de sedimentos continuo**

De la superficie obtenida se relevaron los siguientes puntos: (Ver Figura 50).



**Figura 50: Puntos relevados de la superficie final en ensayo en que se espero la crecida con compuertas cerradas con aporte de sedimentos continuo**

En la Figura 51 se presentan las curvas de nivel de la superficie generada y en la Tabla 30 la cuantificación del sedimento evacuado en este ensayo.



**Figura 51: Superficie digital del modelo cuando se espera la crecida con las compuertas cerradas con aporte de sedimentos continuo**

**Tabla 30: Volumen de sedimentos retenidos en la tolva en ensayo en que se espera la crecida con compuertas cerradas con aporte de sedimentos continuo**

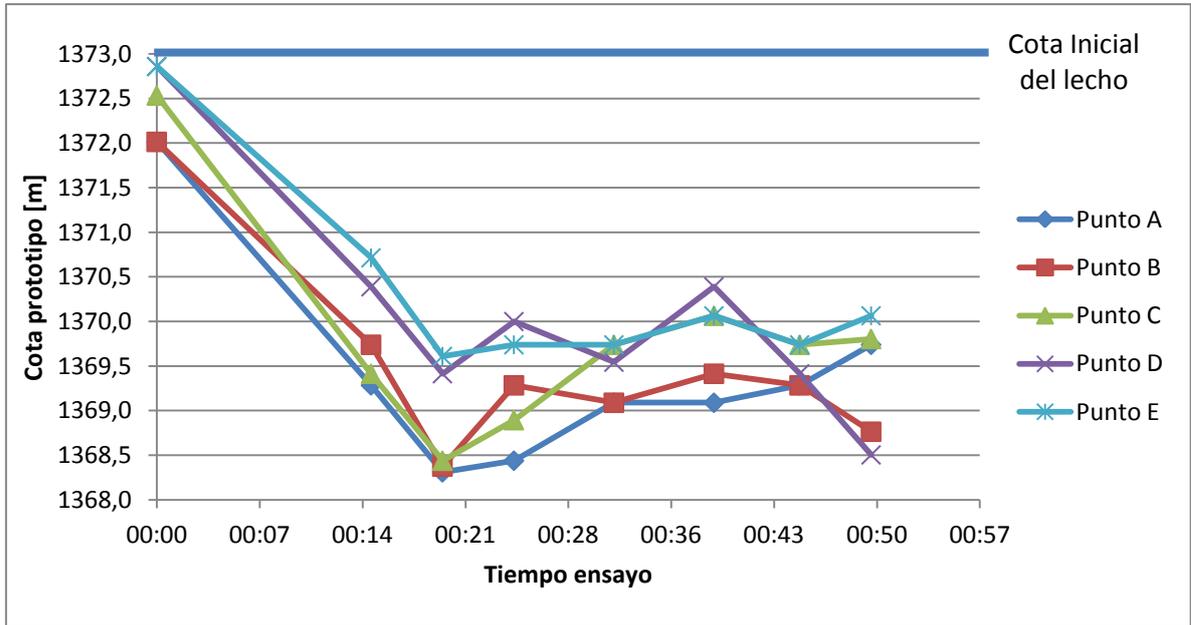
Superficie de la tolva [m2]	0,90
Altura arena [m]	0,19
Volumen de arena [m3]	0,17

En la superficie generada se observan cuatro canales de llamada que van hacia el dique móvil y el canal moderador. Además, se distingue en color verde el canal paralelo a la obra que se mencionó anteriormente. La cota mínima en este caso es de 1364 m aproximadamente y se encuentra 20 metros aguas arriba del canal moderador.

## 5.2 Política de operación II: Esperar la crecida con las compuertas abiertas

A continuación se ensayó la metodología de aperturas de compuertas según los pasos vistos en la Tabla 2. Los caudales modelados son los de la Tabla 6 y el hidrograma es el que se observa en la Figura 30.

Análogamente al ensayo anterior, en este caso también se tomaron 5 puntos de referencia (ver Figura 45) para evaluar la variación de la cota de fondo y la evolución del lecho a lo largo del tiempo. Estas cotas son las mostradas en la Figura 52.



**Figura 52: Variación de las cotas del lecho en 5 puntos característicos en el tiempo. Ensayo en que se espera la crecida con compuertas abiertas con aporte de sedimentos continuo**

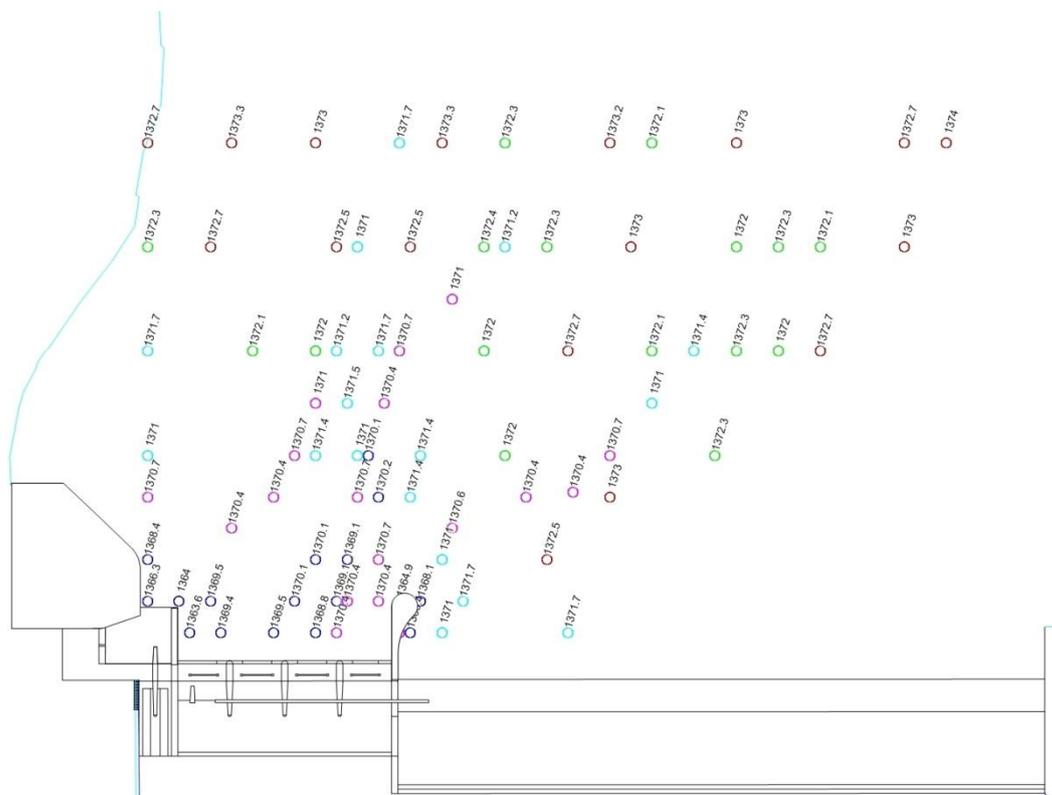
Se observa claramente que la mayor parte de la erosión aguas arriba de la obra ocurre en los primeros 20 minutos de ensayo. Esto es, por un lado, porque corresponde a los máximos caudales, y por otro, porque como se espera la crecida con todas las compuertas abiertas al 100%, estas trabajan a pelo libre y con gran velocidad de arrastre por lo que genera el transporte de sedimentos. Una vez el caudal disminuye, se empiezan a cerrar el canal moderador y las compuertas de forma ordenada y esto hace que comiencen a trabajar a presión o semiahogadas, por lo que se produce la compensación de sedimentos que traen los ríos y la erosión se estabiliza.

En la Figura 53 se observa la superficie obtenida al final del ensayo.



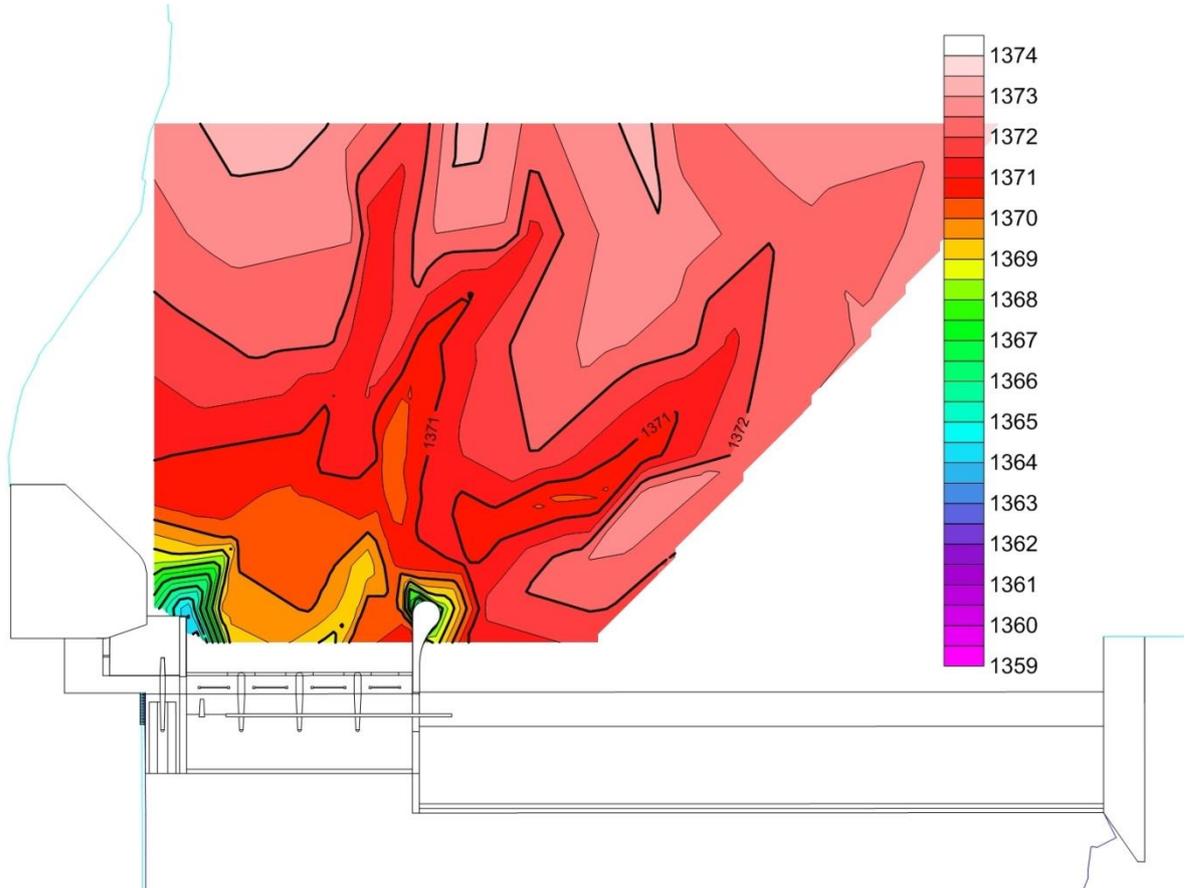
**Figura 53: Superficie obtenida durante el ensayo en que se espera la crecida con compuertas abiertas con aporte de sedimentos continuo**

De la superficie de la imagen anterior se relevaron los siguientes puntos: (Ver Figura 54),



**Figura 54: Puntos relevados de la superficie final en ensayo en que se espero la crecida con compuertas abiertas con aporte de sedimentos continuo**

En la Figura 55 se presentan las curvas de nivel de la superficie generada a partir de los puntos y en la Tabla 31 la cuantificación del sedimento evacuado en este ensayo.



**Figura 55: Superficie digital del modelo cuando se espera la crecida con las compuertas abiertas con aporte de sedimentos continuo**

**Tabla 31: Volumen de sedimentos retenidos en la tolva en ensayo en que se espera la crecida con compuertas abiertas con aporte de sedimentos continuo**

Superficie de la tolva [m <sup>2</sup> ]	0,90
Altura arena [m]	0,15
Volumen de arena [m <sup>3</sup> ]	0,13

En la superficie generada se observa la formación de tres canales de llamada hacia la obra. La mayor erosión se da en las inmediaciones del muro divisor del dique móvil y el canal moderador, siendo de 1364 m aproximadamente. Tanto esta imagen como la del caso anterior poseen la misma gama de colores, por lo que son fácilmente comparables y se observa que los las máximas erosiones son similares y en las mismas zonas de la obra.

## **6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS**

En este capítulo se analizaron los resultados obtenidos con los ensayos en los que se esperó la crecida con las compuertas cerradas y con las compuertas abiertas. A su vez, cada ensayo se realizó para los siguientes casos:

1. Sin aporte de sedimentos (Ávila, 2014);
2. Con aporte de sedimentos de forma manual y semidiscreta (Marassa, 2013);
3. Con aporte de sedimentos de forma continua (estudiado en este trabajo).

### **6.1 Política de operación I: Esperar la crecida con las compuertas cerradas**

En primer lugar, se comparó visualmente la variación del lecho observada durante los tres ensayos realizados del mismo procedimiento de operación. En la Figura 56 se muestran las fotografías tomadas en el mismo instante de tiempo en cada ensayo. Las imágenes de izquierda a derecha son el caso sin aporte de sedimentos, con aporte manual y con aporte continuo mediante las tolvas, respectivamente.

**Etapa 1 - Tiempo 0min: Agua pasa por DF,  $Q = 600\text{m}^3/\text{s}$**



**Etapa 2 - Tiempo 20min: DM 10% abierto,  $Q = 400\text{m}^3/\text{s}$**



**Etapa 3 - Tiempo 30min: DM 20% abierto,  $Q = 250\text{m}^3/\text{s}$**



**Etapa 4 - Tiempo 40min: DM 50% abierto, CM 100% abierto,  $Q = 225\text{m}^3/\text{s}$**



(a) Sin aporte de sedimentos

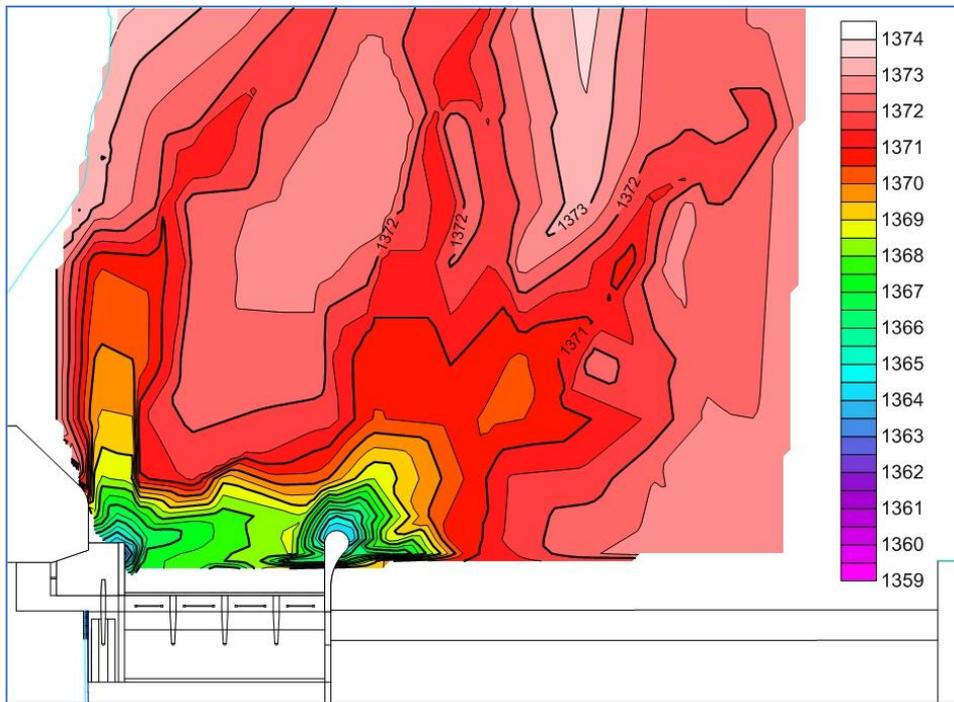
(b) Con aporte manual de sedimentos

(c) Con aporte continuo de sedimentos

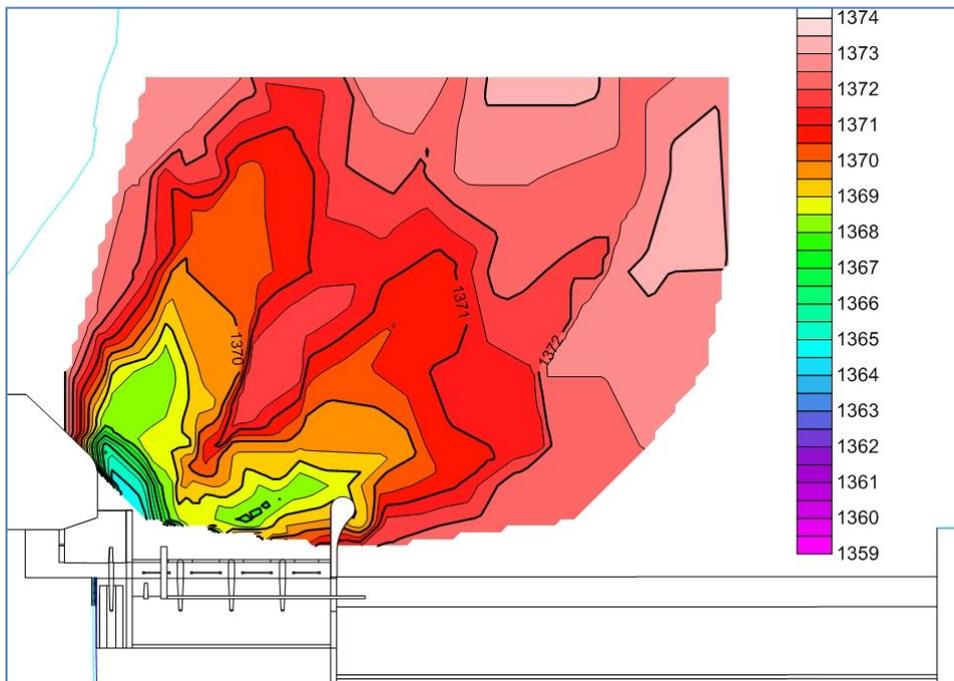
**Figura 56: Ensayos: (a) sin aporte, (b) con aporte manual, (c) con aporte continuo. Escenario en que se espera la crecida con compuertas cerradas**

Tal como se comentó anteriormente, antes de realizar la etapa 4 de cada ensayo no se apreciaron grandes variaciones del lecho en la zona aguas arriba de la obra. Mientras que luego de esta etapa (donde se abren al 100% el Canal Moderador y al 50% las compuertas del Dique Móvil) la erosión del lecho cambia significativamente con respecto a la configuración inicial del ensayo. En las figuras de las etapas 1, 2 y 3 no se observan grandes diferencias entre lo obtenido para los tres ensayos; mientras que en las imágenes de la etapa 4 se observa que si bien los canales de llamada se forman en todos los casos hacia la zona de las estructuras de descarga, sí se registran variaciones del lecho con formas de fondo finales.

Para las tres condiciones de ensayos analizadas (sin aporte de sedimentos, con aporte manual y con aporte continuo) se relevaron los puntos topográficos finales y se digitalizó la superficie resultante en cada ensayo (ver Figura 51: con aporte continuo, Figura 57: sin aporte de sedimentos y Figura 58: con aporte manual).



**Figura 57: Superficie digital del modelo cuando se espera la crecida con las compuertas cerradas sin aporte de sedimentos**



**Figura 58: Superficie digital del modelo cuando se espera la crecida con las compuertas cerradas con aporte de sedimentos manual**

Las superficies generadas en los tres ensayos muestran formas de fondo similares. En el caso sin aporte de sedimentos los tres canales de llamada se destacan claramente, mientras que con aporte están menos marcados. La cota de fondo resultó de 1371 m.s.n.m aproximadamente. Al aproximarse a la zona del Canal Moderador esta cota

disminuye a 1364 m.s.n.m. Además, se apreció la formación de un canal de cota 1367 m.s.n.m (color verde en las imágenes) que se encuentra paralelo a la obra en la zona del Dique Móvil. Por otro lado, se observa en la imagen del ensayo sin aporte de sedimentos (ver Figura 57) la gran erosión local en la zona entre el Dique Fijo y Dique Móvil generada por la presencia de la guitarra.

A continuación se presentan los volúmenes de material suelto removido en los ensayo sin aporte se sedimento, con aporte manual y con aporte mediante tolvas vibratorias. (Ver Tabla 32).

**Tabla 32: Volúmenes de material suelto removido durante los ensayos en los que se espera la crecida con compuertas cerradas**

Ensayo	Volumen de arena [m <sup>3</sup> ]
Sin aporte	0,15
Aporte manual	0,13
Aporte continuo	0,17

Como se aprecia en la tabla, los volúmenes de sedimento removidos durante los ensayos no tuvieron una diferencia significativa. Esto se debe a que, como distingue en las imágenes relevadas, visualmente no hay variación importante y las cotas de las superficies son similares en los tres casos. Cuantitativamente, se registraron variaciones entre los volúmenes removidos de un 23% entre considerar que no hay aporte y con aporte, y en un 12% al considerar aporte manual y mecánico.

A partir de las superficies digitales anteriores se obtuvieron 4 perfiles cuya ubicación se detalla en la Figura 59, con el fin de poder comparar más fácilmente los resultados obtenidos en los tres casos analizados. Se optó por realizar dos perfiles longitudinales al curso fluvial (uno donde se separa el Canal Moderador del Dique Móvil y el otro donde se divide el Dique Móvil del Dique Fijo) y dos transversales (uno a 20 m en prototipo del labio del Dique Móvil y el otro a 60 m).

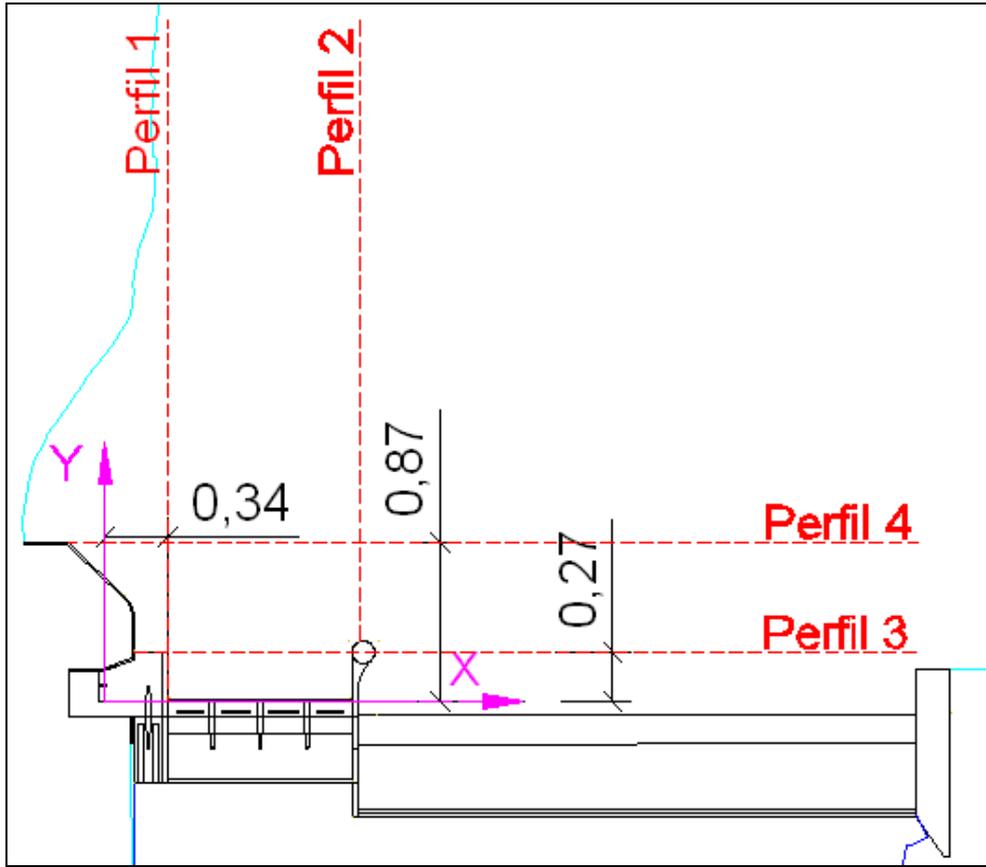


Figura 59: Ubicación de perfiles topográficos analizados

Los perfiles transversales y longitudinales obtenidos para los tres casos analizados se muestran a continuación. La línea horizontal (en color celeste) distingue la cota al inicio de cada ensayo (1373 m.s.n.m), en color azul se puede ver el lecho del ensayo sin aporte de sedimentos, en color rojo el del ensayo con aporte manual y en verde el del ensayo con aporte continuo de sedimentos.

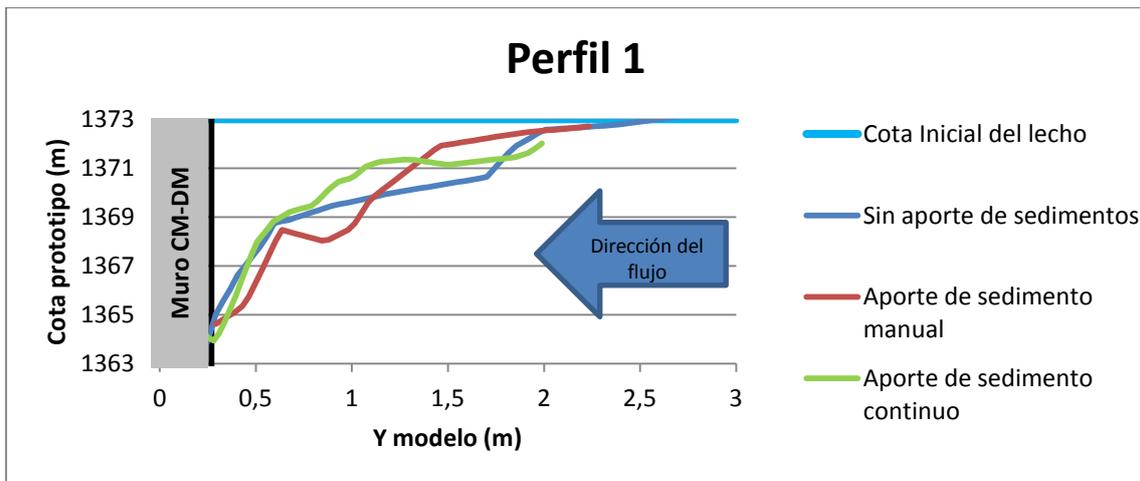


Figura 60: Perfil 1. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas cerradas

Se puede notar que en el perfil 1 no se observan cambios significativos entre los tres escenarios analizados a partir de 0,50 m desde el inicio. En este perfil se graficó la cota mínima generada aguas arriba del muro que separa el Canal Moderador del Dique Móvil y en los tres casos es aproximadamente 1365 m.s.n.m.

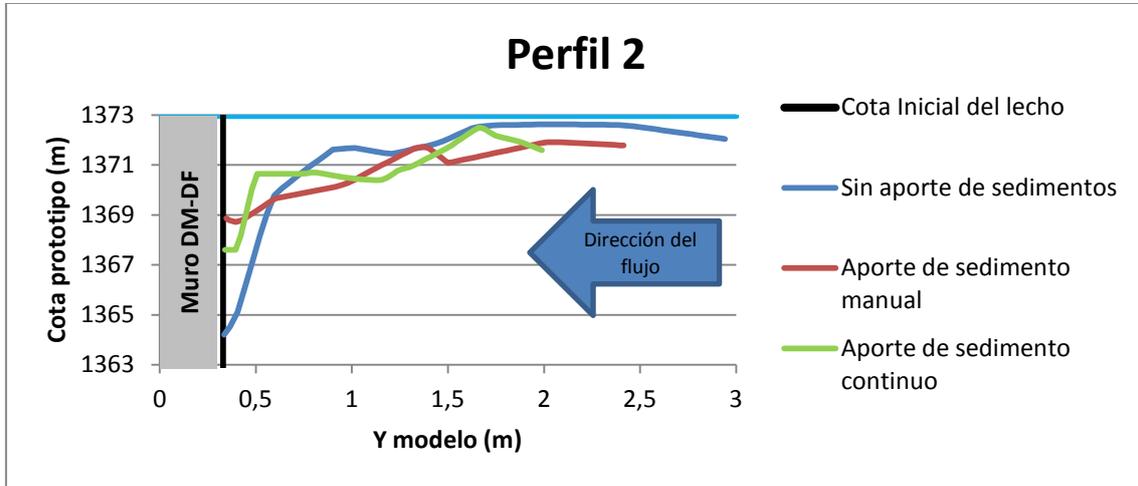


Figura 61: Perfil 2. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas cerradas

Los relevamientos realizados sobre el perfil 2 mostraron que en el ensayo sin aporte de sedimentos se generó la mayor erosión local inmediatamente aguas arriba del muro curvo que separa el Dique Fijo del Dique Móvil que en los casos con aporte. Esto se debe a que en el escenario con aporte de sedimentos al río, éste se va depositando en esta zona que es crítica para el caso sin aportes. La cota observada en el caso sin aporte es de 1364 m.s.n.m mientras que con aporte varía entre 1368 m.s.n.m y 1369 m.s.n.m; por lo que la diferencia entre las cotas observadas ronda los 3 y 4 m. Si bien cerca del muro curvo se observó esta diferencia, la erosión generalizada aguas arriba de esta estructura es similar en los tres casos.

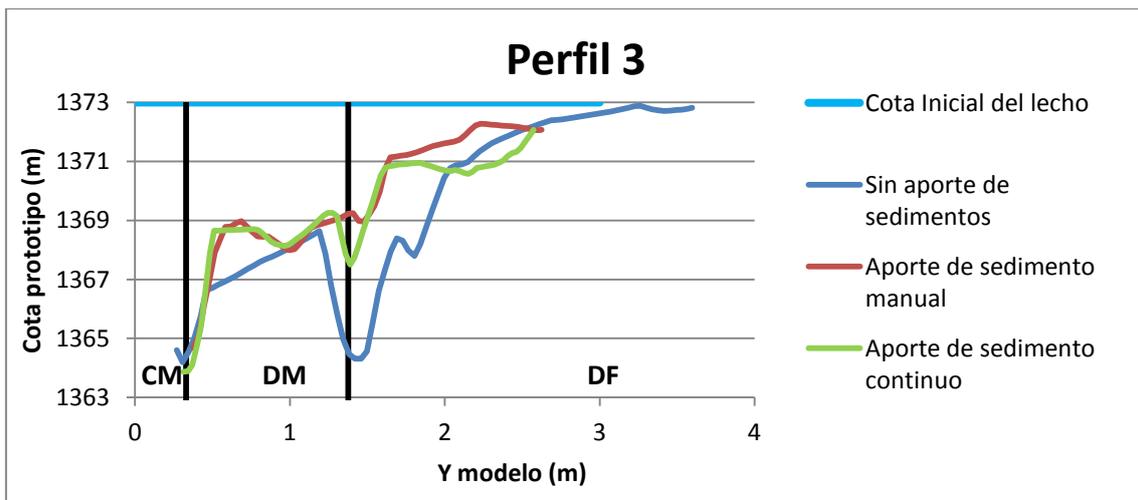


Figura 62: Perfil 3. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas cerradas

Analizando los resultados relevados sobre el perfil 3 se vuelve a observar un comportamiento similar a los obtenidos en el perfil 2. En el caso sin aporte, la magnitud de la erosión es mayor que en los casos con aporte; pero en los tres casos se sigue un patrón similar en la forma de fondo. Lo interesante en este perfil es que muestra para todos los casos las cotas mínimas observadas. Se destaca la erosión local que ocurre en el muro curvo que separa el Dique Fijo del Dique Móvil (cuya diferencia de resultado se explicó en el perfil 2) y la que ocurre en el muro que separa el Canal Moderador del Dique Móvil (que para los tres casos fue muy similar). También vemos que las formas de fondo son similares en todos los casos, pero en el ensayo sin aporte de sedimentos las cotas son menores, generando canales de llamada más marcados (con diferencia de hasta 3 y 4 metros entre los ensayos sin y con aporte).

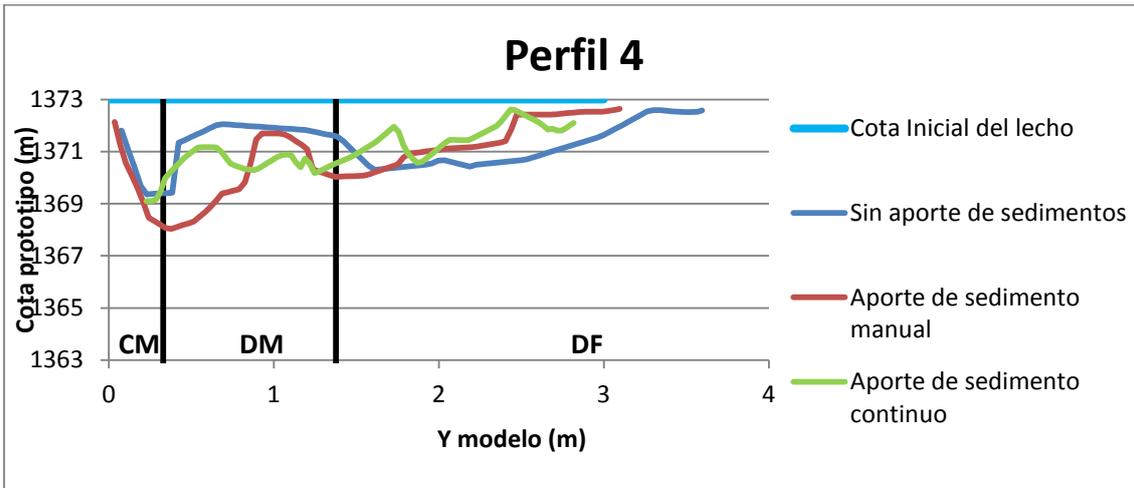


Figura 63: Perfil 4. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas cerradas

En el perfil 4 se observan la formación de los canales de llamada (líneas preferenciales de flujo) hacia la obra con una longitud de hasta 60 m (prototipo) hacia aguas arriba de la misma. En este caso no existe una gran diferencia de las formas del lecho entre los tres escenarios analizados.

## 6.2 Política de operación II: Esperar la crecida con las compuertas abiertas

Como se realizó en el punto anterior, se compararon visualmente la variación del lecho observada durante los tres ensayos realizados del mismo procedimiento de operación. Las imágenes de las Figura 64 corresponden a los escenarios: (a) sin aporte de sedimentos, (b) con aporte manual y (c) con aporte continuo en cada instante de tiempo.

Etapa 1 - Tiempo 0min: DM abierto, CM abierto,  $Q = 600\text{m}^3/\text{s}$



Etapa 2 - Tiempo 20min: DM 1,2,3 abierto, DM 4 cerrado, CM cerrado,  $Q = 450\text{m}^3/\text{s}$



Etapa 3 - Tiempo 40min: DM 1,2 abierto, DM 3,4 cerrado, CM abierto,  $Q = 300\text{m}^3/\text{s}$



Etapa 4 - Tiempo 60min: DM 1 abierto, DM 2,3,4 cerrado, CM cerrado,  $Q = 150\text{m}^3/\text{s}$



(a) Sin aporte de sedimentos

(b) Con aporte manual de sedimentos

(c) Con aporte continuo de sedimentos

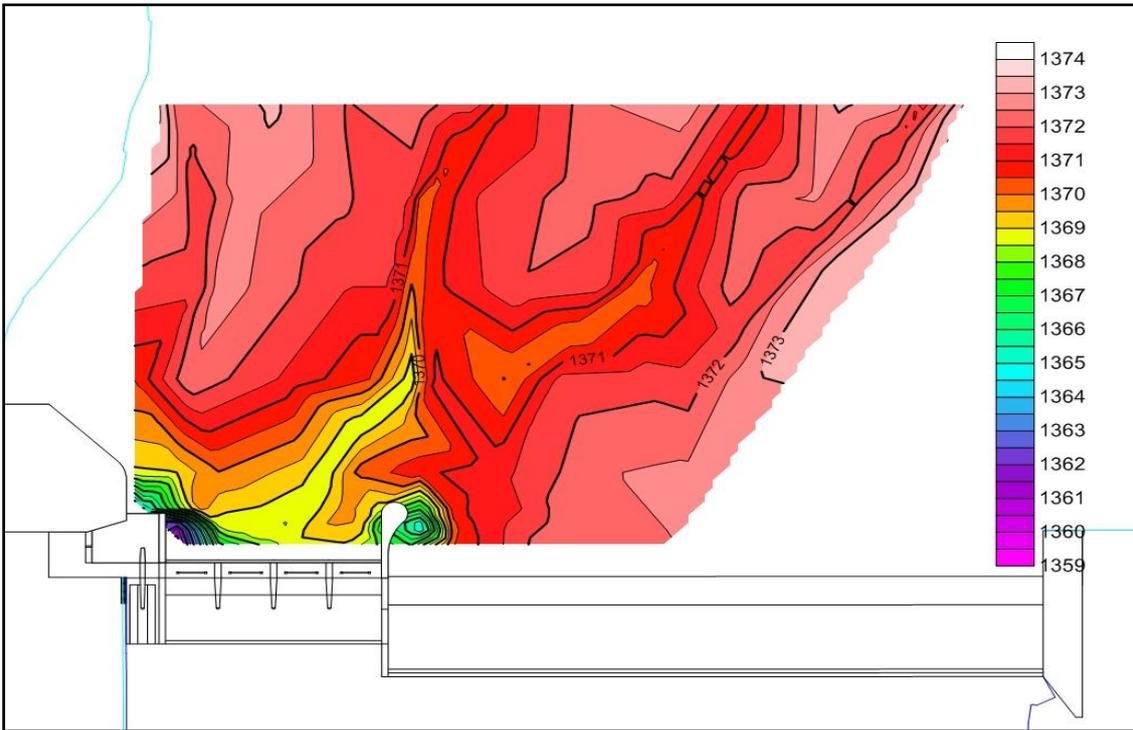
**Figura 64: Ensayos: (a) sin aporte, (b) con aporte manual, (c) con aporte continuo. Escenario en que se espera la crecida con compuertas abiertas**

Como se observa en las fotografías tomadas mediante el transcurso de los ensayos, en las inmediaciones del dique fijo no hay acumulación de sedimentos debido que a la política de operación empleada en estos ensayos se basa en esperar la crecida con compuertas abiertas. Sin embargo, antes de proceder a la apertura del canal moderador (etapa 3) en sus proximidades se observó sedimento acumulado que, después de la apertura de estas compuertas, fue arrastrado de manera rápida.

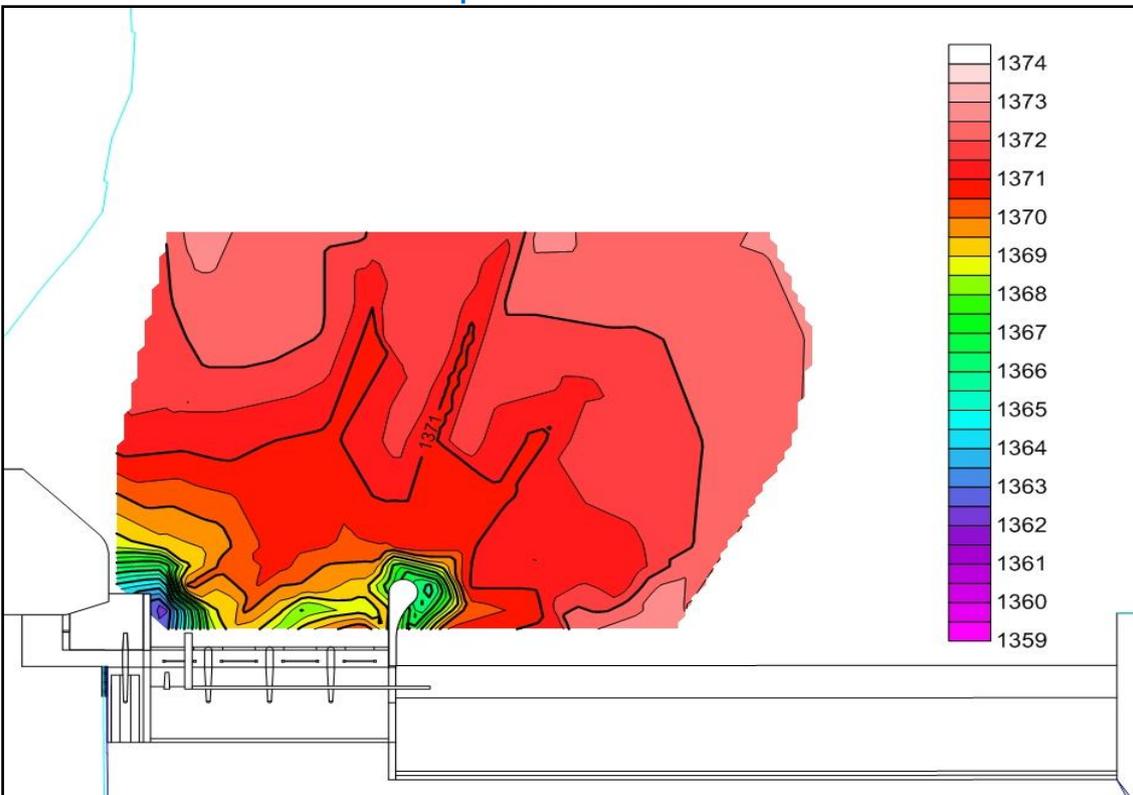
Al realizar un análisis visual de las fotografías tomadas durante los ensayos se observa que en los tres escenarios analizados las superficies del lecho finales resultaron muy parecidas.

Análogamente a lo realizado en los ensayos anteriores, en este escenario también se procedió a digitalizar la superficie obtenida al final del ensayo. En la Figura 65 y Figura

66 se muestran los resultados de los ensayos sin aporte y con aporte manual, mientras que en la Figura 55 se observa la superficie relevada del ensayo con aporte continuo.



**Figura 65: Superficie digital del modelo cuando se espera la crecida con las compuertas abiertas sin aporte de sedimentos**



**Figura 66: Superficie digital del modelo cuando se espera la crecida con las compuertas abiertas con aporte de sedimentos manual**

Comparando las superficies digitales de los ensayos, las cuales están en la misma gama de colores para la representación de las cotas. Se observó en los tres escenarios que se formaron 3 canales de llamada hacia la obra con cotas aproximadas de 1371 m.s.n.m. En las inmediaciones de la obra se registró una disminución de las cotas del lecho siendo la mínima de 1364 m.s.n.m en la zona del muro entre el Canal Moderador y el Dique Móvil. También se observó gran erosión en la zona del muro curvo que separa el Dique Fijo del Dique Móvil.

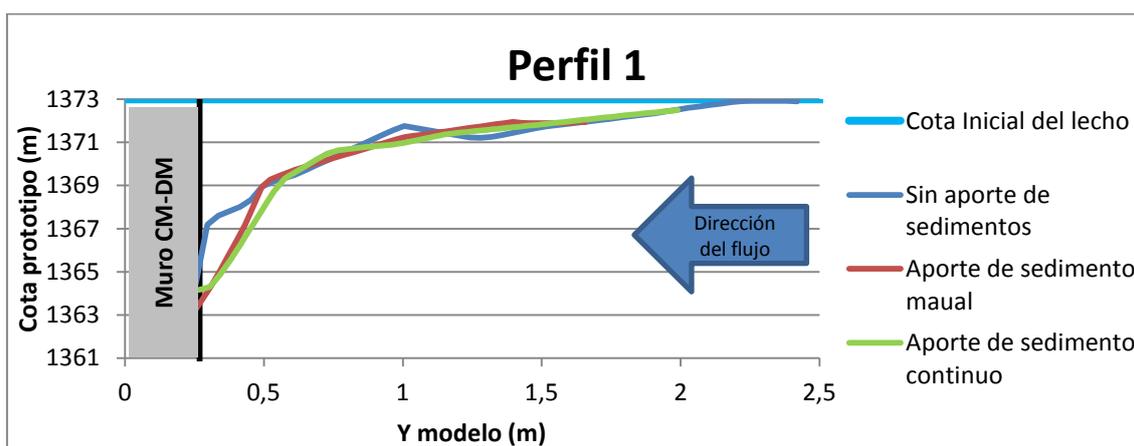
En la Tabla 33 se presenta la cuantificación del material suelto removido en los ensayo sin aporte de sedimento, con aporte manual y con aporte mediante tolvas.

**Tabla 33: Volúmenes de material suelto removido durante los ensayos en los que se espera la crecida con compuertas abiertas**

Ensayo	Volumen de arena [m <sup>3</sup> ]
Sin aporte	0,12
Aporte manual	0,12
Aporte continuo	0,13

En los tres escenarios analizados, los volúmenes de sedimento removidos durante los ensayos son similares. Sólo se registró una diferencia del 8% entre los obtenidos con aporte manual y con aporte mecánico. Se concluye que al realizar el aporte, este no influye significativamente en el volumen de arena evacuado debido al procedimiento de compuertas. Esto puede demostrarse fácilmente al realizar un análisis visual de las tres superficies relevadas. Al interpretar las imágenes con la misma gama de colores se puede concluir que no varían significativamente las cotas del fondo en cada caso, por lo que los volúmenes removidos son similares.

A continuación se muestran los perfiles relevados mediante las superficies digitales. Estos perfiles son longitudinales y transversales al flujo del agua, como se muestra en la Figura 59.



**Figura 67: Perfil 1. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas abiertas**

Los relevamientos realizados sobre el perfil 1 no indicaron grandes diferencias entre los tres escenarios analizados. La mayor erosión local, como era de esperar, se registró cerca del muro que separa Canal Moderador y Dique Móvil. En la Figura 67 se

graficó la cota mínima generada aguas arriba de este muro, la cual en los tres escenarios casos rondó los 1364 m.s.n.m.

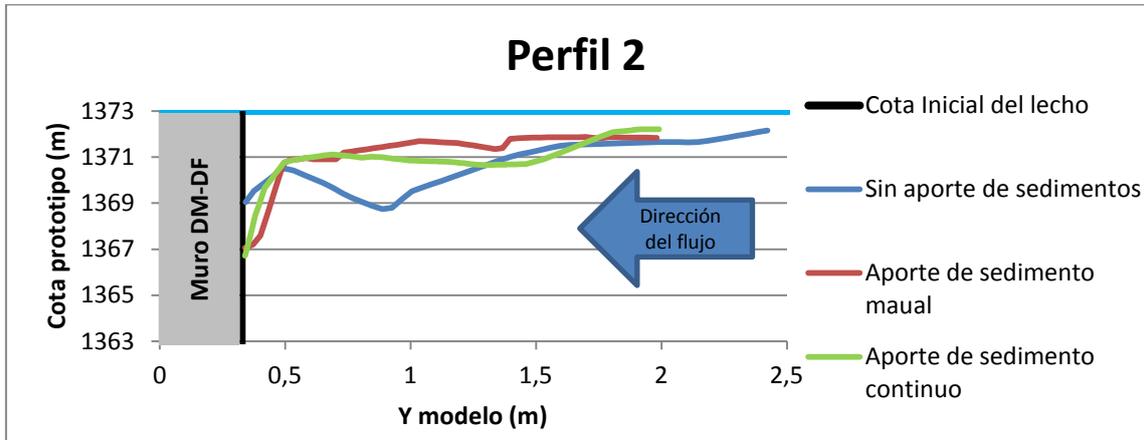


Figura 68: Perfil 2. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas abiertas

Al analizar los relevamientos realizados sobre el perfil 2 (ver Figura 68) se destaca que las formas del lecho son similares para los tres escenarios analizados. En el escenario sin aporte de sedimentos el canal de llamada hacia el Canal Moderador es más definido, con una profundidad casi 2 m mayor con respecto a los escenarios con aporte. No se observó gran variación en la cota del lecho inmediatamente aguas arriba del muro curvo, la cual alcanzó un valor de 1367 m.s.n.m. Aquí no hay gran erosión en el muro curvo, ya que al ir avanzando el ensayo, se va realizando el cierre de las compuertas del dique móvil en forma progresiva desde la margen izquierda hacia la margen derecha (donde está la obra de toma) y como en el final del ensayo solo permanece abierta la compuerta del Dique Móvil más alejada del muro curvo, no hay tanto efecto de la erosión local en este punto como ocurre con el ensayo con compuertas cerradas.

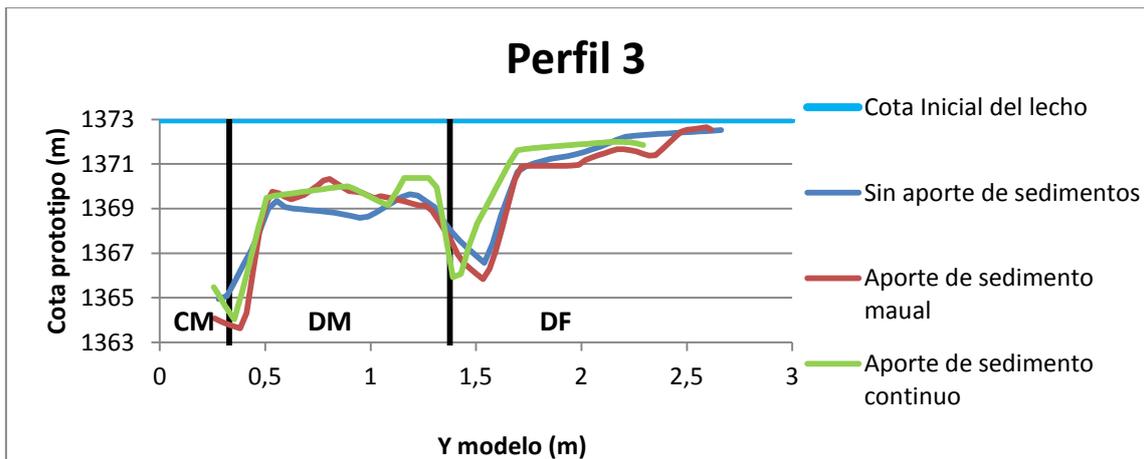
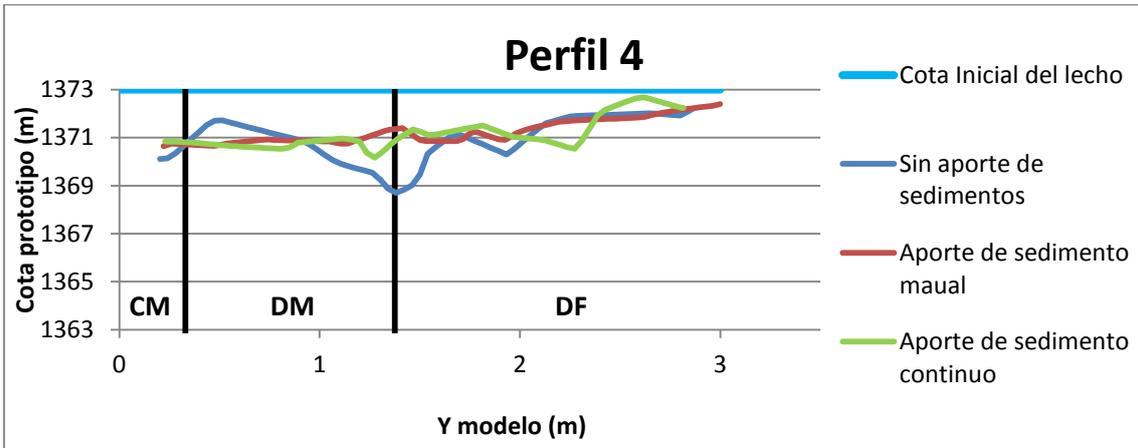


Figura 69: Perfil 3. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas abiertas

Se observa que en el perfil 3 (ver Figura 69) no se presentan alteraciones marcadas entre los tres escenarios analizados. Los canales de llamada son muy similares y las cotas mínimas observadas, tanto en el muro que separa el Canal Moderador del Dique

Móvil como en el muro curvo que separa el Dique Móvil del Dique Fijo, son análogas (iguales a 1364 m.s.n.m y 1367 m.s.n.m respectivamente).



**Figura 70: Perfil 4. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas abiertas**

En el perfil 4 (Figura 70) se observaron los canales de llamada con la misma forma en los tres escenarios analizados. En el escenario sin aporte de sedimento, el canal de llamada se halla más definido que en los escenarios con aporte de sedimentos. La erosión generalizada es similar en los tres escenarios, cercana a los 1369 m.s.n.m.

## **7 CONCLUSIONES**

### **7.1 Conclusiones de la Práctica Supervisada**

Mediante la realización de este trabajo se demostró la validez de las dos políticas de operación previamente desarrolladas en el Laboratorio de Hidráulica de la UNC, ya que se cumplen los principales requerimientos solicitados por el comitente del modelo físico, los cuales fueron:

- ✓ Favorecer la capacidad de remoción de sedimentos aguas arriba de la obra.
- ✓ Favorecer la configuración del cauce aguas arriba de la obra una vez finalizado el evento.
- ✓ Favorecer la configuración del cauce en las inmediaciones de la obra de toma.

Además, como se mencionó, cada una de las políticas de operación definidas posee ventajas y desventajas que deberán ser evaluadas a la hora de elegir la alternativa más adecuada para poder llevar adelante el procedimiento en prototipo frente a las crecidas esperadas. La elección definitiva de la política de operación a utilizar se encuentra fuera del alcance de este trabajo, pero sería necesario analizar los pros y contras de cada propuesta, haciendo al mismo tiempo un análisis general de costos de los daños que se generan sobre la obra.

Los relevamientos topográficos resultantes de cada ensayo, indicaron que en general las formas de fondo son similares en los tres escenarios analizados: sin aporte de sedimentos, con aporte manual y con aporte continuo. Esto se registró tanto para las condiciones de esperar la crecida con las compuertas cerradas, como cuando se espera la crecida con las compuertas abiertas.

La erosión más significativa es la local generada por la presencia de la obra, siendo ésta relativamente menor en los casos con aporte de sedimentos. Este fenómeno se produce debido a la compensación de los sedimentos arrastrados desde las inmediaciones del dique, con los transportados por los ríos desde aguas arriba.

Se destacó una disminución en la formación de los canales de llamada (líneas preferenciales de flujo) para los escenarios con aportes de sedimentos. El lecho en general permanece similar al escenario sin aportes. Lo mismo sucede cerca del Canal Moderador, y esto es importante de destacar ya que en esa zona se emplaza la obra de toma hacia el canal derivador, que preferentemente debe permanecer limpia de sedimentos para la derivación de los caudales. Teniendo en cuenta que este es uno de los objetivos fundamentales del estudio realizado, se concluye que las dos metodologías de operación de compuertas analizadas cumplieron con los requerimientos propuestos.

Se definió el aporte de caudales de sólidos a aplicar en el modelo físico. Este procedimiento se basó en el estudio del transporte de sedimentos en la cuenca y la aplicación de la fórmula de Meyer – Peter y Müller como la que más se adecúa al estudio.

Mediante la calibración de las dos tolvas vibratorias de aporte de sedimentos se logró alcanzar los caudales sólidos necesarios para los ensayos de ambas políticas de

operación y se desarrolló una metodología adecuada para la realización de los mismos. Al calcular el peso específico de la arena utilizada en el modelo mediante el empleo de las celdas de carga, se obtuvieron valores muy cercanos a los utilizados para el cálculo del transporte de sedimentos (diferencia menor al 7%), por lo que los caudales sólidos obtenidos anteriormente no se modificaron.

Al ensayarse los procedimientos con aporte de sedimentos de manera continua se obtuvieron resultados análogos respecto a los ensayos realizados con aporte manual; por lo que se concluye que la sensibilidad del lecho del modelo a la manera de realizar los aportes es poco significativa.

Finalmente, es importante mencionar que el estudio realizado es cualitativo. Cabe destacar que en los ensayos con transporte de sedimentos se tuvieron en cuenta todas las variables posibles de cuantificar con el modelo, tanto del cauce como del sedimento; pero en prototipo no siempre son las supuestas.

Por otro lado, en el modelo físico se representó un sector del prototipo, el cual permanece inalterado durante los ensayos. Por el contrario, en la realidad durante las crecidas los cauces cambian tanto de pendiente como de morfología en general, pudiendo acarrear más o menos material que con el que se ensayó según la fórmula utilizada. Es decir que el fenómeno de transporte de sedimentos es complejo y de difícil calibración en un modelo que abarque una extensa área de prototipo.

Aún con estas limitaciones, se puede decir que los resultados obtenidos son representativos para los fines del trabajo, tanto para la metodología de apertura de compuertas, como para conocer los niveles de erosión en las inmediaciones de la obra.

## **7.2 Conclusiones personales sobre la Práctica Supervisada**

Este trabajo fue una oportunidad para aplicar muchos conocimientos teóricos aprendidos durante el cursado de la carrera ingeniería Civil. Además de poder llevar a la práctica los conceptos vistos en la carrera, este estudio me dio la posibilidad de tratar, discutir y aprender de las personas con quien se formó el equipo de trabajo. Me parece que esto es algo que debo destacar ya que me servirá como introducción al ámbito laboral en el futuro.

Por último, quiero agradecer a todo el grupo del Laboratorio de Hidráulica que me dio la posibilidad de realizar mi Práctica Supervisada con ellos, y siempre tuvieron el tiempo y la predisposición para que pueda trabajar de manera correcta.

## 8 REFERENCIAS

- ✓ Ávila, Lucas (2014). «Estudio de los procesos fluviales en el río Grande en inmediaciones del dique "Los Molinos" Jujuy». Informe de Práctica Supervisada, de la carrera de Ingeniería Civil de la FCEFyN de la UNC.
- ✓ Einstein, Hans Albert (1950). *"The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows"* Soil Conservation Service.
- ✓ Garcia Flores, Manuel, y José Antonio Maza Alvarez (1997). *"Procesos de erosión y sedimentación en cauces y cuencas. Serie del Instituto de Ingeniería"*.
- ✓ Marassa, Alejandro (2013). «Aporte de sedimentos en Modelo Físico "Los Molinos" Jujuy». Informe de Práctica Supervisada, de la carrera de Ingeniería Civil de la FCEFyN de la UNC.
- ✓ Muller, Meyer – Peter (Sweden, 1948). *"Formulae for bed-load transport"*. Ed. IAHR.
- ✓ Sharp, J.J. (1981). *"Hydraulic Modelling"*. Ed. Rutterworths.
- ✓ Straub, Du Boys (1879). *"Études du régime et l'action exercé par les eaux sur un lit à fond de graviers indefinimnet affouiable"*.
- ✓ Vergara Sánchez, Miguel A. (1995). *"Técnicas de modelación en hidráulica"*. Ed. Alfaomega.
- ✓ Weber, Juan (2003). *"Hidráulica del transporte de sedimentos"*. Apunte de clases de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNC.