



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

APLICACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL EN EL ESTUDIO DEL PASO
DE SEDIMENTOS A TRAVÉS DE LA DESCARGA DE FONDO EN UN EMBALSE CON
PROBLEMAS DE AZOLVAMIENTO EN JALISCO.

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
SERBIO KEVIN ZÁRATE ÁVILA

TUTOR PRINCIPAL
DR. JESUS GRACIA SANCHEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CD. MX. JUNIO 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Fuentes Mariles Oscar Arturo

Secretario: M. I. Franco Víctor

1^{er}. Vocal: Dr. Gracia Sánchez Jesús

2^{do}. Vocal: Dr. Pozos Estrada Óscar

3^{er}. Vocal: Dr. Mendoza Reséndiz Alejandro

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, CDMX, México, Junio 2023

TUTOR DE TESIS:

Dr. Jesús Gracia Sánchez

FIRMA

Agradecimientos

Primeramente, a mi familia por su apoyo incondicional en todos estos años, sus palabras de aliento y por creer en mí.

Al Dr. Jesús Gracia por su interés en el desarrollo de la tesis, compartir un poco de su experiencia acerca del tema y sus acertadas observaciones y comentarios durante todo el proceso. Al Dr. Alejandro Mendoza Reséndiz por compartir un poco de su experiencia y sus enseñanzas dentro y fuera del aula, así como por el apoyo técnico brindado con el uso del modelo matemático fundamental para el desarrollo de esta tesis.

A la UNAM por la oportunidad de estudiar en esta institución y al Instituto de Ingeniería por facilitarme un equipo de cómputo. Finalmente, al Consejo de Humanidades Ciencias y Tecnologías por el apoyo con la beca otorgada.

Resumen

El azolvamiento en presas se ha extendido de manera global impactando seriamente en la pérdida de almacenamiento de agua trayendo consigo repercusiones en el ámbito social, económico y ambiental. Aunque en el diseño de embalses es común considerar la disposición de volumen muerto (que se ocupará por los azolves), generalmente estos volúmenes son sobrepasados provocando una pérdida de la capacidad con frecuencia antes de lo previsto haciendo que se llegue antes de la vida útil proyectada.

En años recientes se ha recalcado la importancia de analizar alternativas para darle solución a este problema ya que es claro que la construcción de nuevos embalses resulta onerosa, la estricta regulación medioambiental y la escasez de sitios convenientes para nuevos proyectos dificultan más esta medida. Por lo que a diferencia de lo que sucedía en el siglo pasado, que los ingenieros se enfocaban en la construcción de presas de almacenamiento; en la actualidad, tendrá que darse más importancia al mantenimiento para el funcionamiento en las operaciones de esta clase de infraestructura hidráulica se mantenga durante toda su vida útil.

Una técnica para evitar este problema, clasificada como medida indirecta, es el control del aporte de sedimentos en cuencas; es decir, reducir lo máximo posible la pérdida de suelo en la cuenca, por ejemplo, con la reforestación, pero es costosa y con efectos a largo plazo. Entre las medidas directas, una muy popular es la remoción del sedimento por medios mecánicos (trucking) pero en el contexto mexicano no es muy utilizada debido a su alto costo.

La técnica que se estudia en este proyecto es la conocida remoción hidráulica o lavado (flushing) que consiste en abrir la descarga o desagüe de fondo de la presa, para vaciarla y a que su vez el sedimento depositado sea erosionado y salga del embalse por esta obra. Esta alternativa se ha analizado con modelos físicos y matemáticos, los primeros consisten en una representación física del caso a estudiar a una escala menor de la del prototipo mientras que la segunda consiste en un software con la capacidad numérica de resolver las ecuaciones de gobierno de flujo a superficie libre bidimensionales o tridimensionales, las de transporte de sedimentos y evolución de fondo o conocida también como conservación de masa de sedimentos.

Se explican brevemente la clasificación de medidas directas e indirectas para desazolvar embalses y se dan algunos ejemplos de ambas, se describen los diferentes modelos comúnmente empleados en el estudio de la aplicación del flushing. De la misma manera se hace énfasis en la explicación de los modelos matemáticos mencionados ya sean en dos o tres dimensiones.

Se expone el caso de estudio de la presa Santa Rosa ubicada en el cauce del río Santiago en Amatitán, Jalisco. La cual inició operaciones en 1964 y que cuenta con

una central hidroeléctrica y se detallan sus principales usos e información de la cuenca de aportación.

Las simulaciones matemáticas se realizaron con el software Telemac-2D, con lo cual se demostró la capacidad del flushing para recuperar volúmenes perdidos de la capacidad de la presa Santa Rosa a través del vaciado total o parcial de su embalse. Sin embargo, en el caso particular de la presa estudiada, se encontró que, con la conducción circular de 3 metros de diámetro de la descarga de fondo existente, el volumen de sedimento expulsado resulta bajo comparado con el sedimento acumulado a lo largo de los años que ha estado en operación y al que entra al embalse, según un primer análisis con las fórmulas básicas de la hidráulica fluvial.

Finalmente, se realizan algunas recomendaciones de cómo trabajar la simulación de flushing en modelos computacionales bidimensionales como Telemac-2D, calibrar los valores entrada y continuar con esta línea de investigación para hacer futuras recomendaciones para inducir el flushing a una extensión mayor del embalse, tanto para planes de mantenimiento en embalses como para la construcción de obras de desagüe para futuros proyectos.

Índice

Resumen	3
Índice de Ilustraciones	6
Índice de Tablas.....	8
1. Planteamiento del problema	8
1.1 Justificación y alcances.....	13
2. Estado del arte	13
2.1 Descripción del fenómeno físico e impactos que produce	13
3.1. Conceptos básicos de transporte de sedimentos	16
3.2. Clasificación y descripción de modelos.....	17
3.3. Descripción del funcionamiento y capacidades de dos modelos numéricos para flujo a superficie libre.....	18
3.5. Ecuaciones de la hidrodinámica.....	20
3.6. Ecuación de conservación de sedimentos	21
3. Desarrollo de la investigación.....	21
1.1. Descripción del caso de estudio	21
1.2. Metodología para el tratamiento de la información e implementación del modelo	24

4. Resultados obtenidos	35
5. Conclusiones.....	53
Bibliografía	55
Anexo 1. Fotografías y plano de la presa Santa Rosa.....	56
Anexo 2. Resultados adicionales.....	58
Anexo 3. Recomendaciones para mejorar los modelos numéricos de simulación flushing y trabajos futuros.	76

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1-1. Sedimentación potencial de presas en México.	11
Ilustración 3-1. Ilustración de los depósitos más comunes en embalses (Marengo, 2001).....	14
Ilustración 3-2. Cono de socavación creado por la presión del flushing (Annandale, Morris & Karkl, 2016).	16
Ilustración 4-1. Fotografía satelital de la presa Santa Rosa ubicada en el estado de Jalisco.....	22
Ilustración 4-2. Cortina de la presa Santa Rosa.....	22
Ilustración 4-3. Vertedor de excedencias de la presa Santa Rosa.....	23
Ilustración 4-4. Interfaz del SIG con las curvas de la batimetría del embalse Santa Rosa.....	25
Ilustración 4-5. Malla de cálculo para la geometría del embalse donde se aprecian las diferentes densidades de los elementos que la conforman, así como las estructuras de la cortina.	26
Ilustración 4-6. Geometría del modelo de telemac 2d con sus respectivas elevaciones del fondo.	28
Ilustración 4-7. Archivo de condiciones de frontera donde se muestra la condición de entrada (caudal) en la parte derecha representada con la línea azul y la condición de salida (elevación del nivel del agua) en la parte izquierda representada con la línea verde.....	29
Ilustración 4-8. Diagrama de flujo de la subrutina para el cálculo de la distancia de cualquier punto a dos rectas definidas con coordenadas definidas por el usuario.	30
Ilustración 4-9. Diagrama de flujo de la subrutina para la asignación de condiciones iniciales especiales mediante un código en FORTRAN.....	30
Ilustración 4-10. Esquema del principio de la energía en el que se basa telemac para el cálculo del flujo a través de las tuberías.....	31
Ilustración 4-11. Puntos de entrada y salida de la alcantarilla en la malla de la geometría del problema.....	32
Ilustración 4-12. Los seis diferentes tipos de flujo que pueden ocurrir a través de alcantarillas según Bodhaine. La línea roja representa el tirante crítico.	33

Ilustración 4-13. Ejemplo de archivo con la información necesaria para la ejecución de la función culvert en Telemac-2D.	35
Ilustración 5-1. Velocidades máximas presentadas durante la simulación, con abertura de 10 metros de ancho, y su escala de colores.	36
Ilustración 5-2. Comparativa de la evolución del fondo del embalse en la simulación donde descarga la presa por la obra de descarga en el fondo.	37
Ilustración 5-3. Niveles de la superficie libre del agua al inicio de la simulación (ilustración de arriba) con condición inicial igual al NAMO y al final de la simulación (24 horas después) cuando el agua embalsada ha sido vaciada (ilustración de abajo).	38
Ilustración 5-4. Serie de tiempo del transporte de sedimento de fondo en una sección transversal definida aguas abajo de la descarga de fondo.	39
Ilustración 5-5. Sedimentograma para las primeras seis horas de la simulación inicial.	40
Ilustración 5-6. Sedimentograma de la simulación con sección rectangular con Q constante y H = 721 msnm.	41
Ilustración 5-7. Vista en planta del embalse y el perfil longitudinal generado.	42
Ilustración 5-8. Perfil longitudinal del embalse con los niveles de la superficie libre de las diferentes simulaciones realizadas.	42
Ilustración 5-9. Análisis de resultados (velocidades) en Tecplot 360 EX: simulación alcantarilla, gasto medio (constante) y H = 726.46 msnm.	43
Ilustración 5-10. Vista en tres dimensiones de la batimetría del embalse Santa Rosa.	46
Ilustración 5-11. Vista en tres dimensiones de la evolución del fondo del embalse Santa Rosa de la simulación con caudal no permanente y elevación inicial igual al NAMO.	46
Ilustración 5-12. Vista en planta de la evolución del fondo del embalse Santa Rosa para la simulación con caudal no permanente y elevación inicial igual al NAMO.	47
Ilustración 5-13. Representación de las magnitudes de velocidades y tirantes en el primer instante de la simulación (600 s o 10 min).	47
Ilustración 5-14. Gasto medio anual igual a 81.1 m ³ /s usado para las simulaciones en el modelo numérico Telemac-2D.	48
Ilustración 5-15. Hidrograma triangular generado en función del gasto medio anual usado para las simulaciones en régimen no permanente con el modelo numérico Telemac-2D.	49
Ilustración 5-16. Discretización del hidrograma triangular para el análisis del sedimento entrante al embalse (empleando formulas básicas de hidráulica fluvial) asociado al régimen no permanente.	49
Ilustración 5-17. Perfil recortado del embalse donde ocurren los principales cambios en elevación del fondo para la simulación con caudal medio anual y elevación inicial igual al NAMO.	50

Ilustración 5-18. Sección transversal justo aguas arriba de la cortina y cambios en elevación del fondo a través del tiempo para la simulación con caudal medio anual y elevación inicial igual al NAMO.	51
Ilustración 5-19. Secciones transversales y perfil recortado aguas arriba de la cortina donde es más apreciable la evolución del fondo usados para generar las gráficas anteriores.	51

Índice de Tablas

Tabla 1-1. Tasa de sedimentación de embalses a nivel mundial (White, 2001).	9
Tabla 1-2. Clasificación de presas y bordos según criterios de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) (Arreguín, 2009).	10
Tabla 1-3. Embalse que han sido desazolvados exitosamente mediante flushing (Atkinson, 1996).	13
Tabla 3-1. Impacto de la sedimentación en embalses (Morris, Annandale & Hotchkiss, 2008).	15
Tabla 4-1. Características principales del caso de estudio (embalse Santa Rosa).	23
Tabla 5-1. Escenarios de las diferentes simulaciones realizadas del embalse Santa Rosa (ubicado en Jalisco, México) en el modelo numérico Telemac-2D.	44
Tabla 5-2. Resultado de las relaciones entre los volúmenes de sedimentos desalojados del embalse con el flushing y el sedimento de entrada al embalse.	45

1. Planteamiento del problema

En este trabajo se pretende analizar la posibilidad de usar un modelo numérico de flujo a superficie libre en dos dimensiones para simular el efecto del paso de sedimentos a través de una descarga de fondo con la finalidad de limpiar el sedimento acumulado en embalses. Así mismo verificar que volúmenes son recuperados al hacer un vaciado del embalse con diferentes niveles iniciales. Por lo que el principal objetivo es validar un modelo numérico de acceso libre para simular un embalse con problemas de sedimentación para especificar si en un caso particular es factible utilizar el lavado hidráulico (flushing) de manera periódica para recuperar los volúmenes ocupados por los sedimentos que han sido depositados en el embalse a través de los años.

White (2001) compila en la tabla 1-1 el porcentaje anual de pérdida de almacenamiento por sedimentación de diferentes países y/o regiones del mundo.

Tabla 1-1. Tasa de sedimentación de embalses a nivel mundial (White, 2001).

Región	Grandes presas en inventariadas	Almacenamiento (km³)	Porcentaje anual de pérdida de almacenamiento por sedimentación
China	22,000	510	2.3
Asia excluyendo a China	7,230	861	0.3-1.0
Norteamérica	7,205	1,845	0.2
Europa	5,497	1,083	0.17-0.2
Sur y Centroamérica	1,498	1,039	0.1
Norte de África	280	188	0.08-1.5
África Subsahariana	966	575	0.23
Medio Oriente	895	224	1.5
Nivel mundial	45,571	6,325	0.5-1.0

En nuestro país la construcción de presas para el aprovechamiento hídrico ha sido necesario para fines de distintas actividades como irrigación, abastecimiento de agua potable al sector urbano e industrial, la generación de energía hidroeléctrica, etc. En este sentido México cuenta con 836 grandes presas, 4,330 pequeñas inventariadas y alrededor de 8,000 presas y bordos pequeños no registrados (Arreguín, Marengo, & Murillo, Inventario Nacional de Presas, 2013). La Tabla 1-2 ilustra las dimensiones para la clasificación de presas y bordos.

Tabla 1-2. Clasificación de presas y bordos según criterios de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) (Arreguín, 2009).

R4.1 La clasificación de presas y bordos

Conforme a sus dimensiones, la CONAGUA aplica el siguiente criterio de clasificación a las obras de almacenamiento, desarrollado a partir del criterio de ICOLD.

Tamaño	Altura de la cortina	Almacenamiento
Grande	≥ 15 m	
	$5 \text{ m} \leq h < 15 \text{ m}$	$\geq 3 \text{ hm}^3$
Pequeña	$5 \text{ m} \leq h < 15 \text{ m}$	Entre 0.5 hm^3 y $h < 3 \text{ hm}^3$
Bordo	< 3 m	$\leq 0.5 \text{ hm}^3$

FUENTE: Arreguín C., F. y otros. *Bordos en México*. Ingeniería Civil. Pp. 12-18. Número 483. Colegio de Ingenieros Civiles de México. México, DF. Julio de 2009.

Según datos de varios estudios, gran cantidad de las presas del país ya están por cumplir con su vida útil, que varía entre los 20 a 50 años, aun así, muchas de ellas ya la han rebasado. Jara (2009) en su estudio señala que 71% de 290 presas que analizo ya pasaban de los 20 años de vida útil, llegando a un promedio de 36 años. Por otro lado, del 15% de las presas utilizadas en el estudio que contaba con información, el 26.26% excedía del 50% de su capacidad de azolves, encontrando dos de ellas que incluso excedían el 100% de su capacidad. Más del 80% de esas presas no contaba con equipo para medición de azolves, ni filtraciones, ya que solamente se reportan que 97 de las 4800 presas registradas hacia 2009 contaban con instrumentos de este tipo.

La ilustración 1-1 muestra la sedimentación potencial de presas en el territorio mexicano. Donde se aprecia la región coloreada en rojo que abarca las cuencas con potenciales más altos como la Lerma-Chapala, Santiago, Balsas, Pánuco y Soto La Marina.

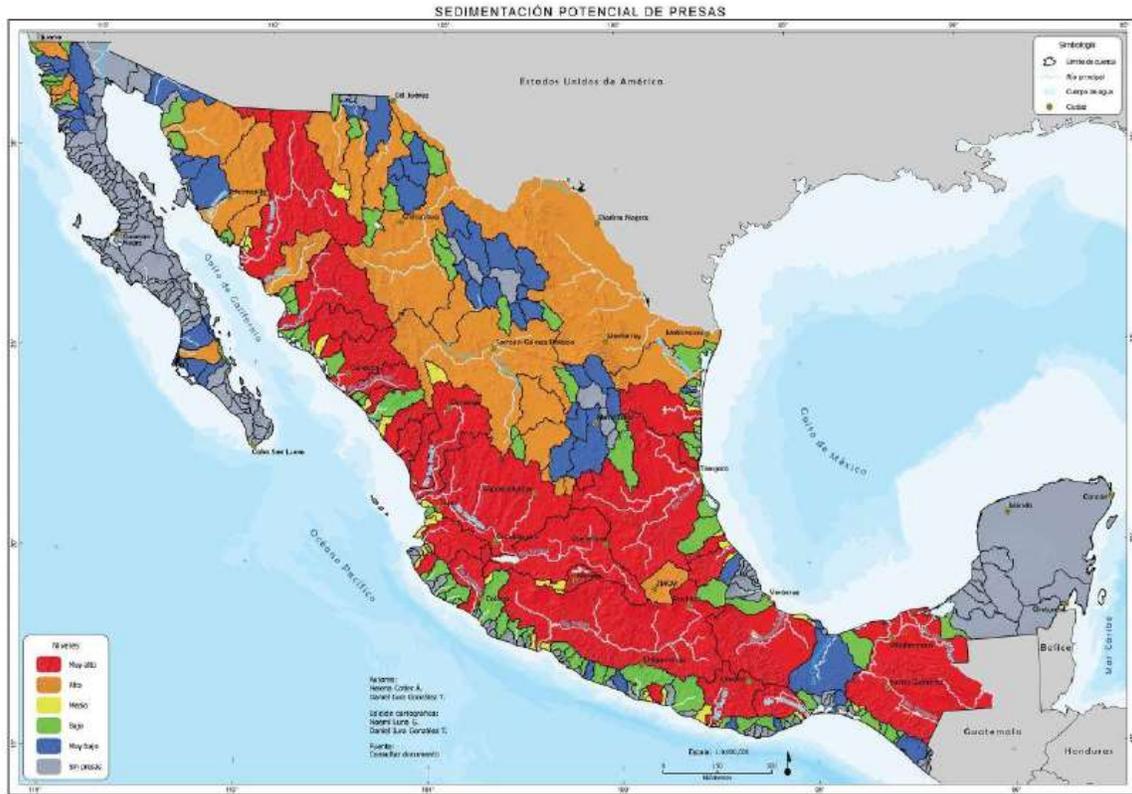


Ilustración 1-1. Sedimentación potencial de presas en México.

Investigaciones respecto a la cuantificación de producción de sedimentos en cuencas han sido conducidos principalmente utilizando la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE). (Ramírez, 2009) presenta las distintas metodologías existentes para estimar la producción de sedimentos en cuencas y su aplicabilidad considerando la información disponible en México para finalmente aplicar el método de Kothyari et. al. (1996) y el concepto de eficiencia de atrapamiento para estimar la producción de sedimento de la cuenca del río Apulco y que se llega a sedimentar en la presa la Soledad en el estado de Puebla.

Respecto al análisis de medidas directas para atender este problema Atkinson desarrollo en 1996 unos criterios cuantitativos para la evaluación de la factibilidad de la remoción hidráulica (flushing) de sedimentos. Esto criterios han sido ampliamente utilizados para evaluar si en un sitio en particular existe potencial para restituir la capacidad pérdida de sedimento y mantener un volumen usable en el largo plazo. Atkinson establece que para que este sea factible los siguientes criterios deben prevalecer:

- a) La cantidad de sedimentos transportados por el desagüe de fondo durante el flushing sea suficiente para permitir un balance a largo plazo entre la entrada de sedimentos y los sedimentos removidos por este medio.

- b) El volumen de depósitos restantes en el embalse después de que se haya completado un balance de sedimentos sea lo suficientemente pequeño para que un almacenamiento específico requerido sea alcanzado.
- c) Que el costo de implementación no supere los beneficios, siendo los costos principalmente el valor del agua empleada, pero puede incluir proveer nuevas compuertas en el fondo para ejecutar el flushing o el daño causado por la entrada de altas concentraciones de sedimentos al sistema fluvial aguas abajo, mientras que los beneficios principalmente el valor del recurso hídrico adicional que pueda ser almacenado.

Existen otros enfoques para determinar de una manera más sencilla un programa de manejo sustentable de sedimentos que se basan por ejemplo en los criterios empíricos de Atkinson para determinar si un embalse es capaz de recuperar su capacidad de almacenamiento inicial con el lavado de manera periódica, así como otras alternativas como el dragado mecánico o mediante sifón que son abordadas en la herramienta computacional RESCON o por sus siglas en inglés Reservoir Conservation generada por el World Bank.

La técnica del flushing no es ampliamente practicada debido a que:

- 1) Es usualmente efectivo solamente en embalse estrechos
- 2) Requiere evacuar grandes volúmenes de agua a través de la presa
- 3) Requiere que el embalse sea vaciado

Sin embargo, ha probado ser altamente efectiva en algunos casos. Por ejemplo, en el embalse de Mangahao en Nueva Zelanda 34 años después de que fue puesto en operación 59% del almacenamiento original de operación había sido perdido (1958). Este embalse fue removido de sedimentos mediante flushing en 1969, cuando 75% del sedimento acumulado se logró remover en tan solo un mes (Jowett, 1984).

Un número importante de intentos de flushing se han reportado en la literatura, pero solo algunos han sido exitosos. La Tabla 1-3 enlista algunos casos donde se encontró que el flushing resultaba para mantener los volúmenes de almacenamiento en exceso de alrededor de 50% de su capacidad inicial.

Tabla 1-3. Embalse que han sido desazolvados exitosamente mediante flushing (Atkinson, 1996).

Embalse	País	Referencia
Baira	India	Jaggi & Kashyap (1984)
Gebidem	Suiza	Dawans et al (1982)
Gmund	Austria	Rienossl & Schenelle (1982)
Hengshan	China	IRTCES (1985)
Honglingjin	China	IRTCES (1985)
Mangahao	Nueva Zelanda	Jowett (1984)
Naodehai	China	IRTCES (1985)
Palagneda	Suiza	Swiss Nat. Committee on Large Dams (1982)
Santo Domingo	Venezuela	Krumdiek & Chamot (1979)

1.1 Justificación y alcances

Cómo mencionan estudios previos la capacidad de almacenamiento en embalse a nivel mundial es perdida a un ritmo de 1% (Mahmood, 1987). Esto indica que las capacidades perdidas se dan a una velocidad mucho más alta que la que nueva capacidad es construida. Algunos casos importantes del medio mexicano que presentan este problema en un grado severo son las presas Tuxpango y La Soledad, que se ubican en Veracruz y Puebla respectivamente (Marengo, 1998).

Por lo tanto, resulta importante analizar si las herramientas modernas como lo son los modelos matemáticos representan adecuadamente el arrastre de los sedimentos depositados en un embalse y que tanto potencial tiene esta metodología para ser efectiva e implementarse con el fin de recuperar parte importante de los volúmenes perdidos. Obtener datos cuantitativos en casos particulares del medio mexicano que permitan validar la factibilidad y el costo beneficio de implementar esta técnica antes de dejar abandonada una obra de este tipo.

2. Estado del arte

En este capítulo se presentan varios aspectos de los estudios del flushing.

2.1 Descripción del fenómeno físico e impactos que produce

El fenómeno del azolvamiento en presas ocurre debido a que al interponer un obstáculo al río, como lo es la cortina, se origina un estancamiento del flujo dando lugar a que el sedimento transportado por la corriente hacia el embalse, primeramente el material grueso (granular) sea depositado en función de la disminución de la velocidad del flujo por el efecto de ampliación del cauce y el incremento del tirante, lo cual forma en la parte posterior del embalse una acumulación (montículo) de este sedimento grueso (arenas, gravas, etc.) llamado

delta. Mientras el sedimento más fino (cohesivo) continúa su viaje dentro del embalse como corriente de densidad hasta llegar a detenerse o como turbidez generalizada que va evolucionando según la operación específica del embalse (Gracia, 1996). La ilustración 3-1 presenta los tipos de depósitos de sedimentos en embalses.

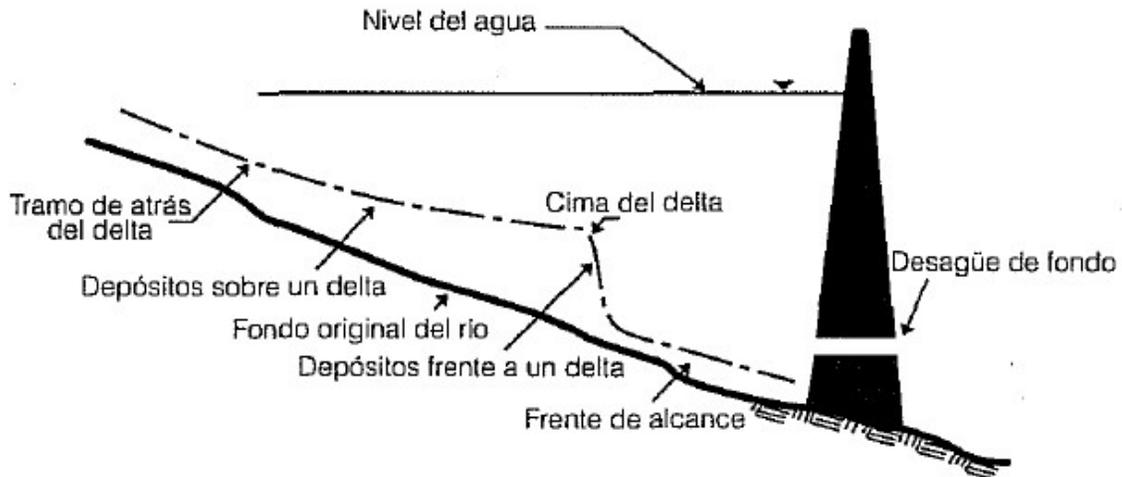


Ilustración 2-1. Ilustración de los depósitos más comunes en embalses (Marengo, 2001).

Este proceso resulta mucho más complejo de lo aparente debido a gran cantidad de factores que juegan parte como lo son la estratificación de temperaturas, forma, dimensiones y características especiales del embalse, operación, características fisicoquímicas del sedimento y las características de la avenida de ingreso, etc. (Manual de ingeniería de ríos: sedimentación en embalses (Conagua, 1996)).

El delta, que se forma con los sedimentos que salen en las secciones aguas arriba del río, se mueve hacia aguas adentro del vaso según sean las características de las avenidas y la variación de los niveles en el vaso. En grandes embalses, es de principal importancia este efecto ya que en ocasiones debido al remanso producido aguas arriba se inundan áreas que previamente no se inundaban. Existen casos especiales en los que incluso la cantidad del material grueso que llega al fondo provoca inestabilidades que ponen en peligro la cortina (Gracia, 1996).

Además, el material que alcanza el fondo del vaso puede depositarse y compactarse según transcurre el tiempo. Este efecto se ve afectado con los cambios de niveles del vaso, ya que se produce un alternado secado y humedecido del material sedimentado. Lo que trae consigo dos principales problemas, el cambio en el volumen a través del tiempo, y una mayor dificultad para remover el sedimento altamente compactado (Gracia, 1996).

Los impactos del azolvamiento en los embalses no solo ocurren en el almacenamiento sino también se extiende tanto aguas abajo lejos de la obra de descarga como aguas arriba en longitudes cortas. La Tabla 3-1 presenta los impactos más comunes.

Tabla 2-1. Impacto de la sedimentación en embalses (Morris, Annandale & Hotchkiss, 2008).

Ubicación de impacto y tipo	Descripción del impacto
Impactos dentro del embalse: Pérdida de almacenamiento Operación de la presa Sedimentos orgánicos Turbiedad	Reduce la producción, generación eléctrica y los beneficios de control de inundaciones. Los sedimentos pueden obstruir las tomas, interferir con la operación de compuertas y producir abrasión en el equipo hidromecánico. La demanda de oxígeno puede hacer que las aguas del fondo sean anaeróbicas. Se reduce la zona eufótica y decrece la productividad primaria. Estéticamente desagradable para la recreación.
Navegación	Sedimentación de puertos y canales de navegación. Interfiere con usos recreacionales y la pesca deportiva.
Contaminación del aire	Durante el vaciado del embalse, el sedimento fino expuesto al aire puede ser secado y transportado por el viento.
Impactos aguas arriba del embalse: Deposito del delta	Niveles más altos de inundación en el río y reducción del espacio libre para la navegación debajo de puentes.
Impactos aguas abajo del embalse: Reducción de la carga del material de fondo	Incisión del fondo del río y acelerada erosión en las márgenes. El fondo puede ser demasiado grueso para el desove. Estructuras tales como puentes, tomas, trabajos de rectificación pueden resultar socavados. Limita el suministro de arena que contribuye a la erosión costera. Reduce suministro de materiales agregados.
Reducción de carga de sedimento fino	Reducción en la entrega de nutrientes a los ecosistemas aguas abajo. Incrementos de la claridad del agua alteran las condiciones ecológicas y benefician al uso recreacional.

Otra característica importante de la implementación del flushing de embalses como medida directa de desazolve es la formación de un cono de socavación (scour cone o flushing cone). La ilustración 3-2 muestra el cono formado en la vecindad de la descarga al emplear la técnica del flushing. Con sedimentos granulares se produce un ángulo de reposo del cono del orden de los 30 grados considerando condiciones

de sumergimiento continuo, mientras que en el caso de sedimentos cohesivos este ángulo puede ser diferente.

Cono localizado de socavación creado por la presión del Flushing

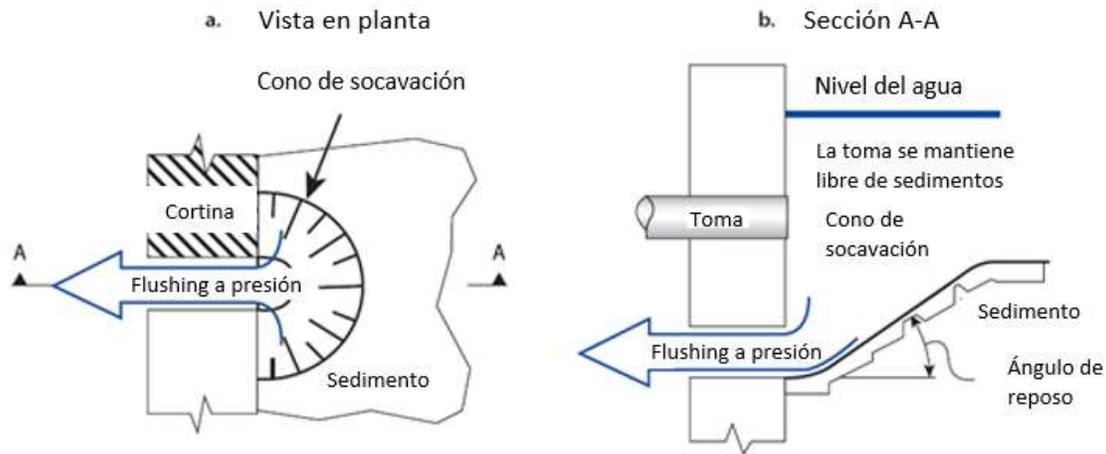


Ilustración 2-2. Cono de socavación creado por la presión del flushing (Annandale, Morris & Karki, 2016).

3.1. Conceptos básicos de transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos representa un fenómeno complejo de estudio que responde a dos funciones: la primera es en función de las características de la cuenca, y la última, las características del río. La primera indica la cantidad, naturaleza y propiedades físicas de los materiales para el transporte, y la segunda, la capacidad del sistema hidráulico para hacerlo (Zetina, 2013).

Los sedimentos llevados por un cauce son consecuencia de la degradación del suelo, dado que el material que viene de la erosión llega a las corrientes de los tributarios menores, por la capacidad que tiene la corriente de agua para transportar sólidos, como también por movimientos en masa, como son, desprendimientos, deslizamientos, etc.

El material transportado por el río que viene de aguas arriba puede continuar con su transporte siendo arrastrado por las corrientes mientras exista la suficiente capacidad de transporte, de lo contrario este se acumula dando lugar a los llamados depósitos de sedimentos.

Los sistemas fluviales forman y ajustan sus propios cauces, la carga de material a transportar y la capacidad de transporte tiende a alcanzar un equilibrio. Se dice que cuando un tramo del río ha conseguido el equilibrio, se ha obtenido su perfil de equilibrio. Sin embargo, existe la posibilidad de encontrar tramos o sectores de un río que hayan alcanzado su equilibrio, aunque estén separados por tramos que no lo hayan alcanzado (Zetina, 2013).

El mecanismo de transporte depende del tamaño del diámetro de los sedimentos. Por ejemplo, las partículas gruesas, como arenas, ruedan o se deslizan sobre otras cuando la velocidad es baja, sin embargo, con velocidades altas y con la turbulencia del escurrimiento pueden ser transportadas también en suspensión.

El transporte de sedimentos puede tener tres principales mecanismos de transporte (Marengo y Barragán, 2000):

- a) Solución: cuando cae el agua de la precipitación y se filtra en el suelo, algunos componentes de este se disuelven. Después con el movimiento del agua al infiltrarse a través de aberturas, poros y grietas de las rocas y disolver materiales en su trayecto. Hasta que gran parte de esta agua encuentra su curso a las corrientes que se ubican en niveles más bajos. Cabe recalcar que este material no llega a sedimentarse y por lo tanto no suele considerarse en la modelación numérica del flushing.
- b) Suspensión: se constituye de partículas de material sólido que son barridas por la corriente turbulenta de un río. Este proceso depende directamente de dos factores: la turbulencia del agua y la velocidad de caída de la partícula individual. La velocidad de caída es la relación que eventualmente alcanza cada grano cuando la aceleración causada por la gravedad se equilibra con la resistencia del flujo a través de la cual está cayendo el grano.
- c) Carga de lecho: se conforma por los materiales que son movidos a lo largo del fondo de la corriente. Las partículas de la carga de lecho se mueven hacia aguas abajo de tres posibles maneras: saltación, rodamiento y deslizamiento. Una partícula transportada por saltación como su nombre lo indica salta de un punto a otro de la corriente, primero levantada por una corriente turbulenta y despedida hacia adelante, en seguida si es demasiado pesada no logra mantenerse en suspensión y cae al fondo en algún punto aguas abajo. Algunas partículas cuyo diámetro es tan grande que no pueden ser levantadas, pero aun momentáneamente la corriente es capaz de empujar y llevarlas a lo largo del lecho del río y de acuerdo con su forma, se mueven hacia aguas abajo por rodamiento o por deslizamiento.

3.2. Clasificación y descripción de modelos

Algunos los modelos o técnicas que se han usado para estudiar el fenómeno físico de la sedimentación y la remoción hidráulica (flushing) en los embalses se engloban en las siguientes tres categorías: modelos físicos, modelos matemáticos y métodos empíricos.

Los modelos físicos son representaciones a escala reducida que representan a escala al objeto real o prototipo y tienen la característica de cumplir con ciertas condiciones matemáticas definidas. Hoy en día las técnicas de modelación física

que se disponen son avanzadas más aun el desarrollo de instrumentos de medición y equipos generadores de fenómenos a escala que permiten una predicción con grado alto de certidumbre de lo que podría ocurrir en el prototipo lo que permite obtener óptimos resultados en los aspectos de funcionalidad, estabilidad y economía de las estructuras por construir. El uso adecuado de estos modelos implica que exista una relación de semejanza al prototipo, para lo cual es necesario que las leyes de similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica, que en conjunto relacionan las magnitudes físicas homologas definidas entre ambos sistemas, el prototipo A_p y el modelo A_m (Vergara, 1993).

Los modelos matemáticos se constituyen de un conjunto de hipótesis y relaciones de las variables que describen un fenómeno que lleva a un problema matemático que se resuelve mediante alguna técnica matemática apropiada. En la mayoría de los casos las ecuaciones que rigen los fenómenos físicos no son posibles de resolverse analíticamente, por lo que se hace uso de métodos aproximados mediante un proceso de computación, los más utilizados son el de los elementos finitos y las diferencias finitas (Vergara, 1993).

La precisión de los modelos matemáticos está estrechamente relacionada a su costo de explotación, por lo que es imprescindible tomar en cuenta los siguientes factores:

- a) Exactitud de los datos iniciales
- b) Tipo de fenómeno a estudiar
- c) Exactitud de las ecuaciones que rigen el fenómeno
- d) Forma de aproximar las ecuaciones
- e) Evolución del modelo

Por último, los métodos empíricos como lo define su nombre son aquellos que están basados en la experiencia y observaciones realizadas previamente bajo un conjunto de condiciones particulares o entre un rango fijo de una o más variables de las que depende el fenómeno físico objeto de estudio. Generalmente estos métodos son de aplicación sencilla y rápidos, sin embargo, en muchas ocasiones se consideran simples aproximaciones burdas por lo que su utilidad se limita a dar un entendimiento básico del fenómeno físico.

3.3. Descripción del funcionamiento y capacidades de dos modelos numéricos para flujo a superficie libre.

Entre los modelos numéricos de código abierto más populares para simulación de flujo en 2D se encuentra Iber y Telemac.

El código Iber, es un software español, el cual incorpora un módulo para análisis de transporte de sedimentos (granulares). Este software trabaja con un esquema de cálculo en volúmenes finitos en mallas no estructuradas de elementos triangulares o cuadrangulares.

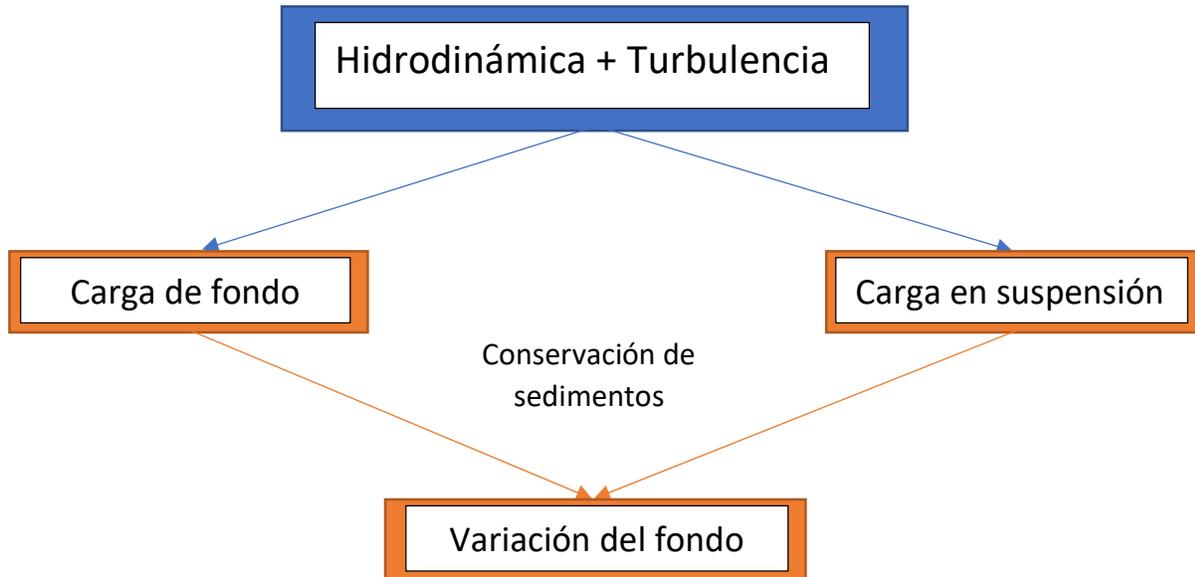
El módulo encargado de la hidrodinámica del flujo, que constituye la base de Iber, resuelve las ecuaciones de aguas poco profundas en 2D (SWD, por sus siglas en inglés). Estas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad. El módulo de transporte de sedimentos resuelve las ecuaciones para carga de fondo y la carga de transporte en suspensión basadas en la evolución del balance de masas en el fondo. Este utiliza el campo de velocidades y tirantes proporcionados por la hidrodinámica mientras que el caudal sólido que viaja por el fondo es determinado mediante una formulación empírica como lo son las expresiones de Meyer-Peter & Müller y la de Van Rijn.

Telemac-Mascaret es una suite integrada de solucionadores en el campo del flujo a superficie libre. El código de Telemac-2D resuelve las ecuaciones de flujo en superficie libre de tirante promedio derivadas por (Saint-Venant, 1871). Los principales resultados en cada nodo de la malla computacional son los tirantes y los componentes de la velocidad de tirante promedio. Las principales aplicaciones de Telemac-2D en el flujo a superficie libre marítimo o en la hidráulica de ríos y el programa es capaz de tomar en cuenta los siguientes fenómenos.

- Propagación de largas ondas, incluyendo efectos no lineales
- Fricción del fondo
- El efecto de la fuerza de Coriolis
- El efecto de fenómenos meteorológicos tales como presión atmosférica y viento
- Turbulencia
- Flujo supercríticos y subcríticos
- Influencia en la densidad de temperatura horizontal y gradientes de salinidad
- Coordenadas cartesianas o esféricas para dominios grandes
- Áreas secas en el campo computacional: planicies de inundación
- Tratamiento de singularidades: alcantarillas, diques, vertedores, etc.
- Rotura de presas
- Acoplamiento con transporte de sedimentos

El código Telemac tiene un módulo de simulación de transporte de sedimento y morfodinámica llamado Sisyphe que es parte de la hidrodinámica del sistema de elementos finitos. En este módulo la tasa de transporte de sedimentos se descompone entre carga de fondo y carga de suspensión que son calculadas en cada punto de la malla en función de varios parámetros del flujo (velocidad, tirante, altura de la onda, etc.) y parámetros de los sedimentos (diámetro de la partícula, densidad relativa, velocidad de caída, etc.). El proceso de transporte de sedimentos puede incluir el efecto de la pendiente del fondo, fondos rígidos, corrientes secundarias, falla de la pendiente, etc. El esfuerzo cortante del fondo se descompone en fricción del lecho y forma de arrastre, pudiendo ser calculado ya

sea imponiendo un factor de fricción (Strickler, Nikuradse, Manning o Chezy) o por un predictor de rugosidad del fondo.



3.5. Ecuaciones de la hidrodinámica

Conservación de masa y de la cantidad de movimiento (momentum) en dos direcciones horizontales

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{2 \partial x} + 2\Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h t_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h t_{xy}^e}{\partial y} + M_x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{2 \partial y} + 2\Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h t_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h t_{yy}^e}{\partial y} + M_y \end{aligned}$$

Donde h es el tirante, U_x , U_y son las velocidades horizontales de tirante promedio, g es la aceleración gravitacional, Z es la elevación del fondo, τ_s es la fricción de la superficie libre debido a la fricción inducida por el viento, τ_b es la fricción del fondo, ρ es la densidad del agua, w es la velocidad de rotación angular de la tierra, λ es la latitud del punto de estudio, t_{xx} , t_{xy} , t_{yy} son los esfuerzos tangenciales horizontales efectivos, y M_s , M_x , M_y son respectivamente los términos de fuente/drenaje de masa y momentum, los cuales son usados para modelar precipitación, infiltración y drenaje.

3.6. Ecuación de conservación de sedimentos

La variación del fondo es calculada con la ecuación de conservación de sedimento de Exner.

$$(1 - p) \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{sb,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sb,y}}{\partial y} = D - E$$

Donde p es la porosidad del sedimento que forma la capa del fondo, Z_b es el nivel del fondo, $q_{sb,x}$ y $q_{sb,y}$ son los componentes del flujo sólido. La diferencia $D - E$ es el balance entre la carga de fondo y la carga en suspensión.

3. Desarrollo de la investigación

1.1. Descripción del caso de estudio

Primeramente, en el desarrollo de este proyecto fue necesario identificar casos de embalse que presentará el problema de azolvamiento, fue seleccionado el caso del embalse de la presa Santa Rosa o Manuel M. Diéguez ubicada en el cauce del río Santiago en el municipio de Amatitán, Jalisco. La cual inició operaciones en 1964 y que cuenta con una central hidroeléctrica capaz de generar 61 megawatts de energía eléctrica, cuenta con una capacidad de almacenamiento de 403 millones de metros cúbicos de agua.

Respecto a la Hidrología se reporta un escurrimiento promedio anual de 2557.85 hm³, con un gasto medio anual de 81.10 m³/s. La cortina es del tipo arco-cúpula de concreto armado con altura de 114 m desde el desplante, con una corona de 150 m de longitud y 4.3 m de ancho, la elevación de la corona se encuentra a 747 msnm. El Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME) es de 748 msnm, el Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) es de 746.66 msnm en época de lluvias y de 744 msnm en época de estiaje y el Nivel Mínimo de Operación (NAMINO) de 710 msnm, mismo que actualmente es de 718 msnm por efectos de azolves. Cuenta con un canal a cielo abierto con cresta controlada para efectos de vertido, con cuatro compuertas radiales con capacidad de descarga de 7300 m³/s al NAME, la elevación de la cresta vertedora es de 731.5 msnm. Las ilustraciones 4-1, 4-2 y 4-3 presentan la vista satelital de la localización de la presa Santa Rosa en el estado de Jalisco, la vista de la cortina desde aguas abajo y el vertedor de excedencias.



Ilustración 3-1. Fotografía satelital de la presa Santa Rosa ubicada en el estado de Jalisco.



Ilustración 3-2. Cortina de la presa Santa Rosa.



Ilustración 3-3. Vertedor de excedencias de la presa Santa Rosa.

La Tabla 4-1 ilustra algunas de las características de la cuenca, el vaso, la presa Santa Rosa y su planta hidroeléctrica.

Cómo parte del desarrollo del problema específico planteado se trabajó con el modelo matemático Telemac 2d. Este modelo numérico para simular problemas de dinámica de fluidos fue desarrollado en 2010 por el Laboratorio Nacional de Hidráulica y del Medio Ambiente de Francia.

Tabla 3-1. Características principales del caso de estudio (embalse Santa Rosa).

CUENCA	
SUPERFICIE	79,271 km ²
PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL	760 mm
ESCURRIMIENTO MEDIO ANUAL	2,734 x 10 ⁶ m ³
AVENIDA MÁXIMA REGISTRADA	2,078 m ³ /s
VASO	
CAPACIDAD TOTAL	420 x 10 ⁶ m ³
CAPACIDAD MÍNIMA DE OPERACIÓN	112 x 10 ⁶ m ³
CAPACIDAD PARA AZOLVES	67 x 10 ⁶ m ³
CAPACIDAD ÚTIL	291 x 10 ⁶ m ³
CAPACIDAD PARA CONTROLAR AVENIDAS	160 x 10 ⁶ m ³
ÁREA MÁXIMA INUNDADA	1,108 ha
PRESA	
ALTURA MÁXIMA	114 m
LONGITUD DE LA CORONA	150 m
BORDO LIBRE	0.60 m
VOLUMEN DE CONCRETO	93 x 10 ³ m ³
MATERIALES	
TAMAÑO MÁXIMO DE GRAVA	102 mm
CEMENTO TIPO II MODIFICADO	250 kg/m ³
CONTENIDO DE CEMENTO Y PUZOLANA	
RESISTENCIA A LOS 28 DÍAS	250 kg/cm ²
ESFUERZOS	
COMPRESIÓN EN EL ARCO	77 kg/cm ²
VERTEDOR DE EXCEDENCIAS	
AVENIDA DE DISEÑO	8,200 m ³ /s
CAPACIDAD MÁXIMA DE DESCARGA	7,300 m ³ /s
CARGA	16.5 m
OBRA DE TOMA	
CAUDAL DE DISEÑO	100 m ³ /s
PLANTA HIDROELÉCTRICA	
NÚMERO DE UNIDADES	2 núm.
CAPACIDAD INSTALADA	61.2 MW
CARGA DE DISEÑO	71.1 m
CAUDAL DE DISEÑO	46.5 m ³ /s
GENERACIÓN MEDIA ANUAL	323 GWh

1.2. Metodología para el tratamiento de la información e implementación del modelo

El primer paso del desarrollo fue el digitalizar la información de la batimetría de un estudio previo del embalse Santa Rosa realizado en el 2006. Esto se hizo a través de un Sistema de Información Geográfico (SIG) de uso libre, donde se generó una capa vectorial del tipo polilínea donde cada a curva le corresponde una elevación. La ilustración 4-4 muestra la información digitalizada y la interfaz del software QGIS.

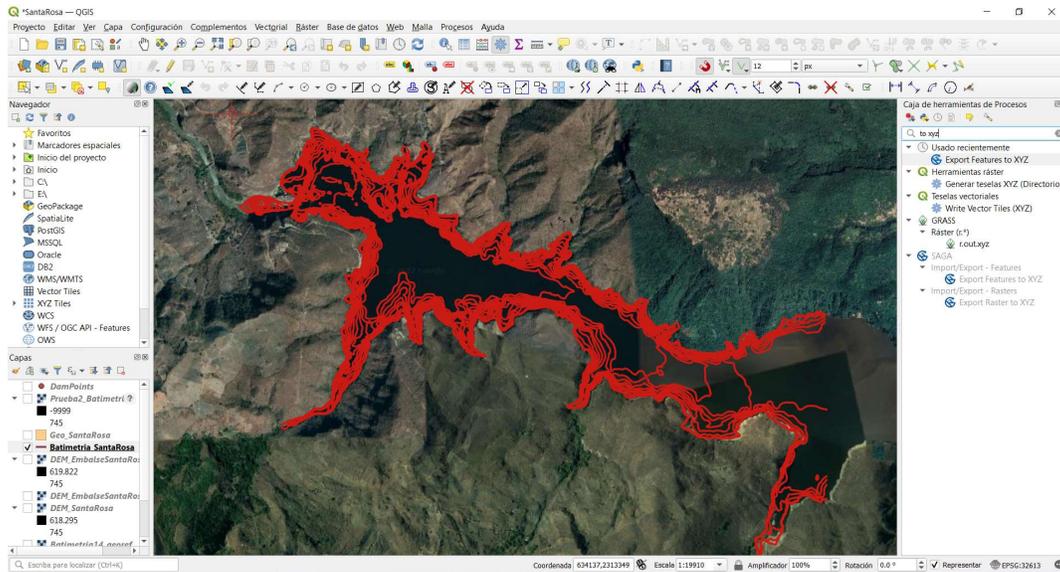


Ilustración 3-4. Interfaz del SIG con las curvas de la batimetría del embalse Santa Rosa.

Una vez obtenida esta información, se exportó con las herramientas de QGIS a un formato xyz mismo que es posible importar al software BlueKenue 64, el cual se utiliza para el preproceso del modelo que resuelve Telemac-2d. El archivo xyz es un archivo legible para Excel en el cual fue necesario eliminar los puntos fuera del dominio es decir los que asigna el SIG automáticamente como -999. Este archivo posteriormente se importó en BlueKenue, en donde se prepararon los archivos necesarios para generar la geometría del modelo a correr. Lo primero fue delimitar una línea de contorno del dominio del problema para esto se usó de referencia los puntos del archivo de la batimetría, luego se delimitaron polígonos que definirían la estructura de la cortina como dos figuras independientes para dejar el área donde va la descarga de fondo libre para asignarle la elevación del fondo respectiva.

La malla se creó primeramente intentando con diferentes tamaños de la longitud del borde de los elementos y radio de crecimiento de borde, esto para obtener una malla como mayor densidad de elementos en las áreas de más interés y una transición entre los diferentes tamaños de elementos más suave. Para las zonas de refinamiento se añadieron dos polígonos, uno cubriendo el área más cercana a la descarga y el otro cubriendo una extensión de alrededor de 100 metros aguas arriba de la cortina y 50 metros aguas abajo, los tamaños usando fueron 2.5 m y 7.5 m respectivamente. Los dos polígonos de la cortina fueron definidos como SoftLines para que el programa los identificara en la malla como islas, áreas con paredes verticales por las cuales el flujo no puede circular, las zonas de refinamiento se añadieron como Density con su valor correspondiente para indicar a la herramienta una densidad de elementos especial y el contorno se añadió a la malla como Outline. Las primeras mallas generadas presentaron problemas para seguir la geometría definida por el polígono de contorno por lo que este fue discretizado

mediante la opción Resample para que añadieran puntos a una distancia de cada metro, sin embargo, esto no mejoró completamente algunas zonas de la malla para lo cual fue necesario definir varios puntos de control para forzar a la malla a generar nodos ahí. Esto último se repitió una serie de veces hasta que la malla quedó lo mejor posible. La ilustración 4-5 presenta la malla resultante del proceso.

Algunas otras complicaciones en el preproceso de la geometría fueron la dificultad para que los elementos triangulares de la malla sigan geometrías complejas (irregulares) como en este caso la geometría de este embalse, al añadir puntos de control para forzar a la malla a generar nodos en estos puntos llega a ocurrir que son ignorados algunos de los puntos y otros puntos que son considerados generan elementos adicionales superpuestos que requieren ser editados para evitar problemas a la hora de la ejecución de Telemac-2D. El proceso de editar las mallas en ocasiones se vuelve ineficiente ya que probando con dos equipos de cómputo con las siguientes características: 1. Intel Core i7-8750H @ 2.2 GHz y 16 GB en RAM, 2. Intel Core i7-6700 @ 3.40 GHz y 16 GB en RAM, resulta muy lenta la edición de la malla por lo que se recomienda que las zonas irregulares sean trabajadas con elementos no muy grande sobre todo donde se requiere detalle en resultados porque de esta manera los elementos de la frontera siguen mejor el polígono de contorno del modelo.

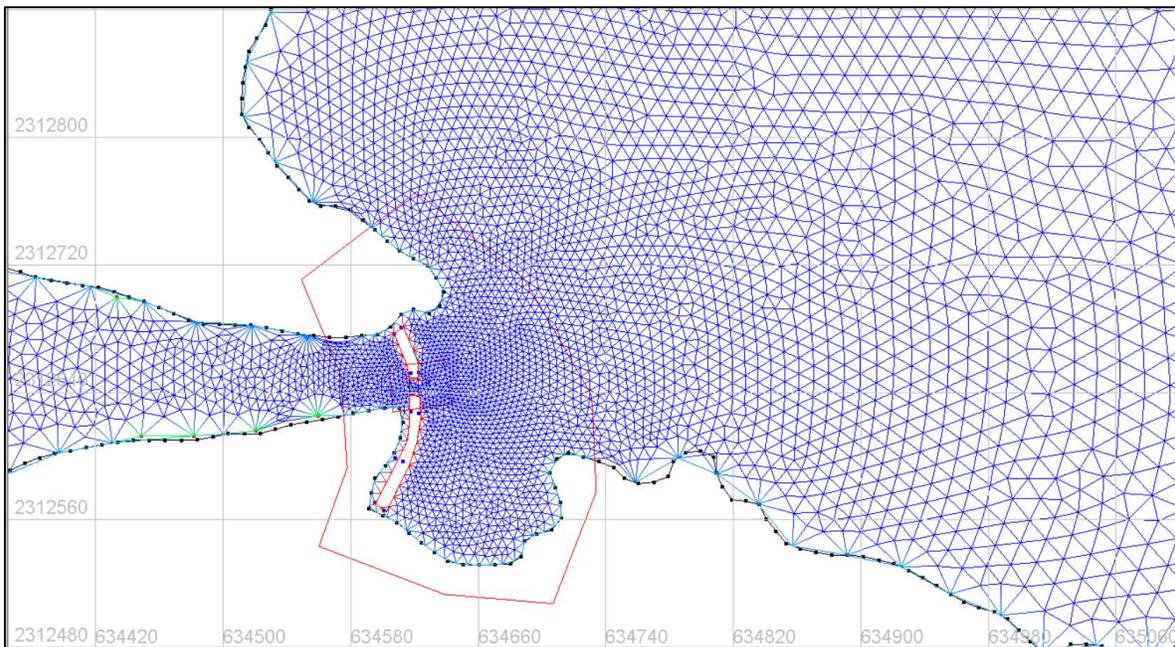


Ilustración 3-5. Malla de cálculo para la geometría del embalse donde se aprecian las diferentes densidades de los elementos que la conforman, así como las estructuras de la cortina.

La herramienta empleada para asignar las elevaciones de la batimetría a la malla fue el interpolador 2d que trae precargado el software, este interpolador requiere de dos archivos para funcionar, un Constraint Outline que es el polígono que delimita el perímetro del dominio y el archivo de la batimetría de formato xyz. Para asignarle las elevaciones a cada nodo de la malla se utilizó la herramienta Map Object donde se selecciona el interpolador 2D creado anteriormente. En seguida, se mapea también con esta última función el fondo de la estructura que permite el paso del flujo (descarga o desagüe de fondo) y también la elevación superior a la que esta llega.

Para la creación de los archivos que lee directamente Telemac-2d se añaden un nuevo archivo Selafin o con extensión slf el cual contendrá la geometría, que es indispensable para cualquier simulación, y un nuevo archivo de condiciones de frontera o Boundary Conditions en inglés. En el primer archivo se añaden dos variables Bottom y Bottom Friction, la primera se refiere al fondo, es en esta donde se le añade la malla y se repite el procedimiento de asignarle la elevación mediante el interpolador 2d, para la segunda variable se le añade la malla y se le asigna un valor constante de coeficiente de fricción. Para el archivo de condiciones de frontera es necesario seleccionar una frontera de la malla que conecta una serie de nodos para asignarle el tipo de condición que se le dará, este software permite añadir condiciones de tirante, caudal, elevación de la superficie libre del agua y caudal, componentes de velocidad horizontales, componentes de velocidad horizontales y elevación de la superficie libre del agua o frontera cerrada que es la se asigna por defecto. La ilustración 4-6 presenta el archivo de geometría generado con las elevaciones correspondientes a la topografía del embalse mientras que la ilustración 4-7 muestra el mismo archivo en una vista tridimensional procesada en BlueKenue 64.

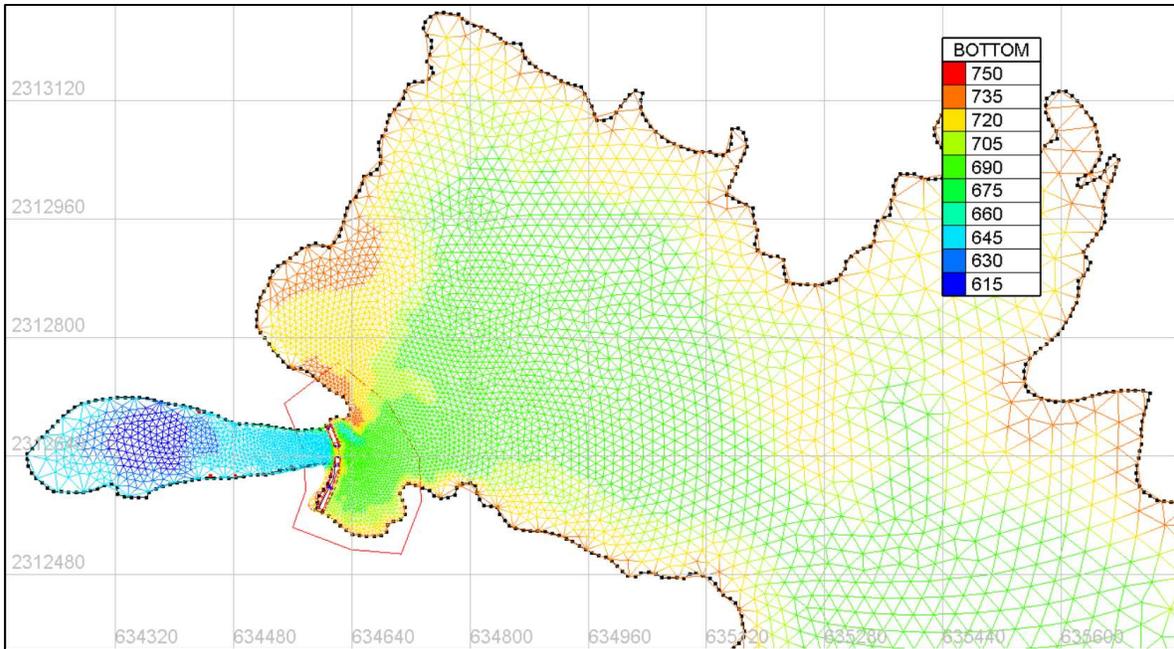


Ilustración 3-6. Geometría del modelo de telemac 2d con sus respectivas elevaciones del fondo.

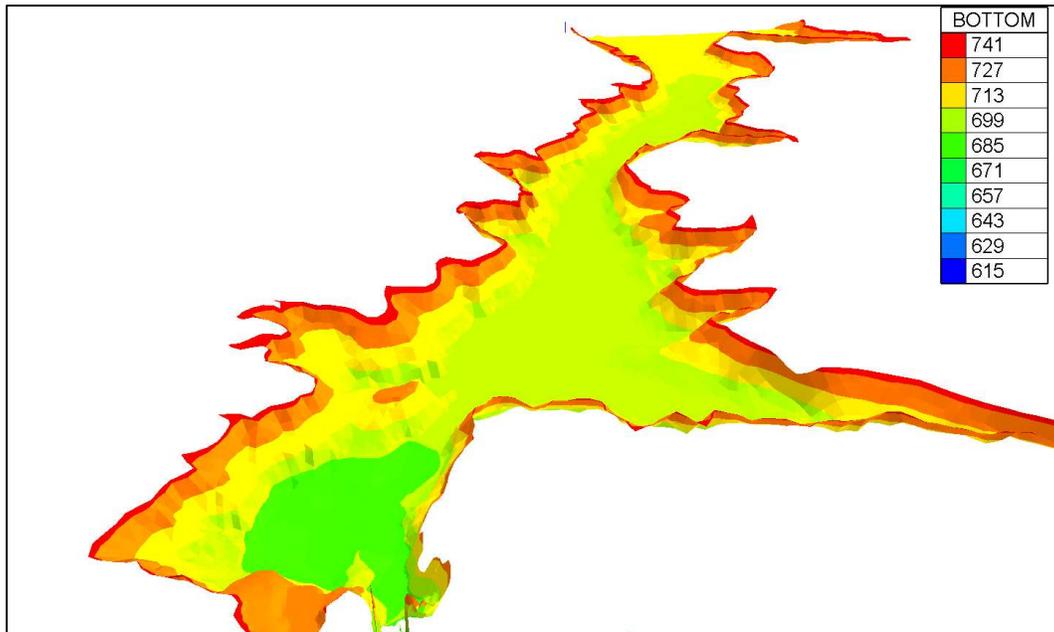


Ilustración 3-7. Vista en 3D de la batimetría del embalse Santa Rosa procesada en BlueKenue 64.

Los archivos controladores del modelo son archivos de texto que se componen de una serie de apartados donde se definen los archivos de entrada, salida, el tiempo máximo de simulación, paso de tiempo, iteraciones, los valores de las condiciones

iniciales y de frontera, así como algunos parámetros físicos necesarios y algunos otros para el esquema de cálculo. Para la simulación del problema se requirió preparar dos archivos uno para Telemac-2d y otro para Sisyphé mismo que se acoplan para que al mismo tiempo que se resuelve la hidrodinámica se resuelva el transporte y evolución del fondo. La ilustración 4-8 muestra la geometría del caso de estudio con las condiciones de frontera en colores azul (entrada) y verde (salida).

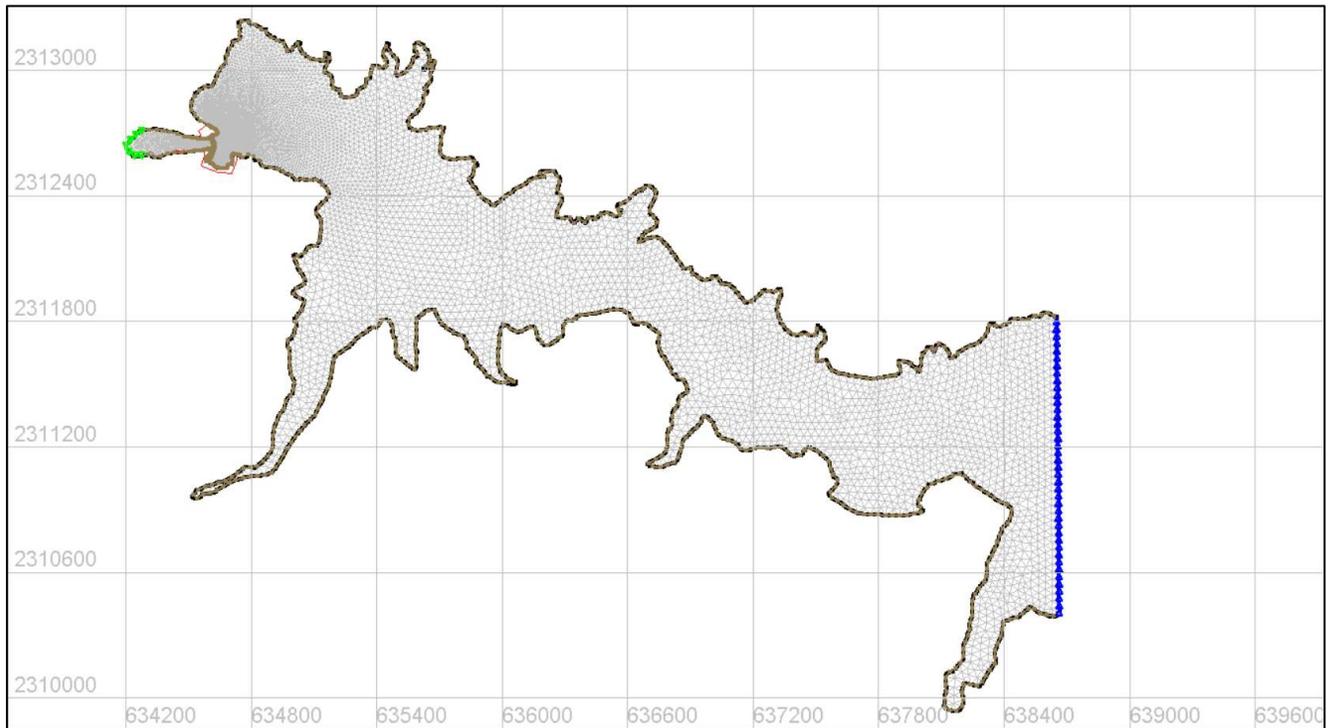


Ilustración 3-8. Archivo de condiciones de frontera donde se muestra la condición de entrada (caudal) en la parte derecha representada con la línea azul y la condición de salida (elevación del nivel del agua) en la parte izquierda representada con la línea verde.

Para las condiciones iniciales fue necesario señalar unas condiciones especiales que fueron asignadas mediante la programación de una subrutina en FORTRAN, en donde a través de puntos coordinados se calculan rectas que sirve como condición para verificar mediante un proceso iterativo si un punto de la malla se encuentra a la derecha o izquierda de estas rectas y asignarle la elevación de la superficie libre del agua requerida como condición inicial o una elevación diferente si no se cumple el caso. La elevación asignada en esta subrutina para los nodos aguas arriba de la cortina fue la del Nivel de Aguas Máximo Ordinario mientras que aguas abajo se consideró una condición de nivel cero. Las ilustraciones 4-9 y 4-10 presentan las dos subrutinas utilizadas para generar estas condiciones.

Subrutina para el cálculo de la distancia entre un punto y una recta



Cálculo de una recta de la forma $A1 + B1 + C1 = 0$ mediante dos puntos coordenados



Cálculo de la distancia de un punto cualquiera y la recta. Mediante la siguiente expresión

$$DISTAN = \frac{(A1 * X3) + (B1 * Y3)}{\sqrt{A1^2 + B1^2}}$$

Ilustración 3-9. Diagrama de flujo de la subrutina para el cálculo de la distancia de cualquier punto a dos rectas definidas con coordenadas definidas por el usuario.

Subrutina para la asignación de condiciones iniciales especiales para el problema



Declaración de variables de puntos para las rectas a usar en las estructuras condicionales



Ciclo iterativo que analiza los puntos de la malla uno a uno, calcula la distancia entre las dos rectas y el punto y finalmente asigna la condición de elevación del nivel del agua si es la distancia es negativa o positiva.

Ilustración 3-10. Diagrama de flujo de la subrutina para la asignación de condiciones iniciales especiales mediante un código en FORTRAN.

El archivo generado de resultados se guarda automáticamente en la misma carpeta de la simulación la extensión slf que puede ser abierto y visualizado en BlueKenue 64 para ver animaciones de las principales variables hidráulicas como superficie libre del agua, tirantes, velocidades medias y morfológicas como la elevación del fondo, el cambio en el fondo, etc.

Para simular la descarga de fondo en el modelo numérico se hizo uso de la herramienta Culvert que permite añadir una alcantarilla al mallado de la geometría ya sea con sección transversal circular o rectangular. La descarga de fondo fue definida como sección circular de diámetro de 3 m la cual cuenta con una capacidad reportada de 95 m³/s según datos del Sistema de Seguridad de Presas (Conagua, 2023). Este software utiliza el trabajo de Bodhaine para categorizar el flujo a través de la alcantarilla en seis tipos, calculando el caudal de distinta forma según el caso. Dichas ecuaciones fueron deducidas de los principios de continuidad y conservación de energía entre la sección de llegada y la salida de la sección de la alcantarilla. La ilustración 4-11 presenta esto mismo de manera gráfica.

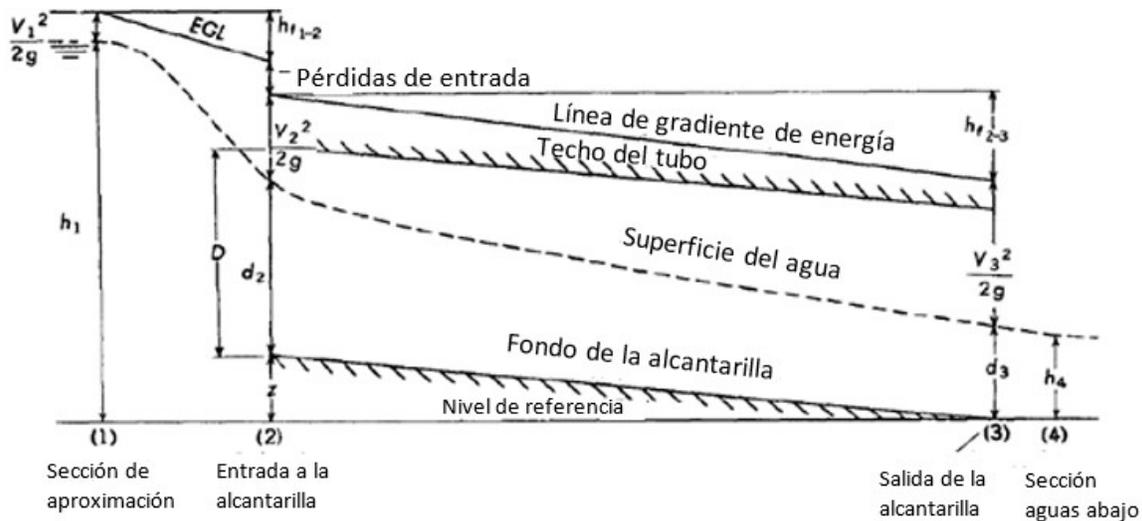


Ilustración 3-11. Esquema del principio de la energía en el que se basa telemac para el cálculo del flujo a través de las tuberías.

Las simulaciones que se presentan a continuación se realizaron utilizando la función Culvert mencionada anteriormente, para esto fue necesario identificar en la malla de la geometría del modelo los puntos que funcionarían como sumidero y fuente que se muestran en la ilustración 4-12 donde el punto a la derecha funciona como sumidero y el punto a la izquierda como fuente.

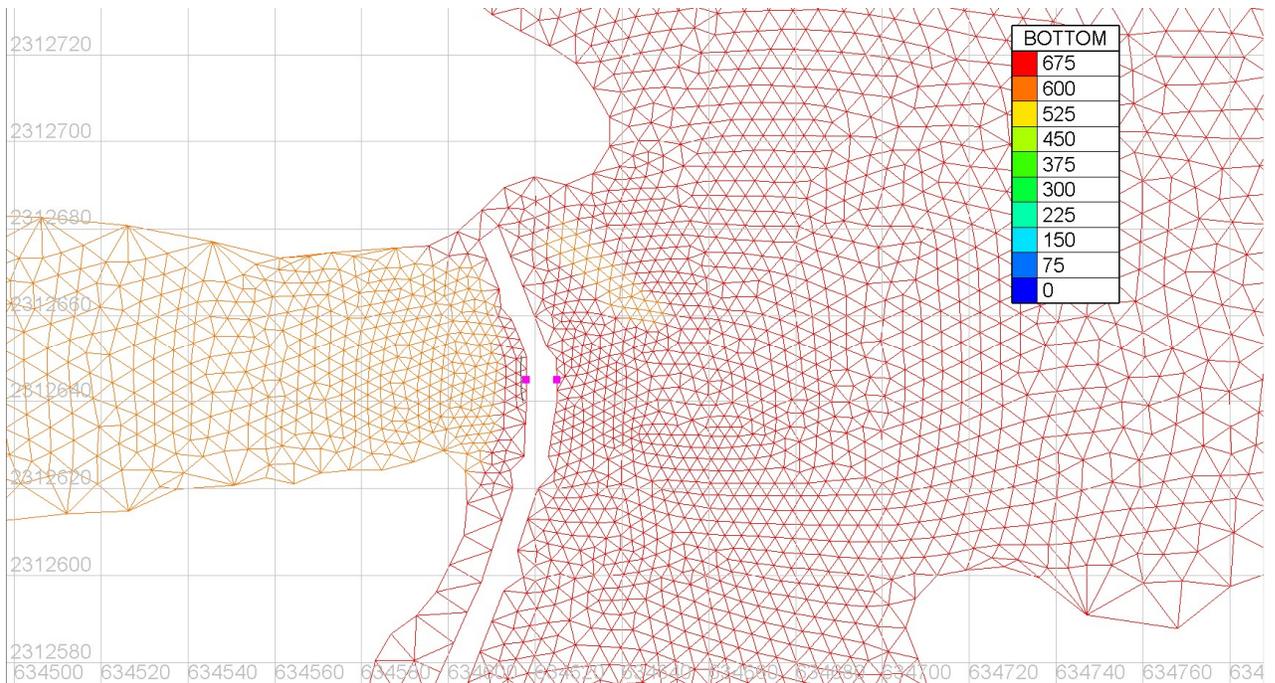


Ilustración 3-12. Puntos de entrada y salida de la alcantarilla en la malla de la geometría del problema.

Los tipos de flujo clasificados por Bodhaine están ligados a los tirantes aguas arriba y aguas abajo de la alcantarilla. La ilustración 4-13 presenta los diferentes tipos de flujo que se pueden desarrollar de acuerdo con las ecuaciones desarrolladas. Básicamente Telemac trabaja con las alcantarillas como dos puntos (sumidero y fuente), entre las cuales el flujo transita. La expresión general con la que se define este fenómeno es la ecuación siguiente.

$$Q = A_0 \left(\frac{2g(H_1 - H_2)}{\sum C_i} \right)^{1/2}$$

Donde

Q (m³/s): es el caudal en la alcantarilla

A₀ (m²): área de la entrada del flujo

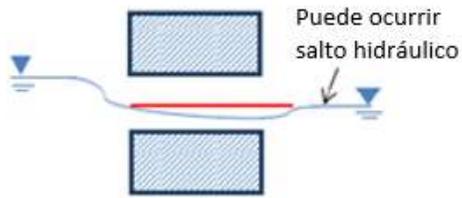
g (m/s²): aceleración de la gravedad

H₁ (m): nivel de la superficie libre aguas arriba (punto del flujo de entrada)

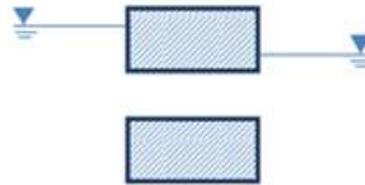
H₂ (m): nivel de la superficie libre aguas abajo (punto del flujo de salida)

C_i: coeficientes de pérdidas de la alcantarilla

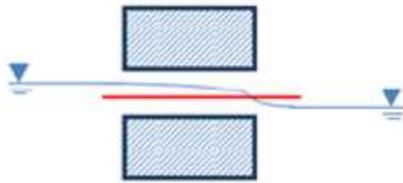
Tipo 1. Tirante crítico a la entrada



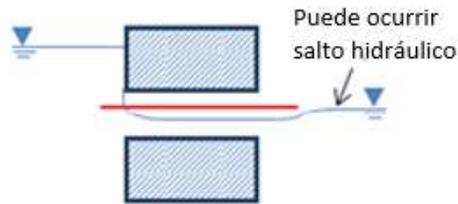
Tipo 4. Salida sumergida



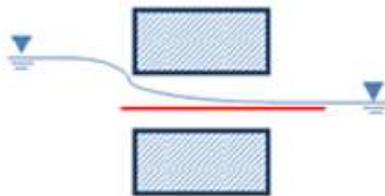
Tipo 2. Tirante crítico a la salida



Tipo 5. Flujo supercrítico a la entrada



Tipo 3. Flujo subcrítico



Tipo 6. Flujo completo con descarga libre

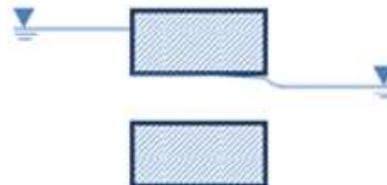


Ilustración 3-13. Los seis diferentes tipos de flujo que pueden ocurrir a través de alcantarillas según Bodhaine. La línea roja representa el tirante crítico.

Para definir esta función en el archivo controlador de telemac es necesario que el usuario defina los siguientes parámetros y determine el caso que se presenta para realizar los cálculos en cada paso de tiempo.

- Coeficiente de relajamiento (es utilizado inicialmente para determinar la descarga en la alcantarilla de forma progresiva para evitar la formación de un remolino).
- I1 e I2 son los números de nodos de la malla donde el sumidero (I1) y la fuente (I2) desean ser colocados.
- CE1 y CE2 son los coeficientes de pérdidas en 1 (sumidero) y 2 (fuente) cuando operan como entrada de flujo.

- CS1 y CS2 son los coeficientes de pérdidas en 1 (sumidero) y 2 (fuente) cuando operan como salida del flujo.
- LRG es el ancho de la alcantarilla.
- HAUT1 y HAUT2 son las alturas de la obra (en metros) en la entrada y en la salida del flujo.
- CLP se utiliza para indicar la dirección del flujo (CLP = 0, se permite flujo en ambas direcciones; CLP = 1, se permite el flujo solamente de la sección 1 a la sección 2; CLP = 2, se permite el flujo solamente de la sección 2 a la sección 1; CLP = 3, no se permite el flujo).
- LBUS es un coeficiente lineal de pérdida de carga en la alcantarilla (generalmente se acepta igual a $\lambda L/D$ donde L es la longitud de la tubería, D es el diámetro y λ es el coeficiente de fricción).
- Z1 y Z2 son los niveles de la sección de entrada y salida.
- CV es un coeficiente de pérdida debido a la presencia de una válvula.
- C56 es una constante usada para diferenciar los tipos de flujo 5 y 6 en la formulación de Bodhaine.
- C5 y CV5 son coeficiente de corrección de C1 y CV debido a la ocurrencia del tipo de flujo 5 en la formulación de Bodhaine.
- CT es un coeficiente de pérdida que toma en cuenta la presencia de rejillas para obstruir el paso de basura y escombros.
- FRIC es el coeficiente de rugosidad de Manning.
- LENGTH es la longitud de la alcantarilla.
- CIRC es un parámetro para definir la sección es circular (CIRC = 1) o rectangular (CIRC = 0).
- A1 y A2 son los ángulos con respecto al eje de las abscisas (eje x).
- D1 y D2 son los ángulos que forma la tubería con respecto al fondo (en grados).
- AA es un parámetro que permite escoger si A1 y A2 son calculados automáticamente por Telemac-2D o si los valores proporcionados por el usuario son respetados (AA = 1, ángulo automático; AA = 2, ángulo definido por el usuario).

En estas siguientes simulaciones fue necesario generar un archivo para el culvert indicado los parámetros mencionados anteriormente como los coeficientes de pérdidas, coeficiente de rugosidad, longitud, sección transversal del conducto, etc. La ilustración 4-14 muestra un ejemplo del formato del archivo con estos datos.

1	Relaxation, Number of culverts
2	0.2 1
3	I1 I2 CE1 CE2 CS1 CS2 LRG HAUT1 CLP LBUS Z1 Z2
4	1144 1046 0.5 0.5 1.0 1.0 3.0 3.0 1 0.2 718 718

CV	C56	CV5	C5	CT	HAUT2	FRIC	LENGTH	CIRC	D1	D2	A1	A2	AA
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.018	7.0	1	90.	0.	0.	90. 0

Ilustración 3-14. Ejemplo de archivo con la información necesaria para la ejecución de la función culvert en Telemac-2D.

Debido a que las primeras simulaciones con esta función no fueron satisfactorias al presentar inestabilidades; es decir, resultados nulos o inconsistentes en algunos pasos de tiempos fue necesario hacer otras pruebas ajustando ciertos parámetros como los son el disminuir el número de Courant para el cálculo de resultados, el disminuir el periodo de acoplamiento, etc. Para de esta manera ver qué es lo que ocasionaba este problema y de qué manera corregir estas simulaciones y encontrar los resultados más adecuados a las condiciones dadas.

Finalmente, con las inestabilidades corregidas se procedió a ejecutar un total de 12 simulaciones divididas entre condición de caudal permanente y no permanente y condiciones iniciales de nivel de la superficie libre variable. En los archivos de resultados se considera la cuantificaron los volúmenes de sedimentos extraídos y concentraciones. Con ellos se generaron sedimentogramas, hidrogramas de salida y gráficas de perfiles y secciones transversales utilizando el programa Excel.

4. Resultados obtenidos

La ilustración 5-11 representa uno de los resultados más importantes y es el campo de velocidades unos minutos después de iniciada la simulación donde se aprecian velocidades máximas que van de los 4 m/s hasta casi 19 m/s en la vecindad de la obra de descarga.

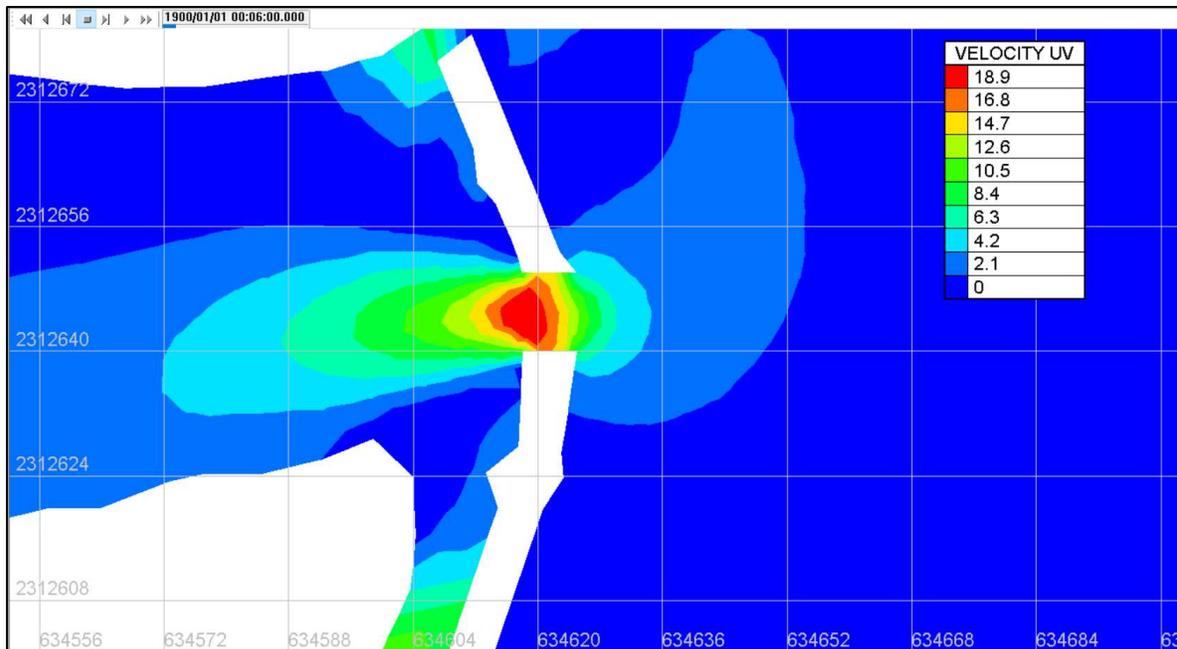


Ilustración 4-1. Velocidades máximas presentadas durante la simulación, con abertura de 10 metros de ancho, y su escala de colores.

Respecto a la evolución de fondo, cómo se esperaba, esta se concentra en el área cercana a la cortina. Lo que confirma la formación del cono de flushing o flushing-cone como reportan otros investigadores en la literatura. La erosión del sedimento depositado según se aprecia en la animación de los resultados del fondo que se produce ocurre únicamente en área limitada cercana a la cortina, hasta aproximadamente 200 metros aguas arriba. El archivo de resultados para la simulación de 24 horas o un día completo muestra un cambio significativo en el nivel del fondo, por ejemplo, a 30 metros de la cortina cambios generados por la erosión de hasta menos 10 metros del nivel original y depósitos aguas abajo de la cortina donde la velocidad comienza a bajar hasta alrededor de 2 m/s. La ilustración 5-2 presenta los cambios en la elevación del fondo al inicio de la simulación $t = 0$ s y al finalizar la simulación con $t = 86400$ s, donde el principal cambio se aprecia muy ligeramente entre la zona más cercana a la cortina donde el nivel del fondo del embalse llega a bajar como se comentó antes y se llega a depositar un porcentaje de este material erosionado unos pocos metros aguas debajo de la cortina donde la velocidad ya no es suficiente para seguir arrastrándolo.

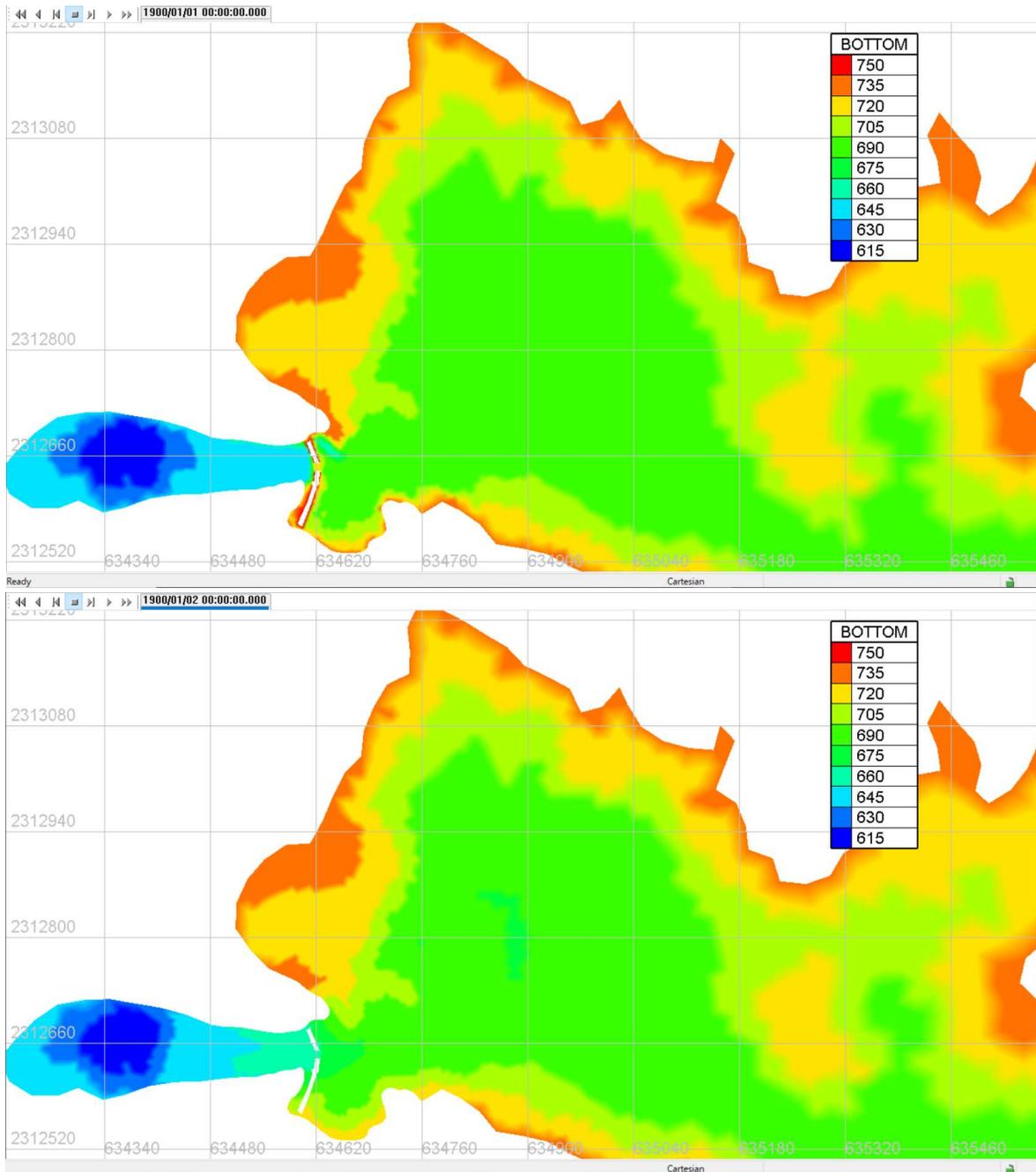


Ilustración 4-2. Comparativa de la evolución del fondo del embalse en la simulación donde descarga la presa por la obra de descarga en el fondo.

Otro resultado importante a señalar es de la hidrodinámica la evolución de la superficie libre del agua que nos indica el vaciado del embalse conforme avanza el tiempo desde la apertura de la descarga o desagüe de fondo. El cual según los resultados tarda alrededor de cinco horas y media para vaciarse completamente y que circule el flujo cómo si se tratase de un río en condiciones naturales. La

ilustración 5-3 muestra las condiciones de los niveles de la superficie libre del agua al inicio de la simulación, es decir antes de vaciarse el embalse con el Nivel de Aguas Máximo Ordinario como condición inicial y los niveles después de las 24 horas simuladas.

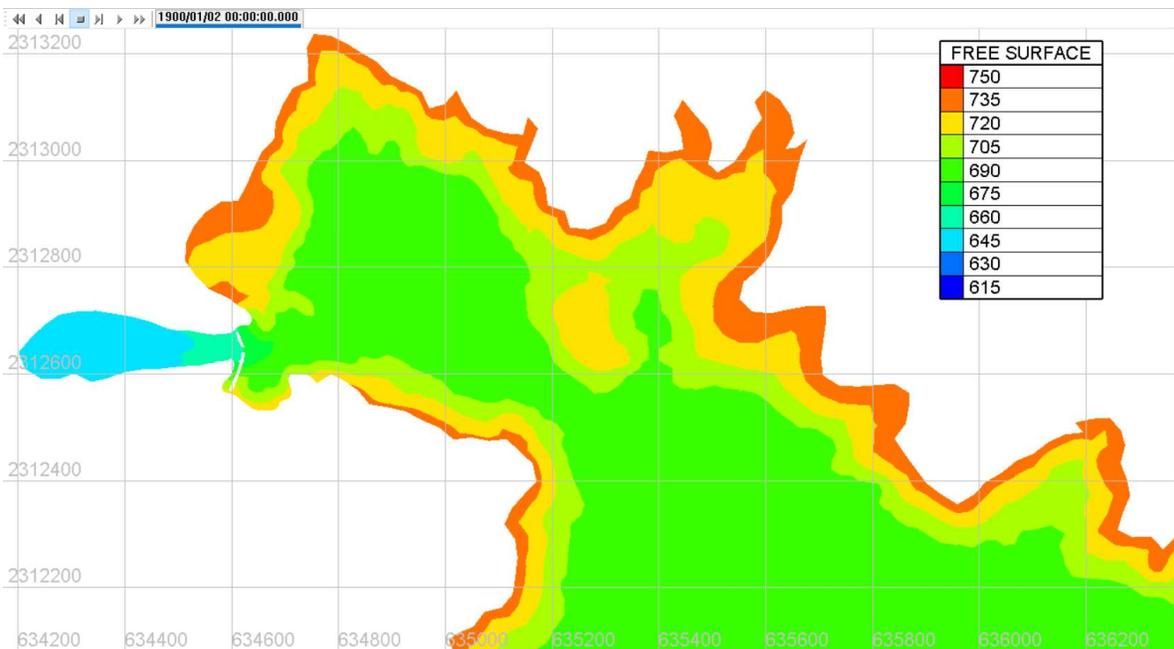
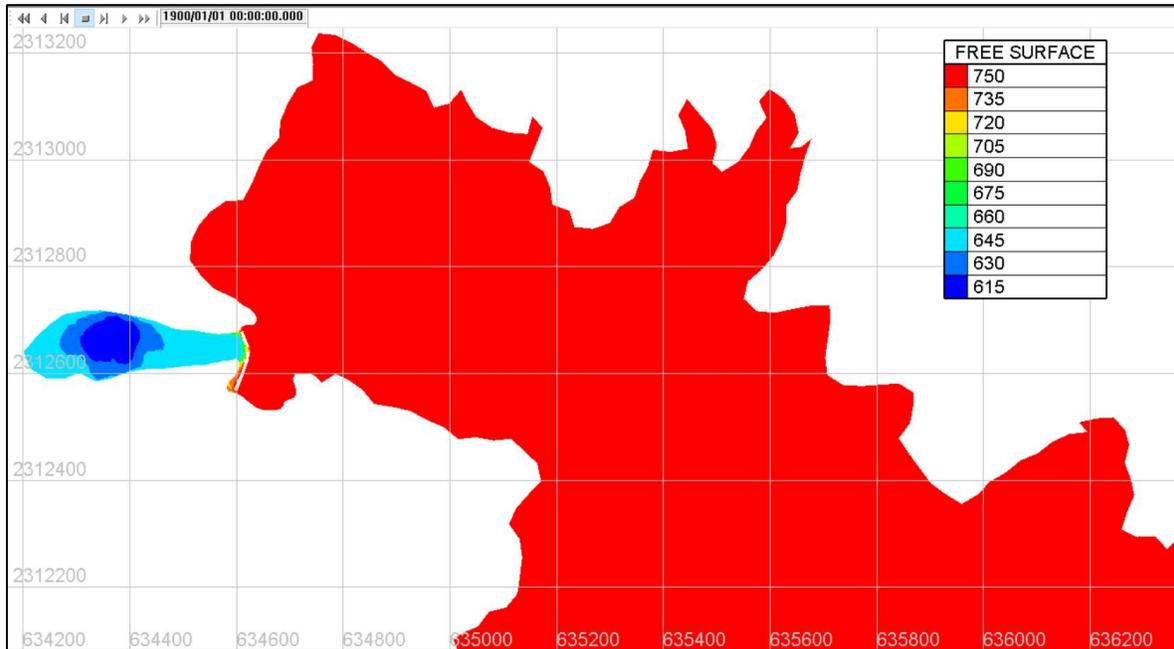


Ilustración 4-3. Niveles de la superficie libre del agua al inicio de la simulación (ilustración de arriba) con condición inicial igual al NAMO y al final de la simulación (24 horas después) cuando el agua embalsada ha sido vaciada (ilustración de abajo).

Del software BlueKenue 64 fue posible obtener una serie de tiempo para la variable de transporte de sedimentos de fondo y posteriormente generar manualmente los sedimentogramas correspondientes a cada caso y obtener su volumen total desalojado del embalse. La ilustración 5-4 muestra la primera serie de tiempo (time series) para la simulación con sección transversal de 10 m x 10 m, caudal constante (medio anual) y carga hidráulica de 756.46 msnm.

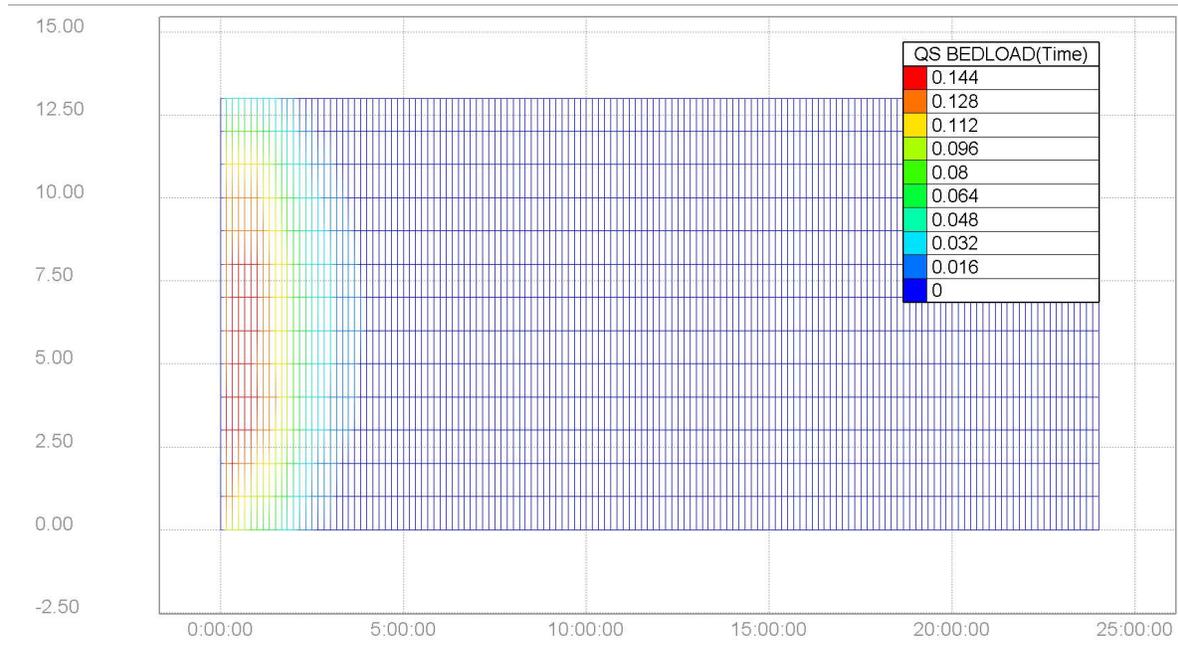


Ilustración 4-4. Serie de tiempo del transporte de sedimento de fondo en una sección transversal definida aguas abajo de la descarga de fondo.

En la ilustración 5-5 se presenta la curva de transporte de sedimento en fondo contra el tiempo. De la cual fue posible obtener el volumen de sedimento extraído para este caso. Utilizando el método de los trapecios se obtiene el área bajo la curva que corresponde al volumen de sedimento extraído en un segmento de tiempo (10 min o 600 s). La suma de los resultados por segmento de tiempo nos da como resultado el volumen total por evento que en este caso resultó de 61,221 m³. Este volumen, aunque pareciera considerable representa únicamente alrededor de 0.04 % del volumen perdido del embalse (38% de 403 Mm³) reportado en el trabajo de (Barragán, 2000).

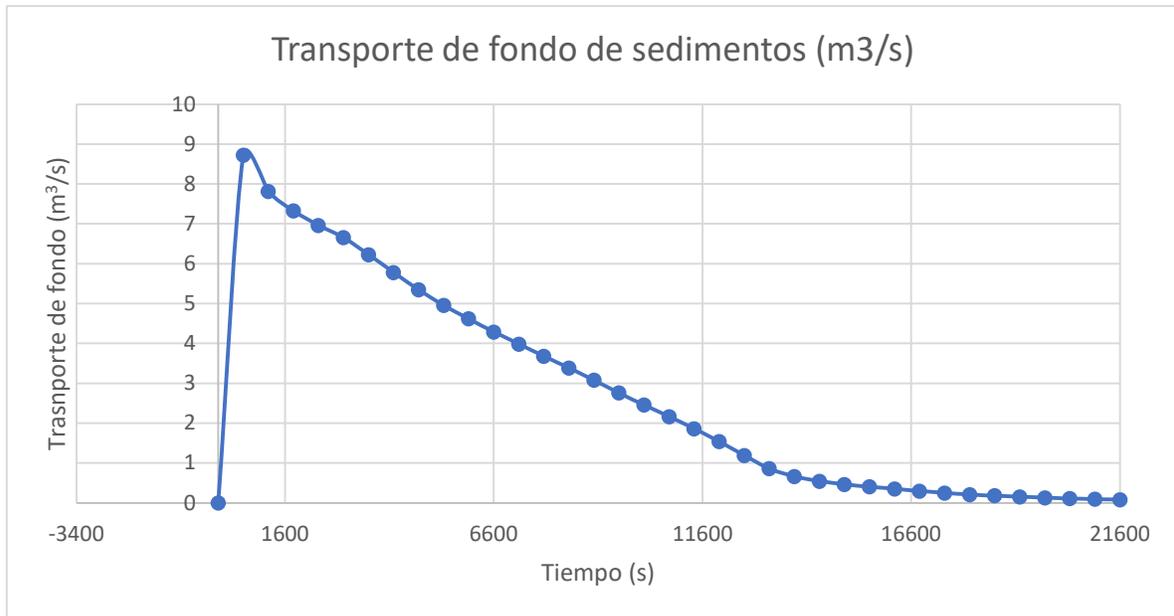


Ilustración 4-5. Sedimentograma para las primeras seis horas de la simulación inicial.

La simulación realizada se ejecutó para una duración total de 86400 s, es decir, un día, sin embargo, se aprecia en la ilustración 5-5 que la extracción del sedimento del embalse prácticamente ocurre dentro de los primeros 21,600 s es decir 4 horas. Con una tasa de transporte máximo en el primer paso de tiempo justo después de iniciada la simulación (10 min o 600 s) con una magnitud cercana a los 9 m³/s y que va descendiendo progresivamente hasta un valor menor a 0.1 m³/s a los 21,600 s o 4 horas.

La ilustración 5-6 representa el sedimentograma a la salida del desagüe variando las condiciones a una carga hidráulica de 721 msnm y sección rectangular (cuadrada de 10 m) con Q medio anual recortado a las primeras horas donde claramente se visualiza una curva con tendencia asintótica al eje de las abscisas después de alrededor de las 3.5 horas de inicio del flushing.

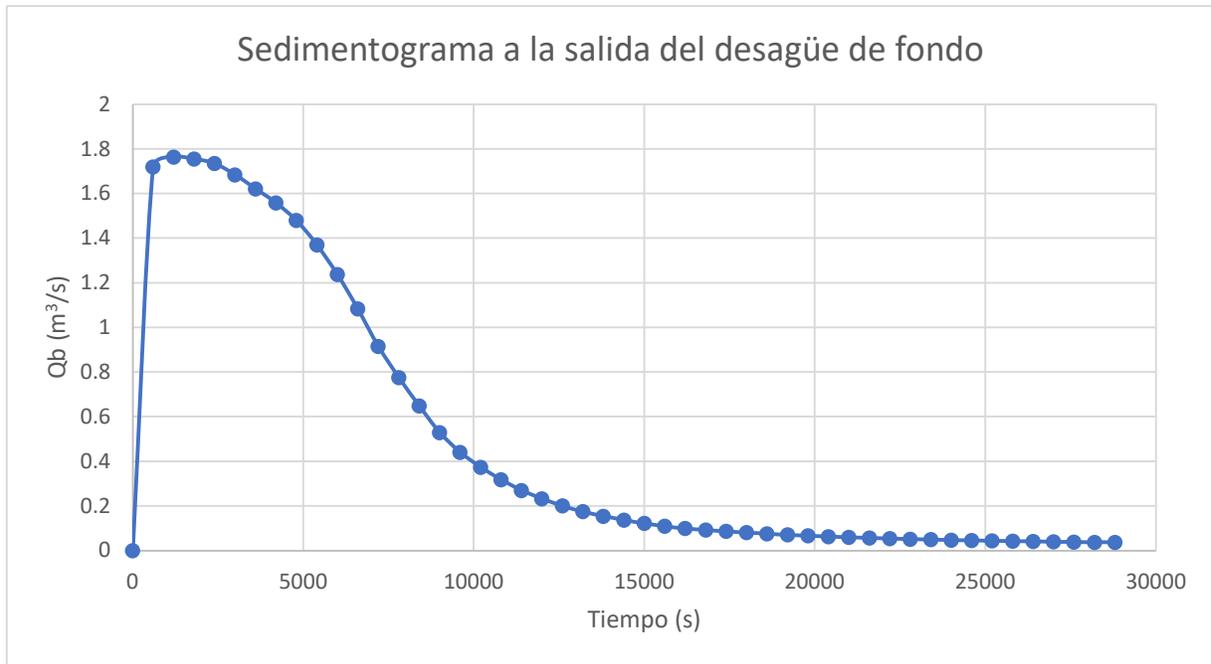


Ilustración 4-6. Sedimentograma de la simulación con sección rectangular con Q constante y H = 721 msnm.

En seguida, se encuentran las ilustraciones 5-7 y 5-8 que muestran una vista en planta del embalse y un perfil longitudinal generado para el análisis de resultados, específicamente del cambio en elevaciones del fondo de este y los niveles de la superficie libre del agua como condición inicial usados y probados en las distintas simulaciones considerando la obra de desagüe o descarga de fondo real (sección transversal circular con 3 metros de diámetro de concreto). En la ilustración 5-9 vemos el análisis de resultados de variables hidráulicas como las velocidades a la salida de la obra de descarga yendo desde los 5 m/s hasta los 8.5 m/s y con una máxima momentánea de 11.5 m/s. Este procesamiento de los resultados fue realizado con el software Tecplot 360 EX el cual permite manipular los archivos de resultados de Telemac 2D y 3D de manera más profesional.

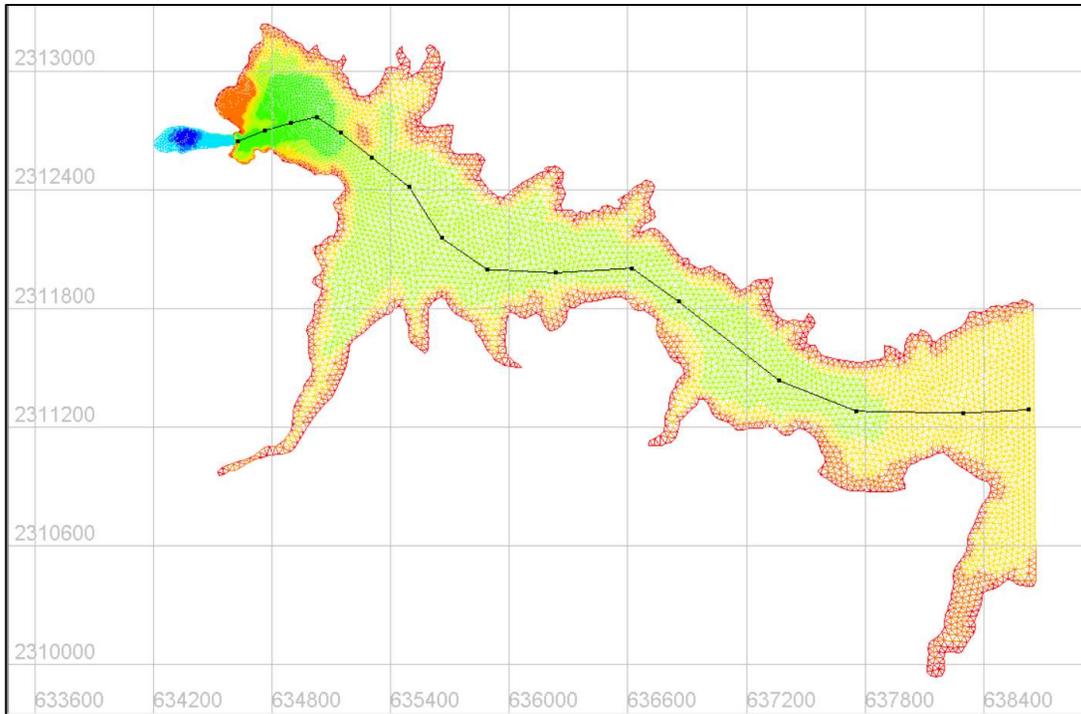


Ilustración 4-7. Vista en planta del embalse y el perfil longitudinal generado.

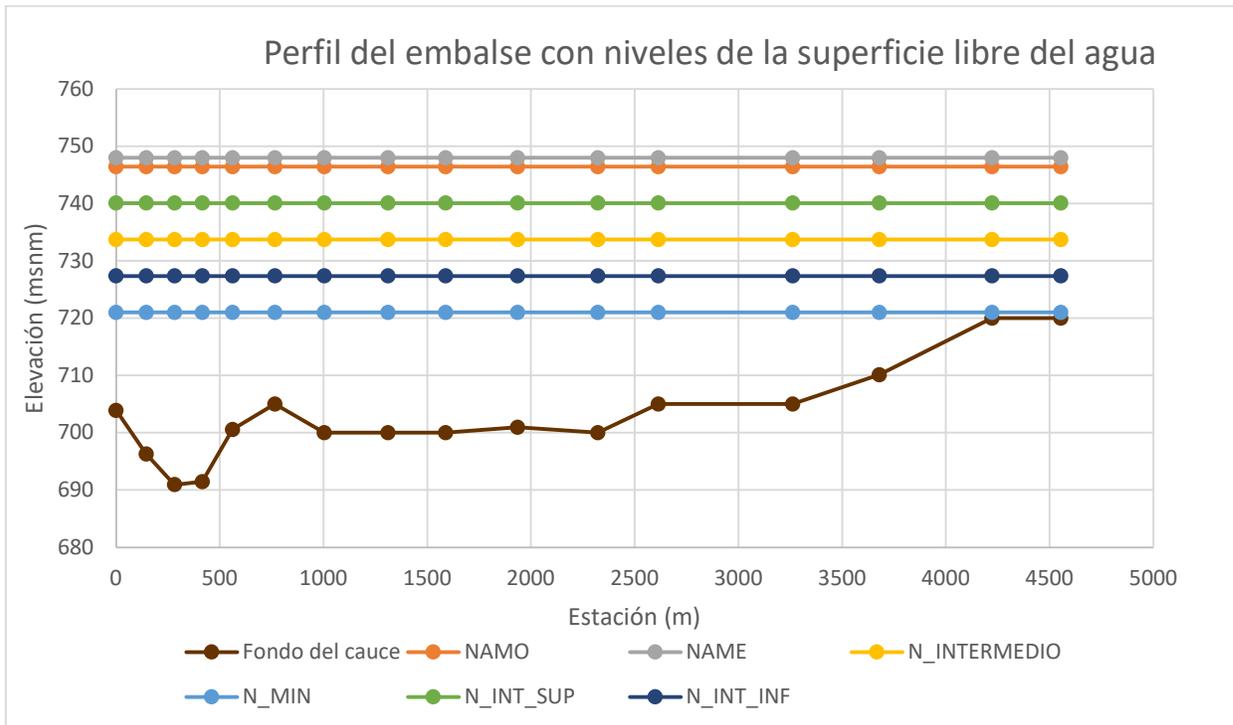


Ilustración 4-8. Perfil longitudinal del embalse con los niveles de la superficie libre de las diferentes simulaciones realizadas.

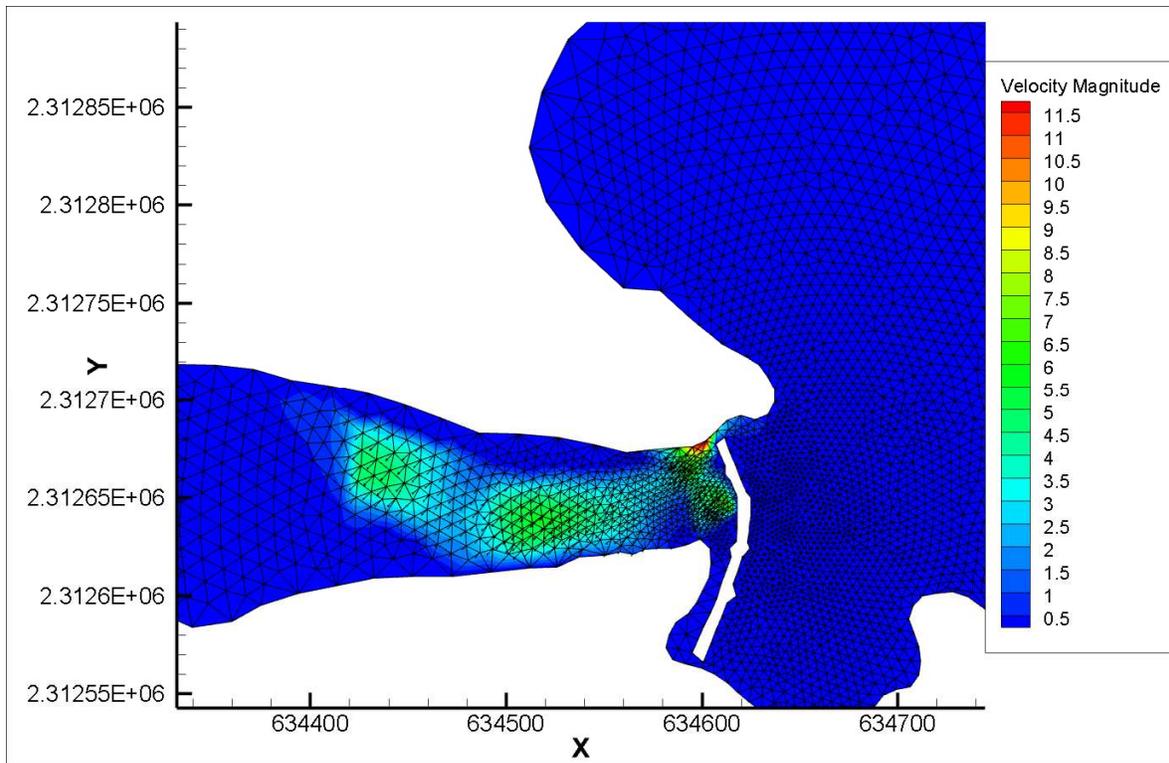


Ilustración 4-9. Análisis de resultados (velocidades) en Tecplot 360 EX: simulación alcantarilla, gasto medio (constante) y $H = 726.46$ msnm.

En la tabla 5-1 se muestran las simulaciones realizadas con las diferentes condiciones de frontera e iniciales junto con los resultados de más interés como lo son el volumen de sedimento extraído durante todo el evento, la concentración media de sedimento, etc. Es importante recalcar que esta actividad resultó extenuante y tardada debido a que no solo las simulaciones llevaron bastante tiempo (entre 20 y 42 horas cada una) y por la preparación de los archivos de entrada, ajustar y determinar los parámetros de cálculo, corregir resultados inadecuados y evitar simulaciones inestables.

Tabla 4-1. Escenarios de las diferentes simulaciones realizadas del embalse Santa Rosa (ubicado en Jalisco, México) en el modelo numérico Telemac-2D.

Caudal de entrada al embalse durante la simulación	Nivel inicial de la superficie libre del agua dentro del embalse	Volumen de sedimento extraído del embalse	Concentración media de sedimento extraído del embalse	Longitud hasta donde se produce la erosión del fondo
Q medio anual (constante) = 81.1 m³/s	721 msnm	223.16 m ³	0.1563 kg/m ³	Aprox. 212.78 m aguas arriba de la cortina
	727.365 msnm	141.58 m ³	0.1379 kg/m ³	
	733.73 msnm	359.66 m ³	0.1785 kg/m ³	Aprox. 214.94 m aguas arriba de la cortina
	740.095 msnm	669.99 m ³	0.22 kg/m ³	
	746.46 msnm	1003.82 m ³	0.2408 kg/m ³	Aprox. 211.59 m aguas arriba de la cortina
	748 msnm	1075.09 m ³	0.2426 kg/m ³	Aprox. 211.73 m aguas arriba de la cortina
Hidrograma Triangular en función del Q medio anual (Q_p = 162.22 m³/s)	721 msnm	236.37 m ³	0.1581 kg/m ³	Aprox. 133.21 m aguas arriba de la cortina
	727.365 msnm	156.29 m ³	0.1522 kg/m ³	
	733.73 msnm	361.12 m ³	0.1786 kg/m ³	Aprox. 180.44 m aguas arriba de la cortina
	740.095 msnm			
	746.46 msnm	1031.28 m ³	0.2447 kg/m ³	Aprox. 215 m aguas arriba de la cortina
	748 msnm	1096.67 m ³	0.2453 kg/m ³	Aprox. 212.5 m aguas arriba de la cortina

Finalmente, de la Tabla 5-1 se responden una de las preguntas principales de los objetivos de este trabajo de grado. Obteniendo datos cuantitativos que nos dan una aproximación a lo que puede suceder en la implementación de esta medida como parte de un programa de mantenimiento (desazolve) de este embalse en particular. En la sección de conclusiones se realiza una reflexión acerca de lo que indica las magnitudes de sedimentos desalojados con el vaciado parcial del embalse y el patrón de erosión depósito que se obtiene como resultado de las simulaciones llevadas a cabo y señaladas en la tabla 5-1.

Del análisis del gasto sólido (sedimentos) que entran al embalse en función de los dos gastos de entrada utilizados en las simulaciones (gasto constante e hidrograma triangular) se obtuvo que para el primer caso el volumen total de sedimento es de 8424.58 m³ que haciendo la relación entre volúmenes, de entrada y salida, representa únicamente el 13.02% y para el último caso el volumen total resulta de 7184.41 m³ que haciendo la relación entre volúmenes representa un 14.96% que es ligeramente mayor al caso previo. La tabla 5-2 resume estos resultados.

Tabla 4-2. Resultado de las relaciones entre los volúmenes de sedimentos desalojados del embalse con el flushing y el sedimento de entrada al embalse.

Escenario	Volumen de sedimento entrando el embalse (fórmulas básicas de la hidráulica fluvial).	Volumen de sedimento desalojado del embalse (simulación Telemac-2D)	Relación de volumen de sedimento de salida con el que entra
Caudal constante (81.1 m³/s)	8424.58 m ³	1075.09 m ³	13.02%
Hidrograma triangular	7184.41 m ³	1096.67 m ³	14.96%

Las ilustraciones 5-10, 5-11 y 5-12 muestran los resultados de la evolución del fondo del embalse y la hidráulica para el caso del hidrograma y elevación inicial igual al NAME. En estos podemos ver que la actividad del fondo prácticamente se limita a un área muy pequeña encontrada justo en la vecindad de la toma y algunos metros aguas debajo de esta donde se aprecia un depósito del sedimento expulsado por esta obra. Las variables hidráulicas como las velocidades (ilustración 5-13) muestran valores desde 8 m/s hasta 16 m/s justo aguas debajo de la cortina mientras que las velocidades dentro del embalse son muy pequeñas en comparación (menores de 1 m/s) con estas últimas por lo que parecen prácticamente estáticas en la mayoría de los pasos de tiempo. La ilustración 5-13 también presenta los tirantes dentro del embalse y aguas abajo de este donde se

aprecian zonas con hasta 60 metros y valores que llegan a rondar los 45 metros en la sección aguas debajo de la cortina donde se presentan elevaciones menores (en esta zona descarga el vertedor).

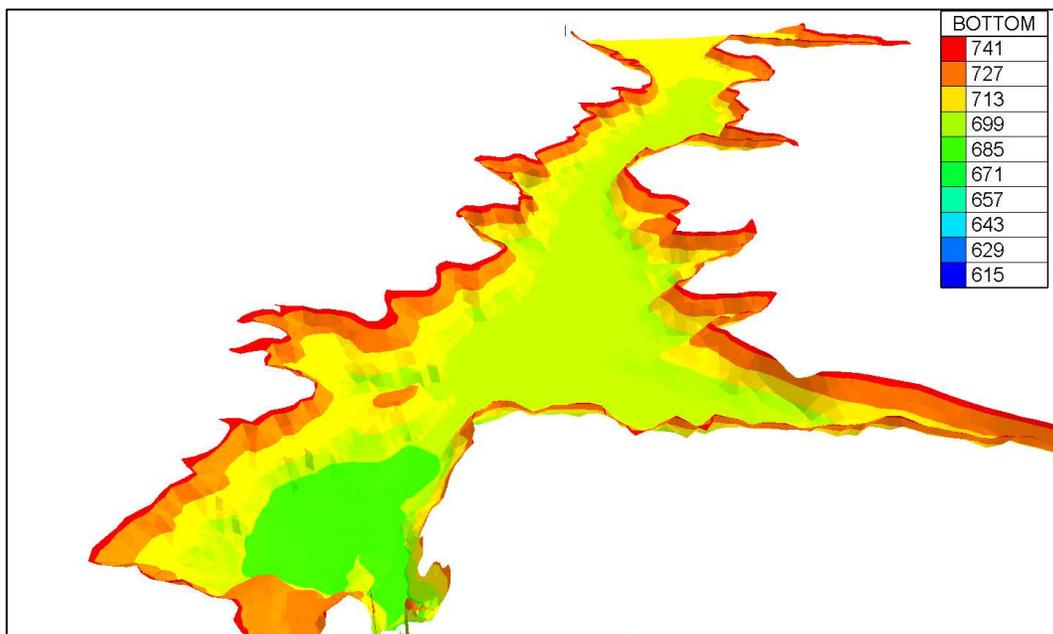


Ilustración 4-10. Vista en tres dimensiones de la batimetría del embalse Santa Rosa.

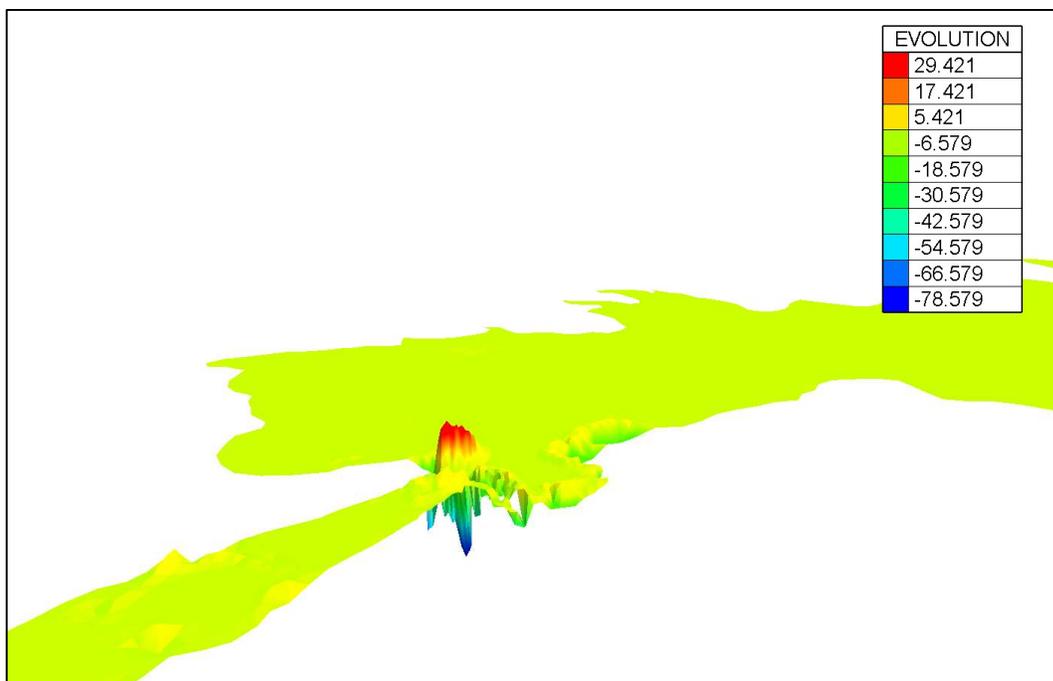


Ilustración 4-11. Vista en tres dimensiones de la evolución del fondo del embalse Santa Rosa de la simulación con caudal no permanente y elevación inicial igual al NAMO.

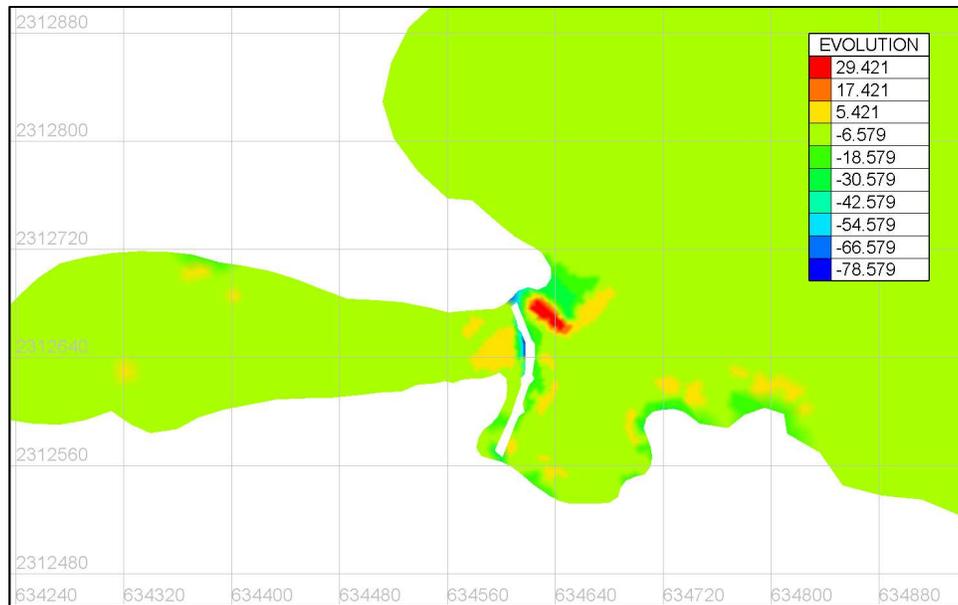


Ilustración 4-12. Vista en planta de la evolución del fondo del embalse Santa Rosa para la simulación con caudal no permanente y elevación inicial igual al NAMO.

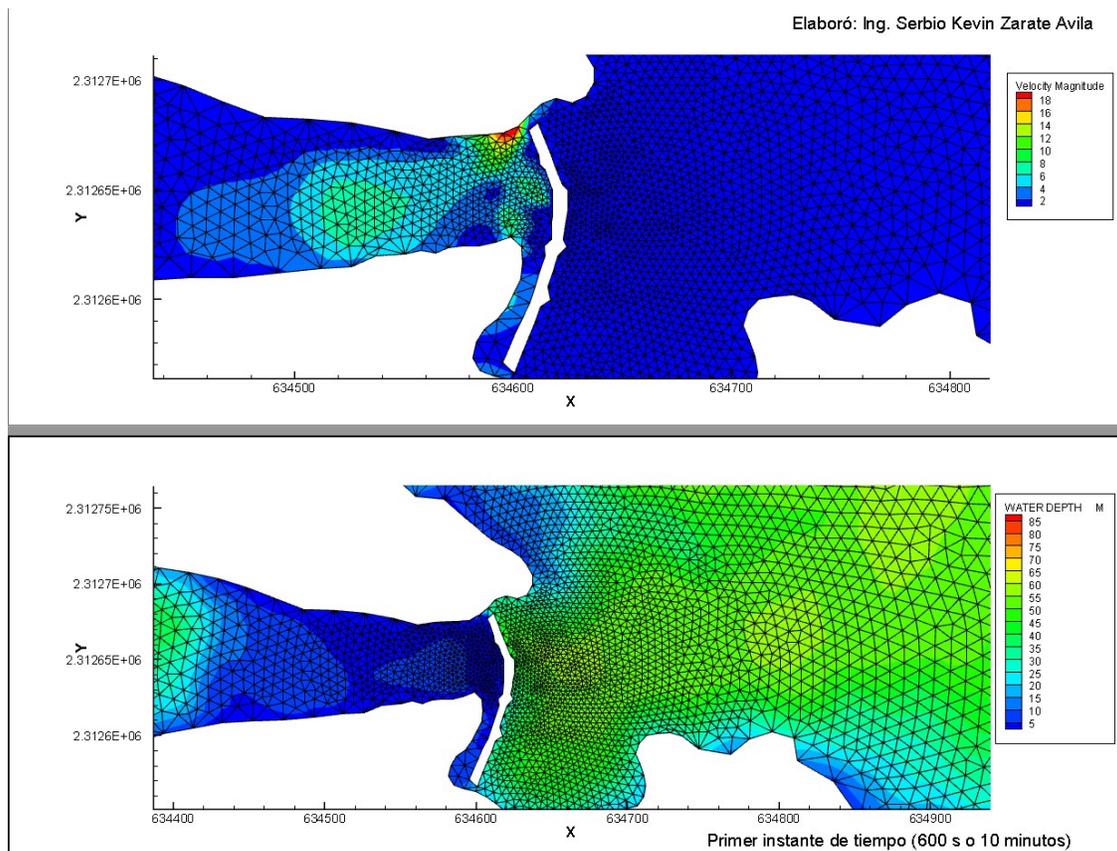


Ilustración 4-13. Representación de las magnitudes de velocidades y tirantes en el primer instante de la simulación (600 s o 10 min).

En seguida en las ilustraciones 5-14 y 5-15 muestran las dos condiciones fronteras, ambas de entrada, que fueron ingresadas al modelo y estudiadas. La ilustración 5-14 es la condición de caudal permanente o constante mientras que la ilustración 5-15 es la condición de caudal no permanente o variable en el tiempo. Utilizando ambos gastos se realizó un análisis del sedimento de entrada al embalse utilizando las fórmulas empíricas de la hidráulica fluvial para el transporte de fondo (fórmula del esfuerzo cortante tangencial, número de Shields para el principio de movimiento de partículas, ecuación de transporte adimensional de Meyer-Peter & Müller y número de Einstein para el transporte de fondo (dimensional)). En el primer caso, caudal permanente, el transporte resulto de $0.19 \text{ m}^3/\text{s}$ mientras que, para el segundo caso, caudal no permanente, fue necesario discretizar el hidrograma en un histograma para aplicar las fórmulas por intervalos, la ilustración 5-16 presenta este gráfico generado, resultando un valor promedio de $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$ de transporte de fondo que es menor que el caso anterior.

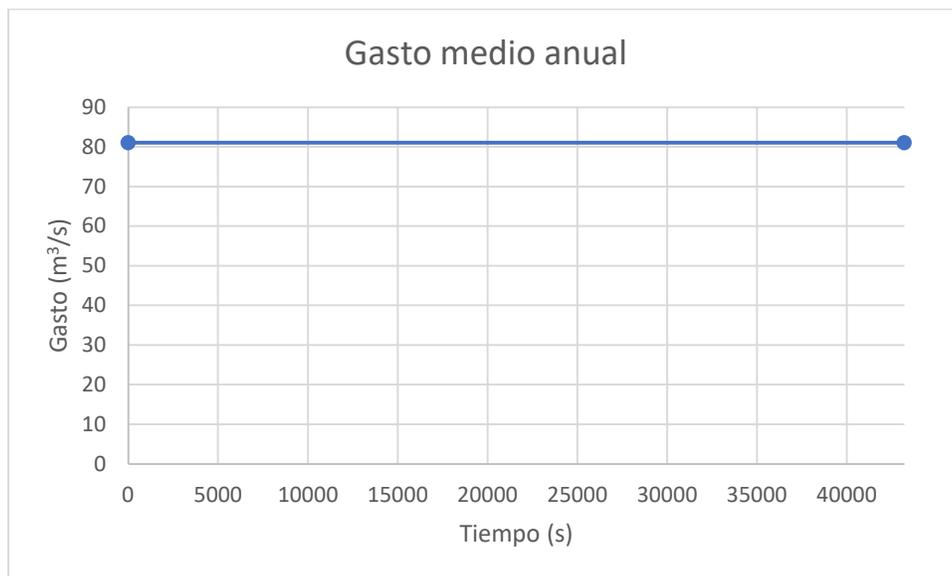


Ilustración 4-14. Gasto medio anual igual a $81.1 \text{ m}^3/\text{s}$ usado para las simulaciones en el modelo numérico Telemac-2D.

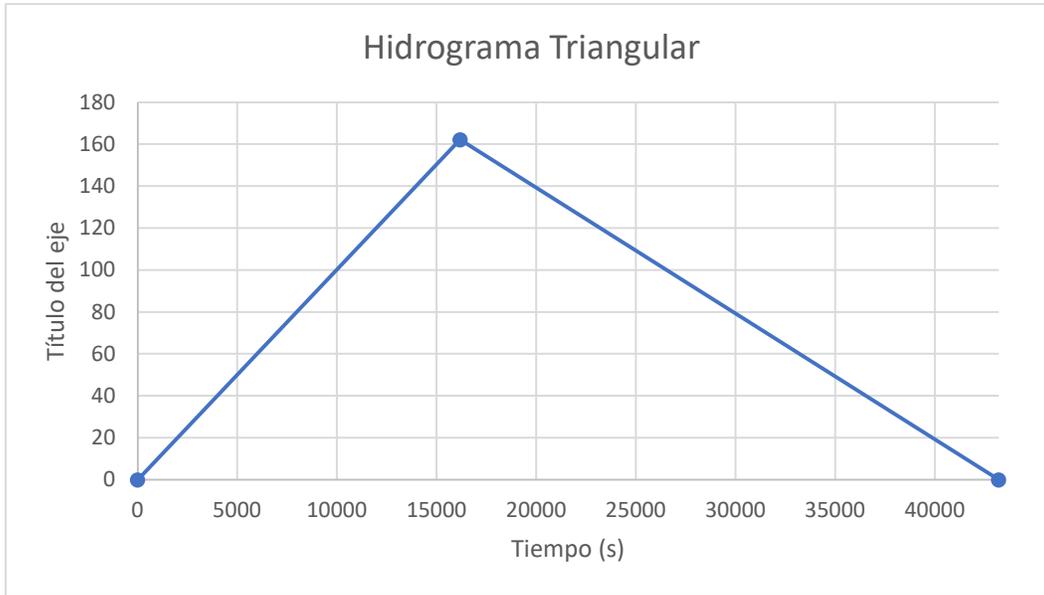


Ilustración 4-15. Hidrograma triangular generado en función del gasto medio anual usado para las simulaciones en régimen no permanente con el modelo numérico Telemac-2D.

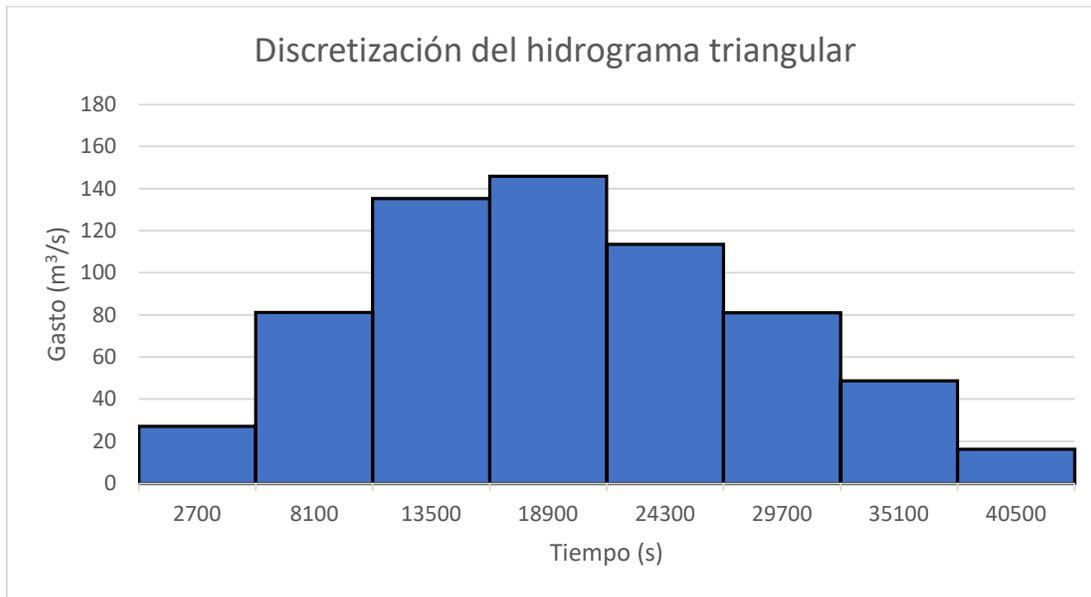


Ilustración 4-16. Discretización del hidrograma triangular para el análisis del sedimento entrante al embalse (empleando formulas básicas de hidráulica fluvial) asociado al régimen no permanente.

Con los resultados de las simulaciones realizadas se realizaron algunas gráficas de interés como los son perfiles y secciones transversales en las áreas de mayor relevancia. La ilustración 5-17 presenta un perfil del cambio en el fondo en los primeros 17 metros aproximadamente cercanos a la obra de desagüe donde se verifica que el cambio del fondo (erosión y deposito) ocurre en los primeros minutos

y después prácticamente el cambio es despreciable. La ilustración 5-18 presenta una sección transversal generada cercana a la cortina donde se aprecian las elevaciones del fondo y su evolución a través del tiempo y de igual manera es claro que los cambios también se producen los primeros minutos y después los cambios no llegan a ser apreciables más que en una zona muy pequeña, de unos 10 metros, en la parte izquierda. La ilustración 5-19 es una vista en planta de una zona del embalse cercana a la cortina donde se ilustran las líneas de las secciones transversales y el perfil de pocos metros que se utilizaron para extraer los datos y generar las figuras anteriores.

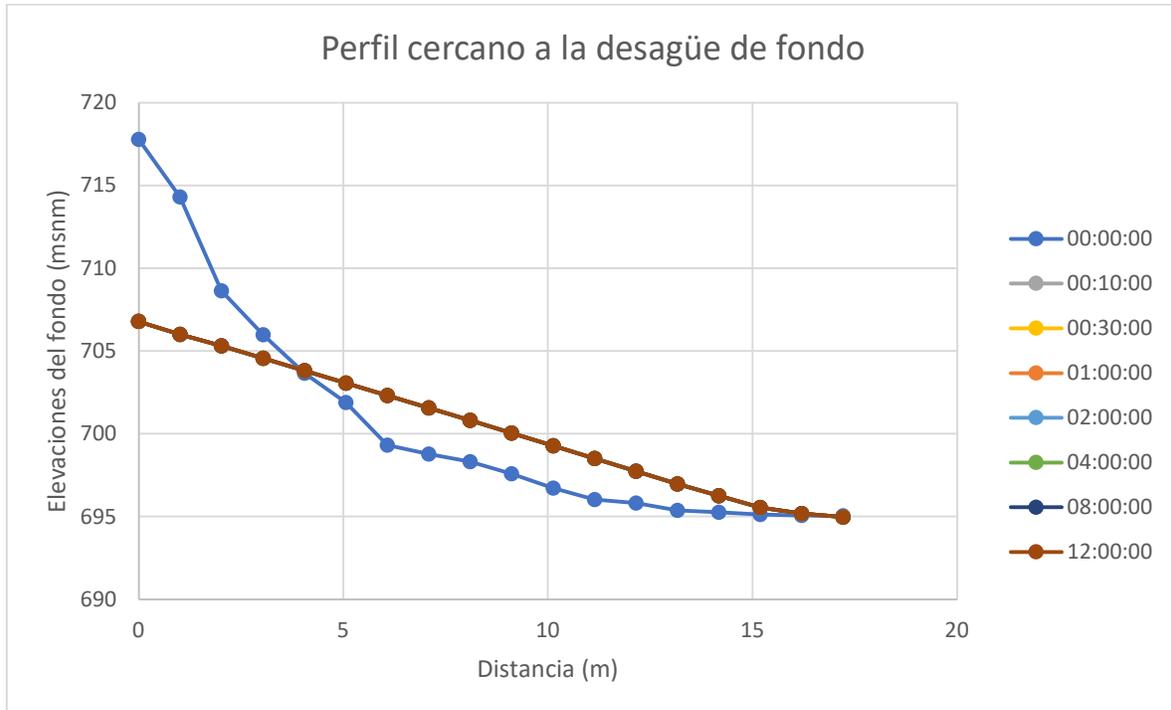


Ilustración 4-17. Perfil recortado del embalse donde ocurren los principales cambios en elevación del fondo para la simulación con caudal medio anual y elevación inicial igual al NAMO.

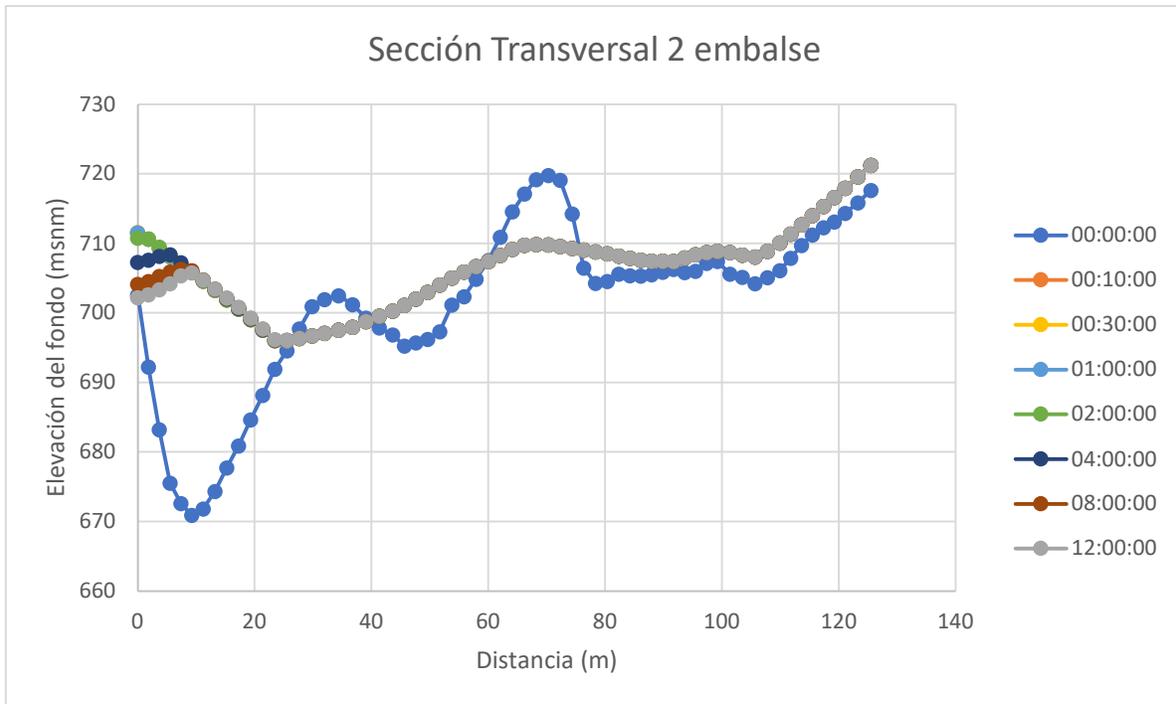


Ilustración 4-18. Sección transversal justo aguas arriba de la cortina y cambios en elevación del fondo a través del tiempo para la simulación con caudal medio anual y elevación inicial igual al NAMO.

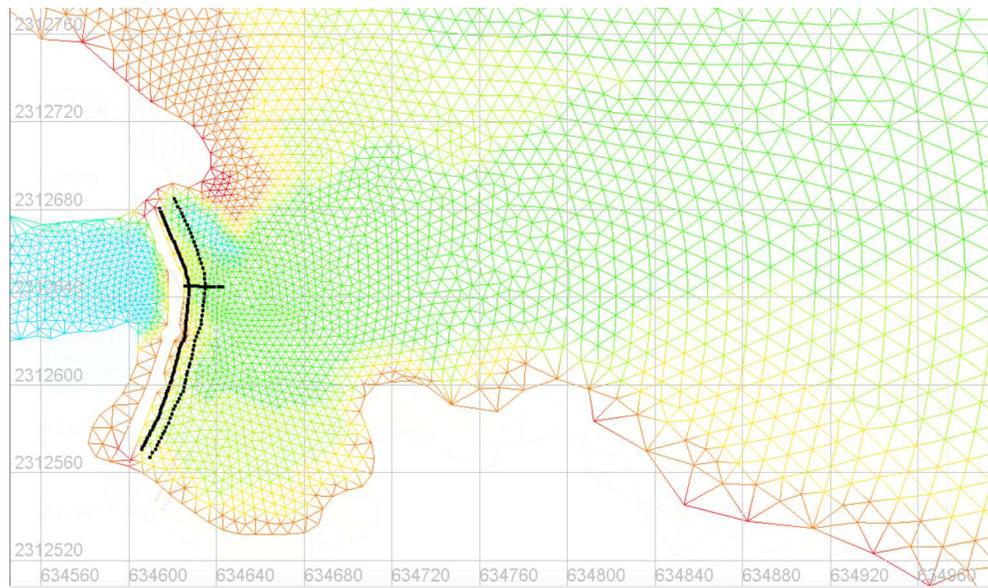


Ilustración 4-19. Secciones transversales y perfil recortado aguas arriba de la cortina donde es más apreciable la evolución del fondo usados para generar las gráficas anteriores.

Finalmente, se presentan algunas ilustraciones de la curva masa de sedimentos para las simulaciones realizadas, gráficas de volumen acumulado de sedimentos conforme transcurre el tiempo de la simulación, y también se realizó un cálculo simple para obtener la eficiencia del flushing como la relación entre volumen de sedimentos evacuados entre volumen de agua vaciada. La ilustración 5-20 representa la curva masa de sedimentos evacuados para la simulación con caudal medio anual y elevación inicial de 740.1 msnm. Los resultados de la eficiencia de flushing se resumen en la Tabla 5-3. Aquí se observa que según este criterio la simulación con la combinación de condiciones (iniciales y frontera) del hidrograma triangular como entrada y nivel del NAMO como condición inicial resulta la más favorable mientras que la simulación con el caudal medio anual de entrada y un nivel inicial de 727.37 msnm resulta la menos favorable. Las gráficas de los resultados completos de las doce simulaciones diferentes se encuentran en el Anexo 2 resultados complementarios de las diferentes simulaciones.

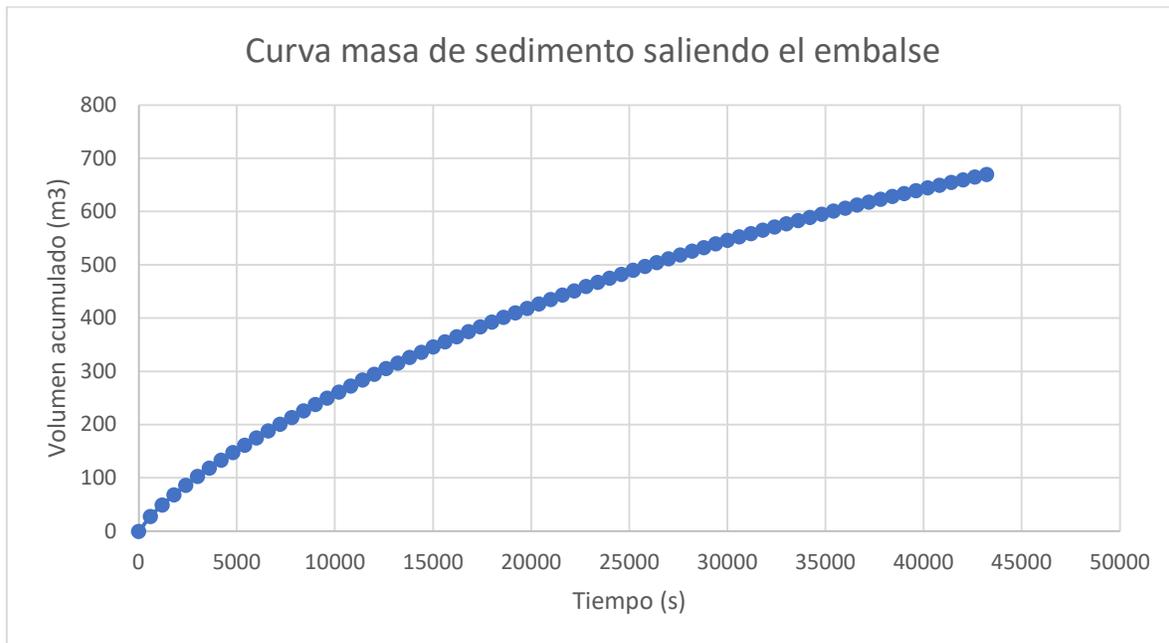


Ilustración 4-20. Curva masa de sedimentos evacuados para la simulación con caudal medio y $H = 740.1$ msnm.

Tabla 4-3. Resultados de eficiencia de flushing para los diferentes escenarios de simulación.

Caudal de entrada al embalse durante la simulación	Nivel inicial de la superficie del agua dentro del embalse	Eficiencia del flushing $Fe = Vse / Vw$
Caudal medio anual (constante) Qmed anual = 81.1 m³/s	721 msnm	5.90E-05
	727.365 msnm	5.21E-05
	733.73 msnm	6.74E-05
	740.095 msnm	8.30E-05
	746.46 msnm	9.09E-05
	748 msnm	9.15E-05
Hidrograma Triangular (ver Ilustración 5- 15)	721 msnm	5.97E-05
	727.365 msnm	5.74E-05
	733.73 msnm	6.74E-05
	740.095 msnm	8.49E-05
	746.46 msnm	9.23E-05
	748 msnm	9.26E-05

5. Conclusiones

El modelo numérico Telemac 2d muestra gran potencial de resolver problemas de flujo a superficie libre con geometría complejas como es este caso. Dado a la complejidad del problema se recurren a este tipo de modelos donde se puede representar de una mejor manera el fenómeno físico para validar la viabilidad de su implementación como medida de manejo de sedimentos en embalses.

Varios autores mencionan en la literatura técnica, que principalmente el sedimento que sale al abrir la descarga del fondo es el depositado en la vecindad de la obra formando el conocido cono de flushing. El cual en algunos casos que se extiende unos pocos metros arriba y la erosión que se produce se llega extender alrededor de 200 metros de esta debido a que es donde ocurren las velocidades más grandes y se generan esfuerzos cortantes más importantes.

A pesar de que los resultados más interesantes del transporte y evolución de fondo se muestran en el área más cercano a la cortina se decidió dejar el dominio completo del modelo para no afectar los resultados del comportamiento hidráulico debido al remanso que se forma por la cortina al funcionar como una obstrucción en el cauce del río.

En las primeras simulaciones empleando la obra de desagüe o descarga real fue evidente que el conducto de esta obra tenía un área mucho menor (aprox. 7.07 m²) a la propuesta inicialmente (abertura de 10 metros de ancho). Las simulaciones duraron entre 18 - 24 horas en total para visualizar el vaciado del embalse hasta que el flujo fuera como en un cauce natural. Lo que se relacionaba obviamente con la capacidad del desalojo de sedimentos en el embalse. Sin embargo, se limitó el

tiempo de simulación a 12 horas debido a las limitaciones del equipo de cómputo empleado y que los resultados de mayor interés en la cuestión del transporte de sedimento en fondo ocurren en las primeras horas, principalmente como se aprecia en las gráficas de resultados con valores más altos y descendiendo gradualmente con una tendencia asintótica al eje de las abscisas.

Contrario a otros casos documentados en la literatura técnica, es evidente que después de analizar los resultados desde las primeras simulaciones se encontró las desventajas en el vaciado completo del embalse, en la mayoría de los casos, el sedimento desalojado representa un porcentaje muy pequeño (menor al 1%) respecto al volumen de sedimentos depositados en la presa durante las varias décadas que ha estado en funcionamiento.

Se observó que conforme varía la carga hidráulica en el embalse, el flushing o lavado puede traer consigo inconvenientes al ocurrir una socavación de decenas de metros justo aguas arriba de la cortina pudiendo llegar hasta la cimentación de esta y afectando su estabilidad. Por ello, resulta interesante el averiguar, continuando con simulaciones (esta vez calibradas con datos de campo), si en este caso práctico de análisis alguna combinación de condiciones iniciales y de frontera reales junto con algún tipo de estructura (por ejemplo, espigones) puede generar una erosión retrogresiva que llegaría hasta lugares más alejados del embalse para no solamente evacuar grandes cantidades de volúmenes de sedimentos en ciertas zonas cercanas a la toma.

Finalmente, después de haber probado varios niveles iniciales en el embalse y considerando los resultados de las diferentes simulaciones, se concluye que el flushing en este embalse no resulta efectivo por sí solo para la condición de caudal permanente y no permanente debido a que los volúmenes desalojados de sedimentos son bastante menores a los que entran según el análisis realizado con las fórmulas básicas (empíricas) de la hidráulica fluvial. Entre 13% – 15% en los casos con los niveles más favorables, por lo que es evidente que para esta técnica funcione en la presa estudiada debe de llegarse a un equilibrio entre el sedimento que entra y el que sale. Sin embargo, para ser viable se requeriría de la transversal del conducto de la obra de descarga de fondo sea de mayores dimensiones y estudiar de qué manera, inducir el flushing para que la erosión y transporte de sedimento ocurra en una mayor área del embalse (esto último queda fuera de los alcances de este trabajo). Algunos artículos técnicos publicados sobre este tema donde se validan sus resultados mediante modelos físicos utilizan estructuras tipo espigones para cambiar la forma de la erosión principal con el propósito de extender el alcance de esta en el embalse por efectos del vaciado.

Bibliografía

- Annandale, G. W., Morris, G. L., & Karkl, P. (2016). *Extending the Life of Reservoirs. Sustainable Sediment Management for Dams and Run-of-River Hydropower*. Washington D.C.: International Bank for Reconstruction and Development.
- Arreguín, F. (2009). *Bordos en México*. México, D.F.: Colegio de Ingenieros Civiles de México.
- Arreguín, F., Marengo, H., & Murillo, R. (2013). *Inventario Nacional de Presas*. México DF: Tecnología y Ciencias del agua.
- Atkinson, E. (1996). *The feasibility of Flushing Sediment from Reservoir*. Wallingford, England: HR Wallingford.
- Barragán, M. d. (2000). *Remoción de sedimentos en embalses con la ayuda de la modelación física*. Morelos: UNAM.
- Bribiesca, M. A. (2017). *Análisis de la factibilidad de empleo del método de desazolve "flushing" en una presa mexicana con problemas de sedimentación en su embalse, mediante el uso de un modelo bidimensional*. Ciudad de México: UNAM.
- Conagua. (2023, Febrero 27). *Sistema de Seguridad de Presas*. Retrieved from <https://presas.conagua.gob.mx/inventario/tgeneralidades.aspx?DSP,1825>
- Gracia, J. (1996). *Sedimentación en embalses*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería de UNAM.
- Kawashima, S., Johndrow, T. B., Annandale, G. W., & Shah, F. (2003). *Reservoir Conservation: economic and engineering evaluation of alternative strategies*. Washington, D.C.: The International Bank for Reconstruction and Development.
- Marengo, H. (2001). *Aplicación en modelos físicos de la remoción hidráulica de sedimentos*. Ciudad de México: Ingeniería hidráulica en México.
- Morris, G. L., Annandale, G., & Hotchkiss, R. (2008). Reservoir Sedimentation. In ASCE, *Sedimentatio Engineering. Processes, Measurements, Modeling and Practice* (pp. 602-635). Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Morris, G. L., Annandale, G., & Hotchkiss, R. (2008). *Sedimentation Engineering*. Virginia: ASCE.
- Ramírez, J. M. (2009). *Producción de sedimentos en cuencas: revisión de criterios y aplicabilidad a la cuenca del río Apulco*. Jiutepec: UNAM.

Saint-Venant, A. B. (1871). *Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et a l'introduction de marées dans leurs lits*. Francia: Comptes Rendus des Séances de Académie des Sciences.

TELEMAC-MASCARET. (2021). *TELEMAC2D User Manual v8p3*.

TELEMAC-MASCARET. (2022, Octubre 27). *open TELEMAC-MASCARET*. Retrieved from <http://www.opentelemac.org/index.php/modules-list/17-telemac-2d-presentation>

Vergara, M. (1993). *TECNICAS DE MODELACION EN HIDRAULICA*. Distrito Federal: Alfaomega.

Zetina, G. (2013). *Criterios de diseño de desarenadores al filo de la corriente*. Jiutepec: UNAM.

Anexo 1. Fotografías y plano de la presa Santa Rosa.



Ilustración A1-1. Vista aguas arriba de la cortina de la presa Santa Rosa.

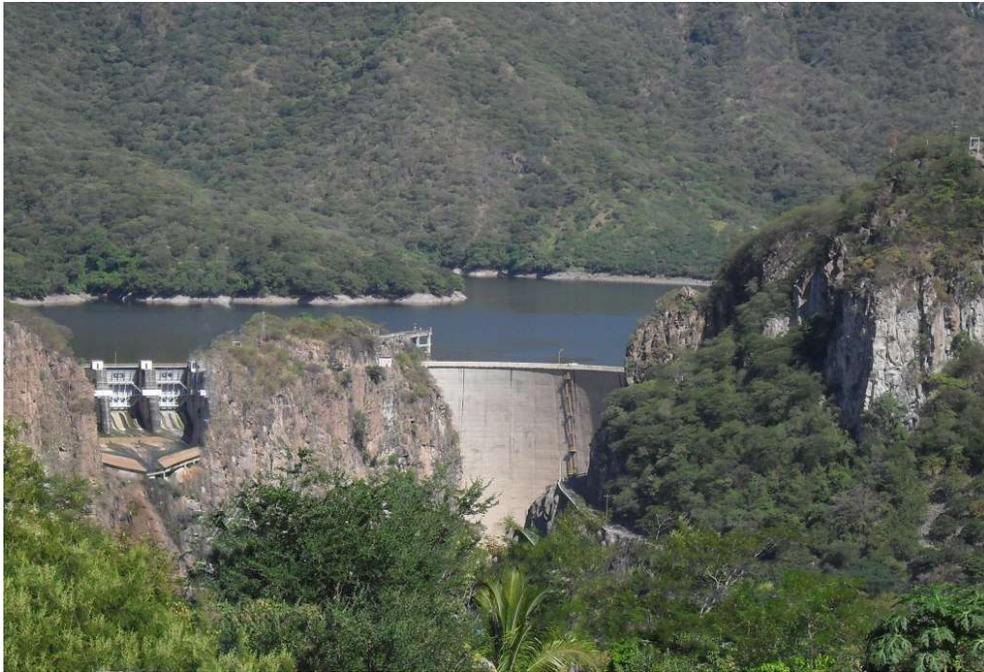


Ilustración A1-2. Vista aguas abajo de la cortina y vertedor de excedencias de la presa Santa Rosa.

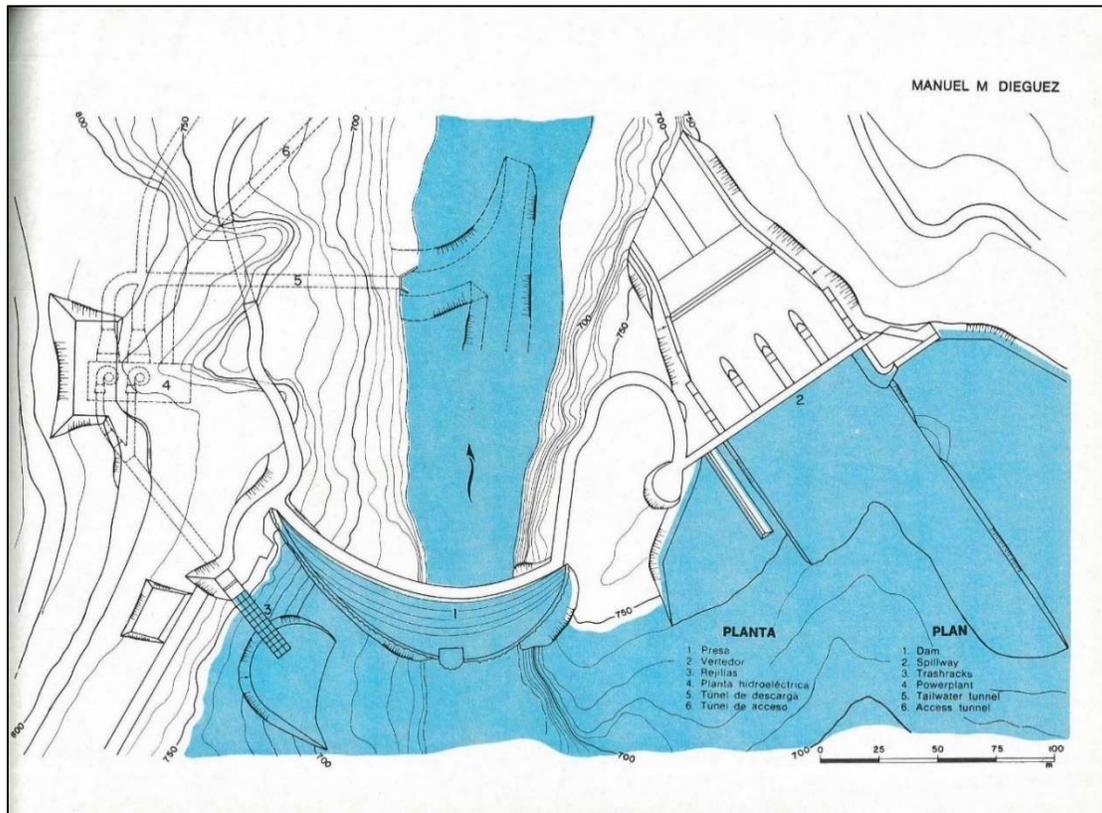


Ilustración A1-3. Plano de planta de la presa y vertedor de excedencias de la presa Santa Rosa (CONAGUA, 2023).

Anexo 2. Resultados adicionales.

En esta sección se adjuntan los resultados faltantes de las diferentes simulaciones realizadas. Primeramente, se muestran los sedimentogramas correspondientes a las 12 simulaciones realizadas con una combinación diferente de condiciones. En seguida se muestran las curvas masas de sedimento acumulado en el tiempo. Por último, vemos algunas secciones transversales y perfiles de la configuración del embalse.

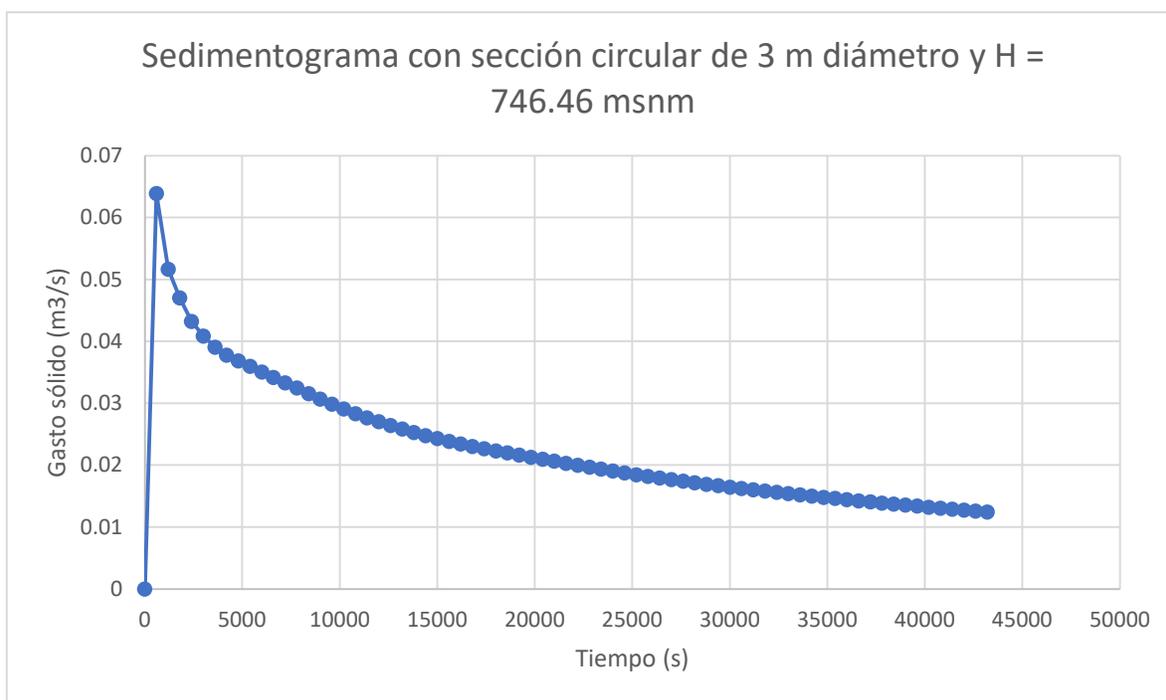


Ilustración A2-1. Sedimentograma de salida del embalse para la simulación con Q medio anual y $H = 746.46$ msnm.

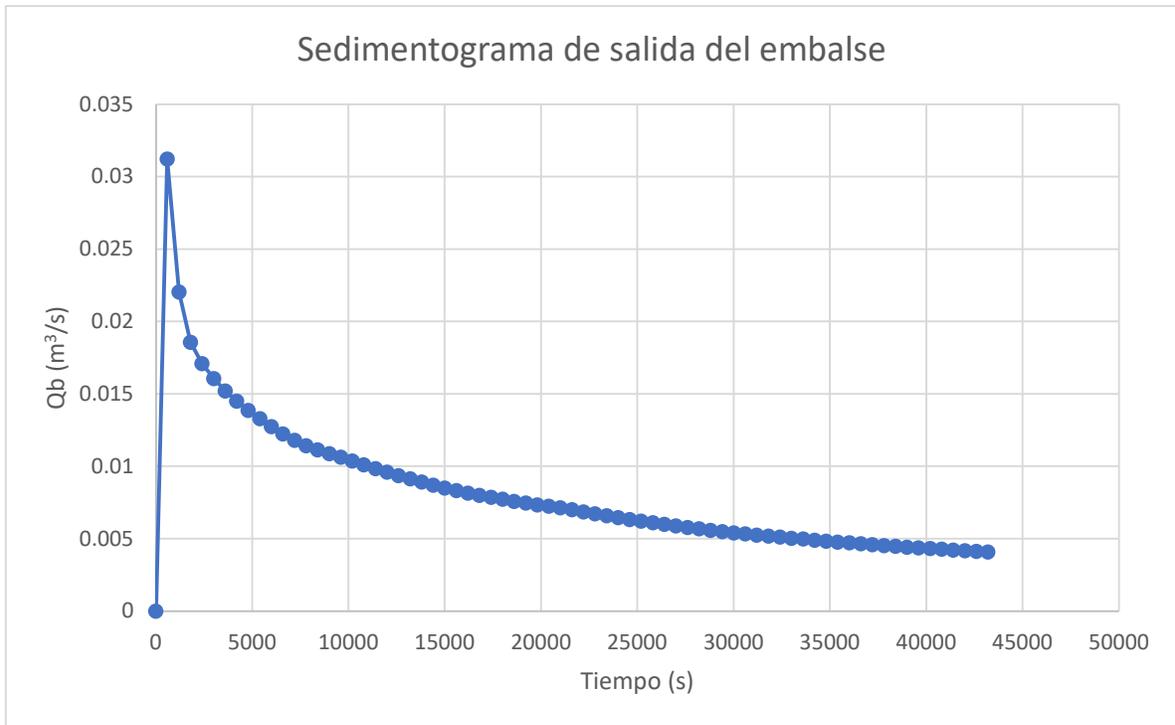


Ilustración A2-2. Sedimentograma de salida del embalse para la simulación con Q medio anual y $H = 733.73$ msnm.

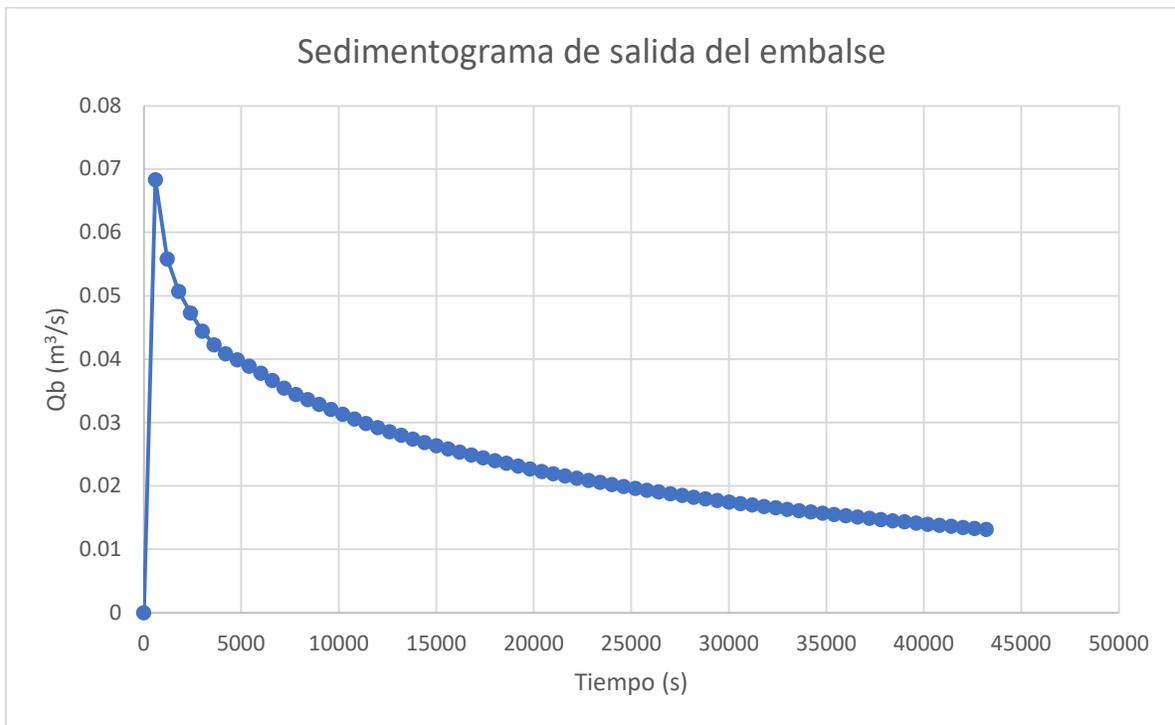


Ilustración A2-3. Sedimentograma de salida del embalse para la simulación con Q medio anual y $H = 748$ msnm.

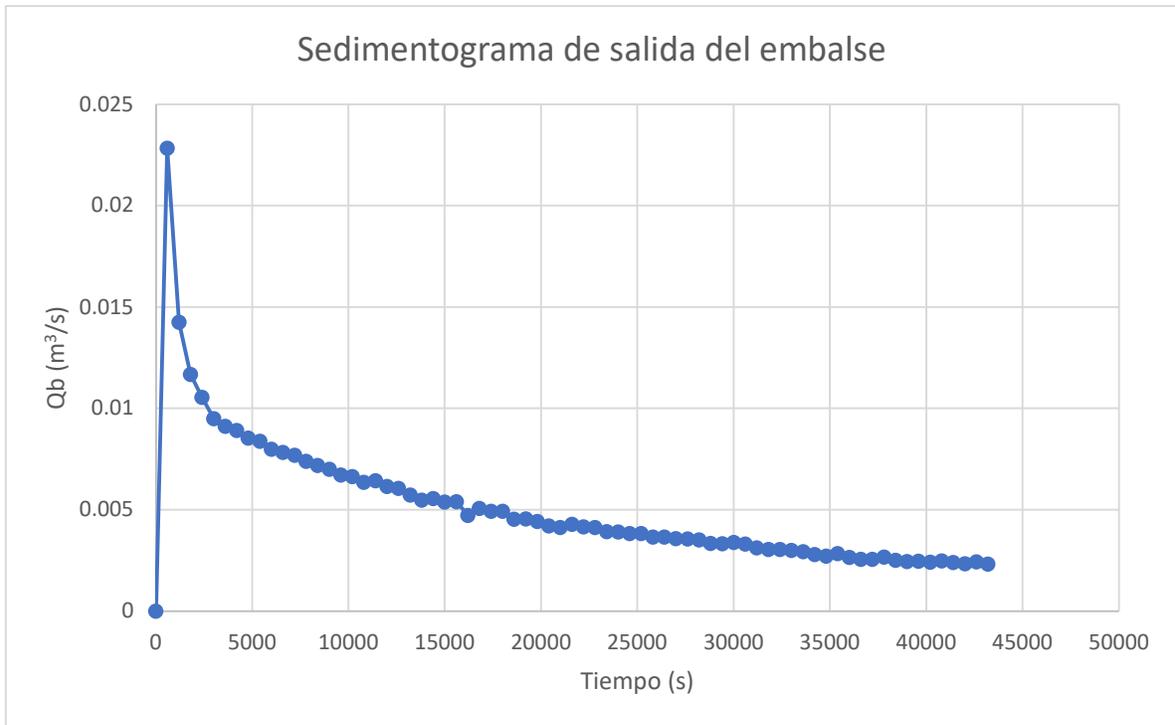


Ilustración A2-4. Sedimentograma de salida del embalse para la simulación con Q medio anual y $H = 721$ msnm.

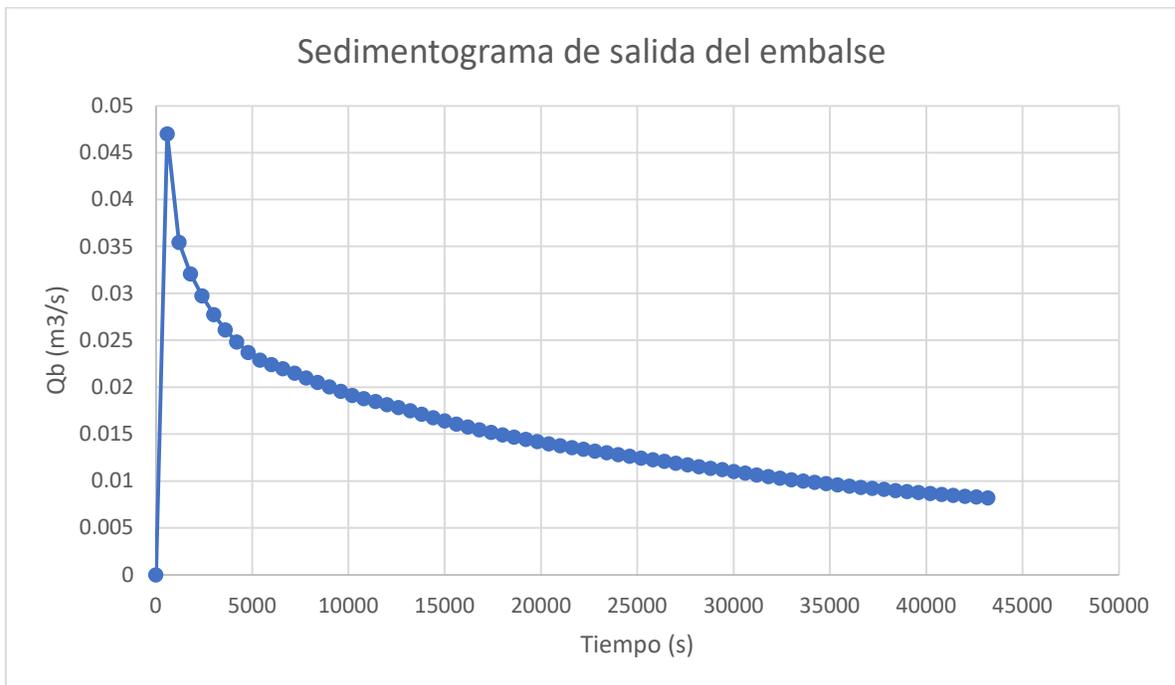


Ilustración A2-5. Sedimentograma de salida del embalse para la simulación con Q medio anual y $H = 740.095$ msnm.

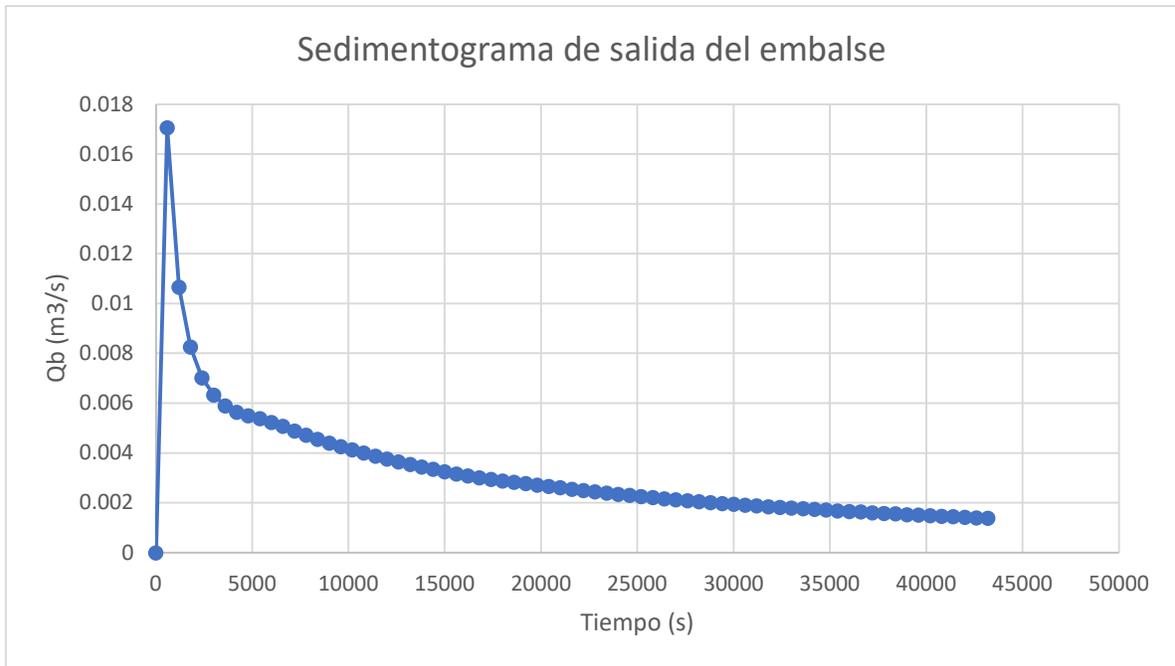


Ilustración A2-6. Sedimentograma de salida del embalse para la simulación con Q medio anual y $H = 727.365$ msnm.

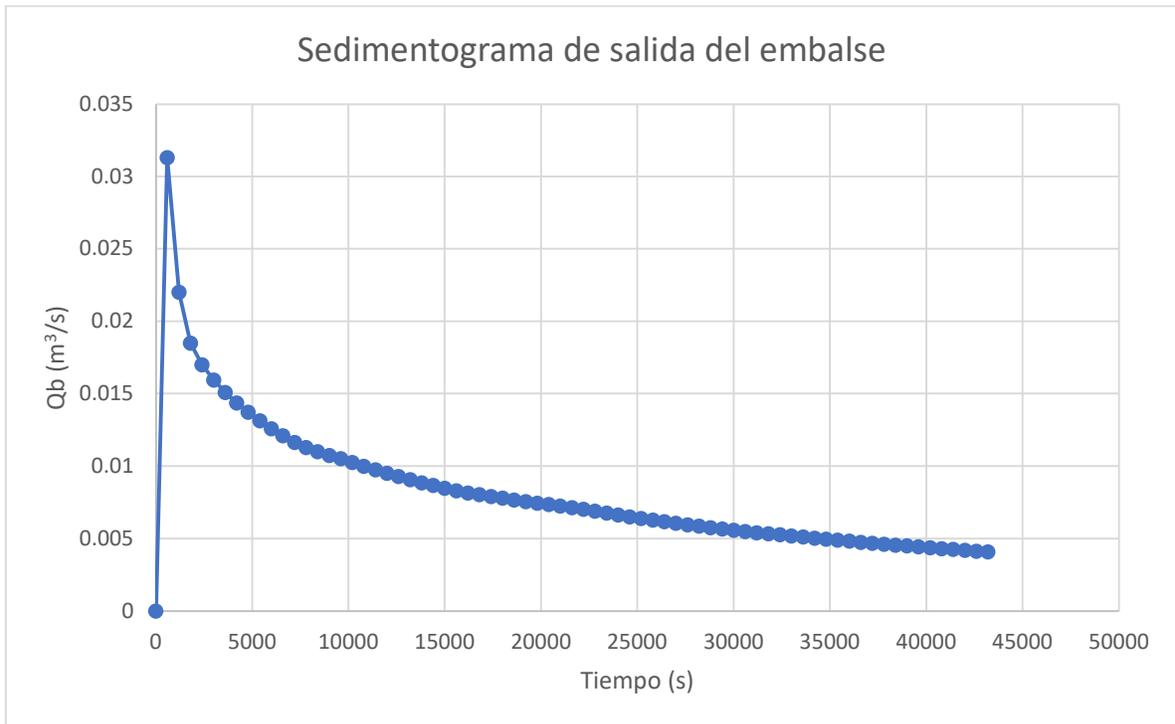


Ilustración A2-7. Sedimentograma de salida del embalse para la simulación con hidrograma triangular y $H = 733.73$ msnm.

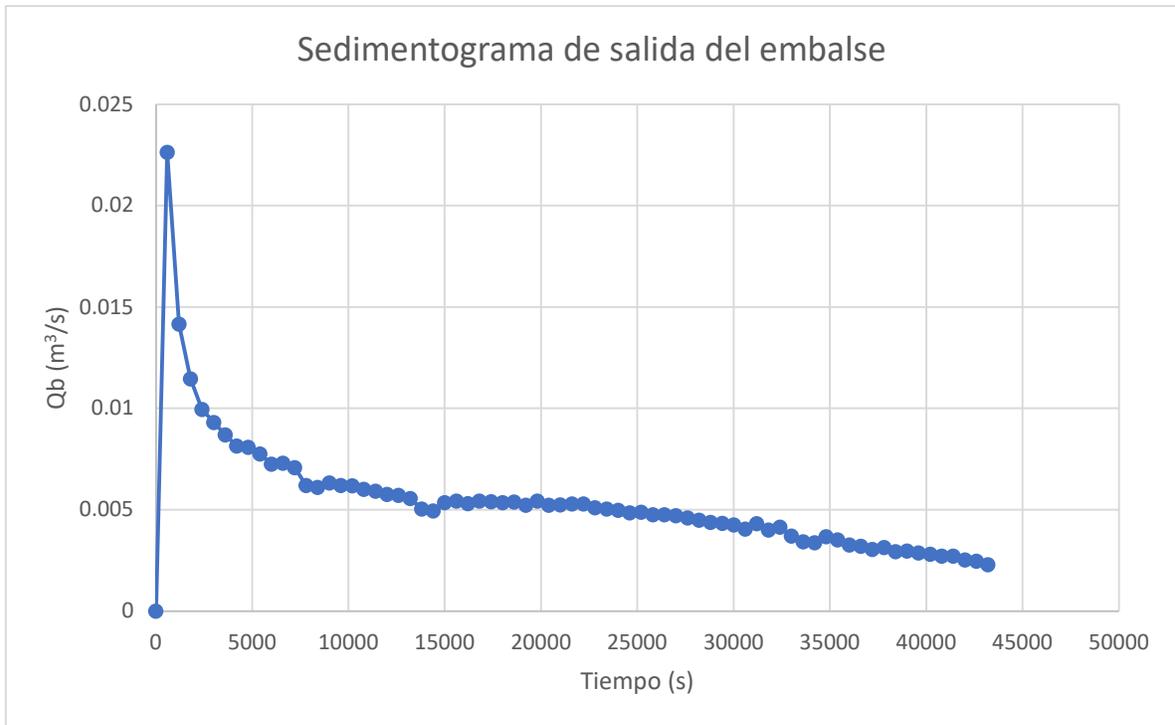


Ilustración A2-8. Sedimentograma de salida del embalse para la simulación con hidrograma triangular y $H = 721$ msnm.

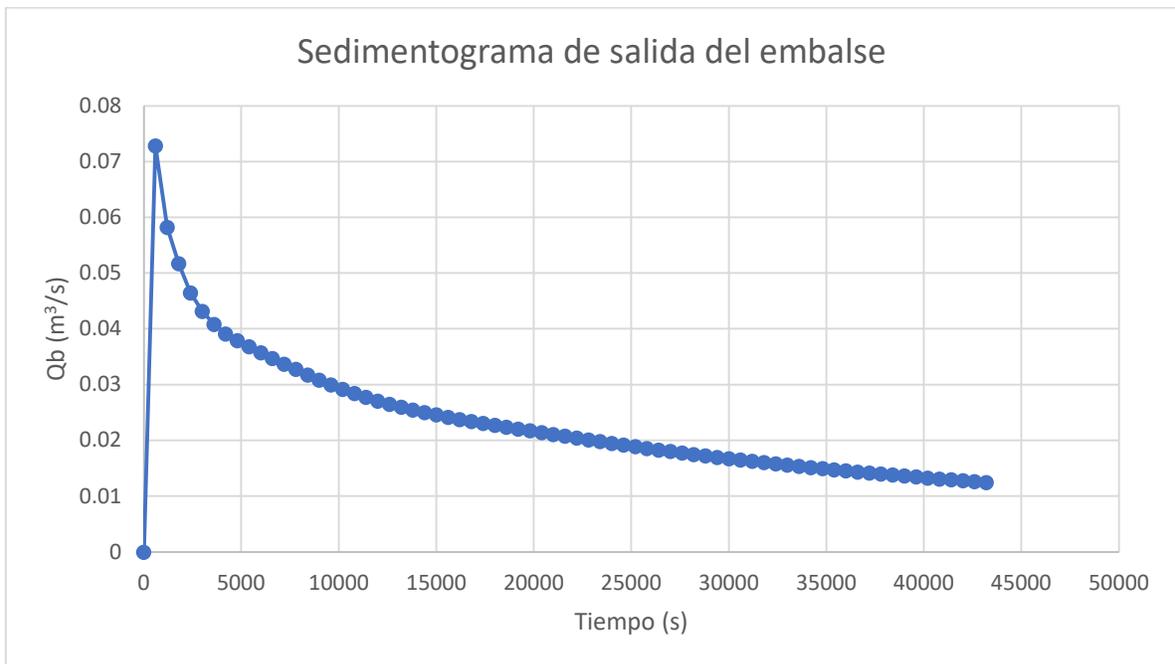


Ilustración A2-9. Sedimentograma de salida del embalse para la simulación con hidrograma triangular y $H = 746.46$ msnm.

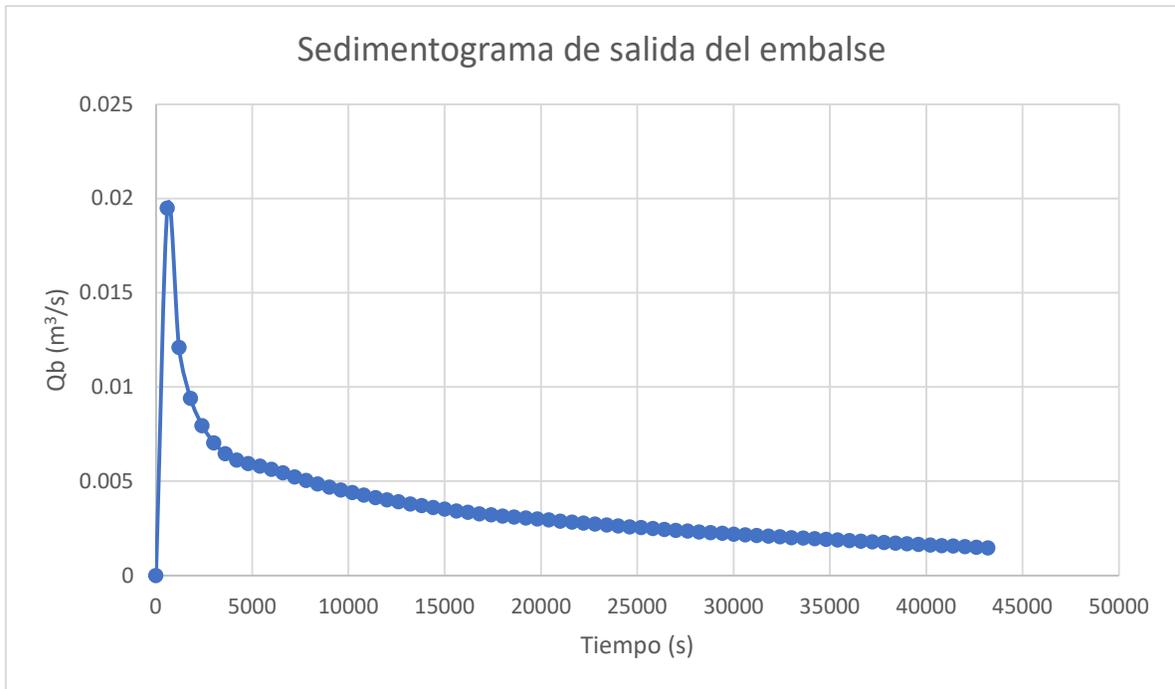


Ilustración A2-10. Sedimentograma de salida del embalse para la simulación con hidrograma triangular y $H = 727.365$ msnm.

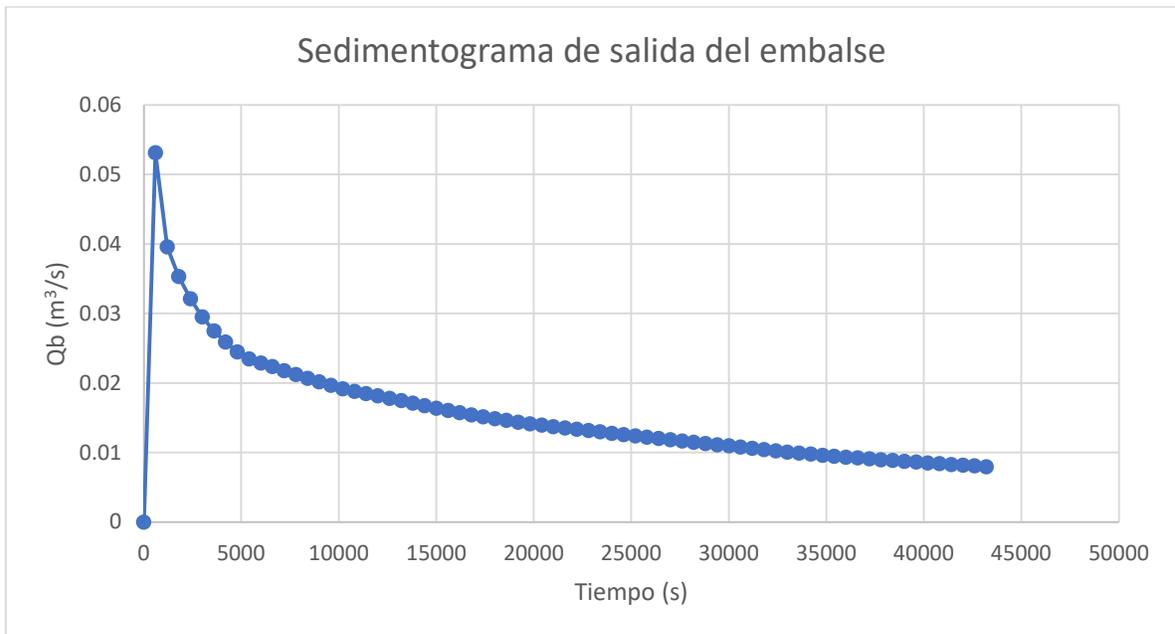


Ilustración A2-11. Sedimentograma de salida del embalse para la simulación con hidrograma triangular y $H = 740.095$ msnm.

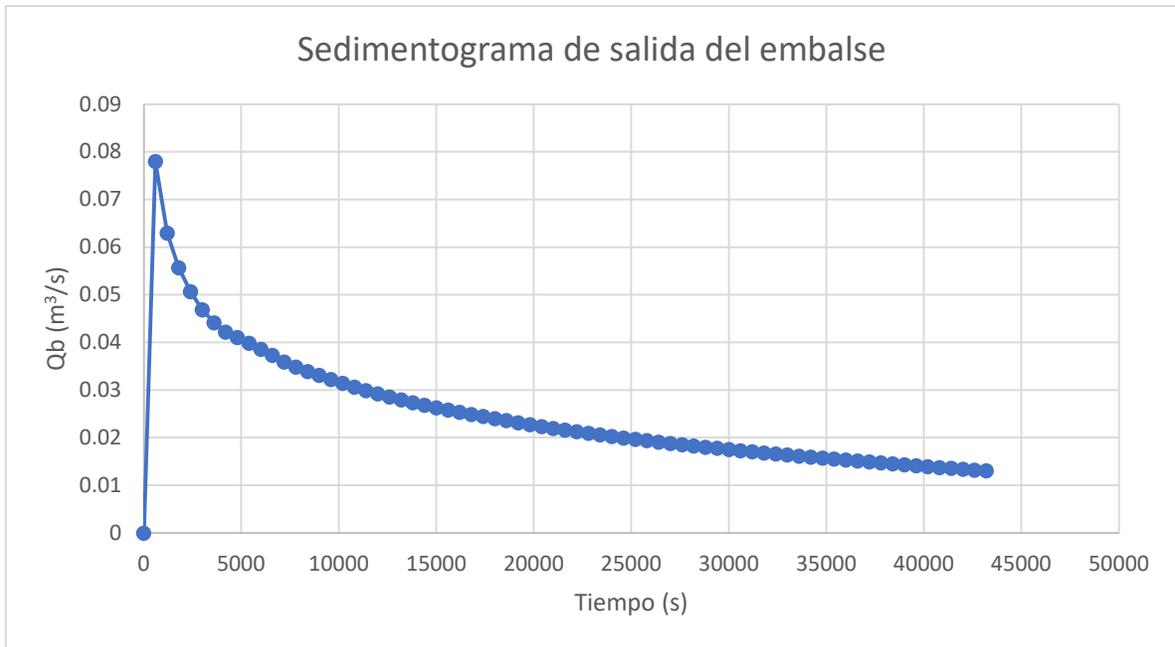


Ilustración A2-12. Sedimentograma de salida del embalse para la simulación con hidrograma triangular y $H = 748$ msnm.

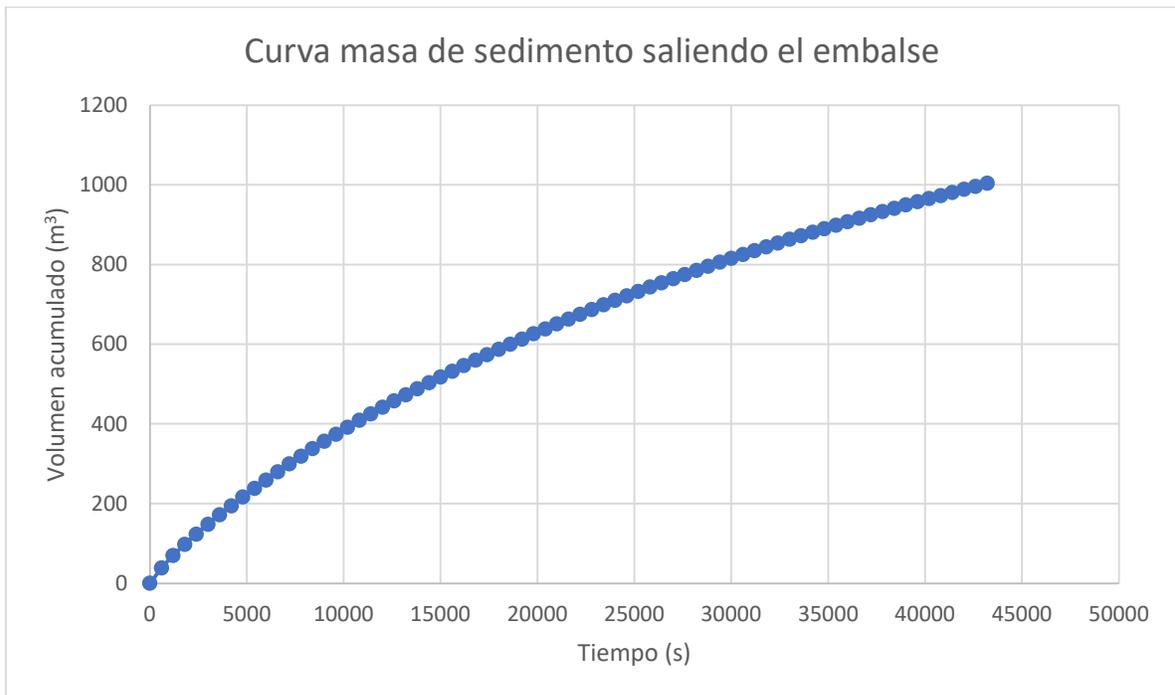


Ilustración A2-13. Curva masa de sedimentos saliendo el embalse para la simulación con Q medio anual y $H = 746.46$ msnm.

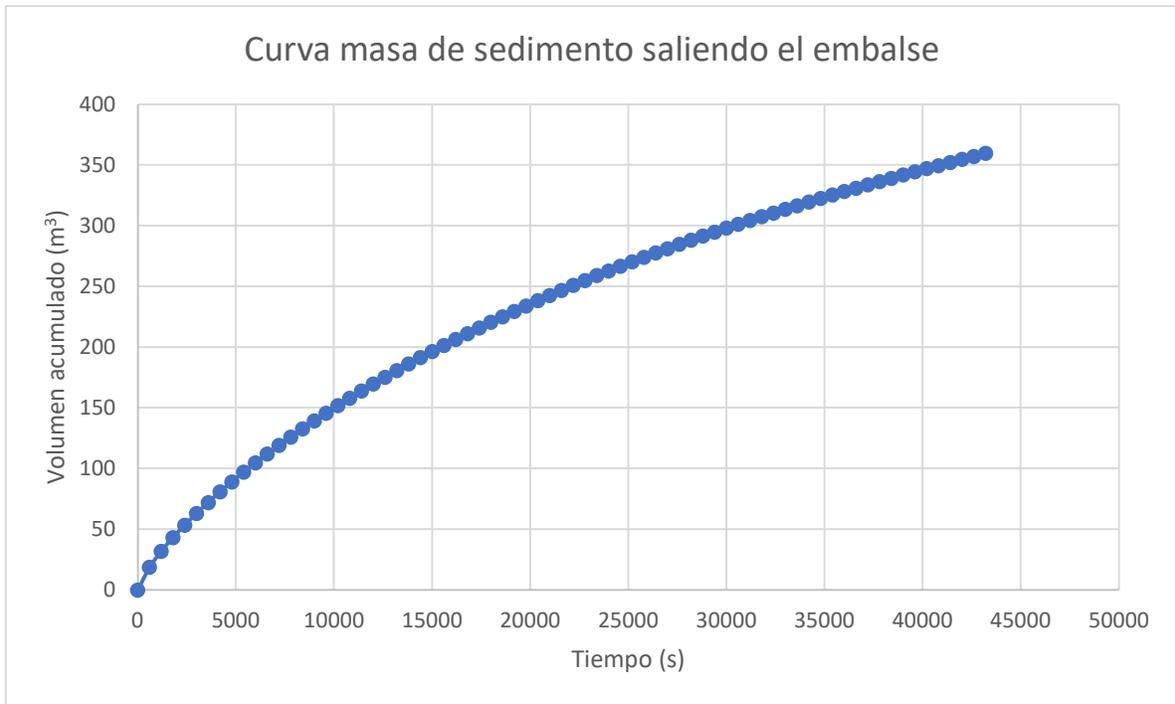


Ilustración A2-14. Curva masa de sedimento saliendo el embalse para la simulación con Q medio anual y $H = 733.73$ msnm.

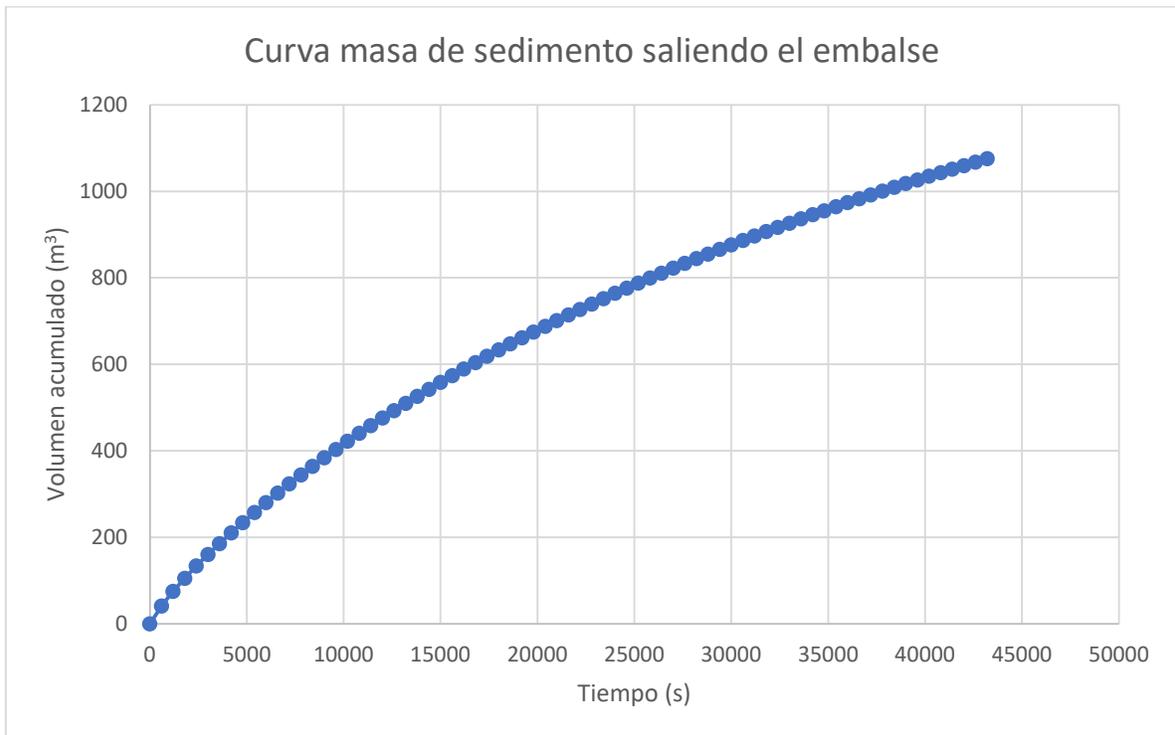


Ilustración A2-15. Curva masa de sedimento saliendo el embalse para la simulación con Q medio anual y $H = 748$ msnm.

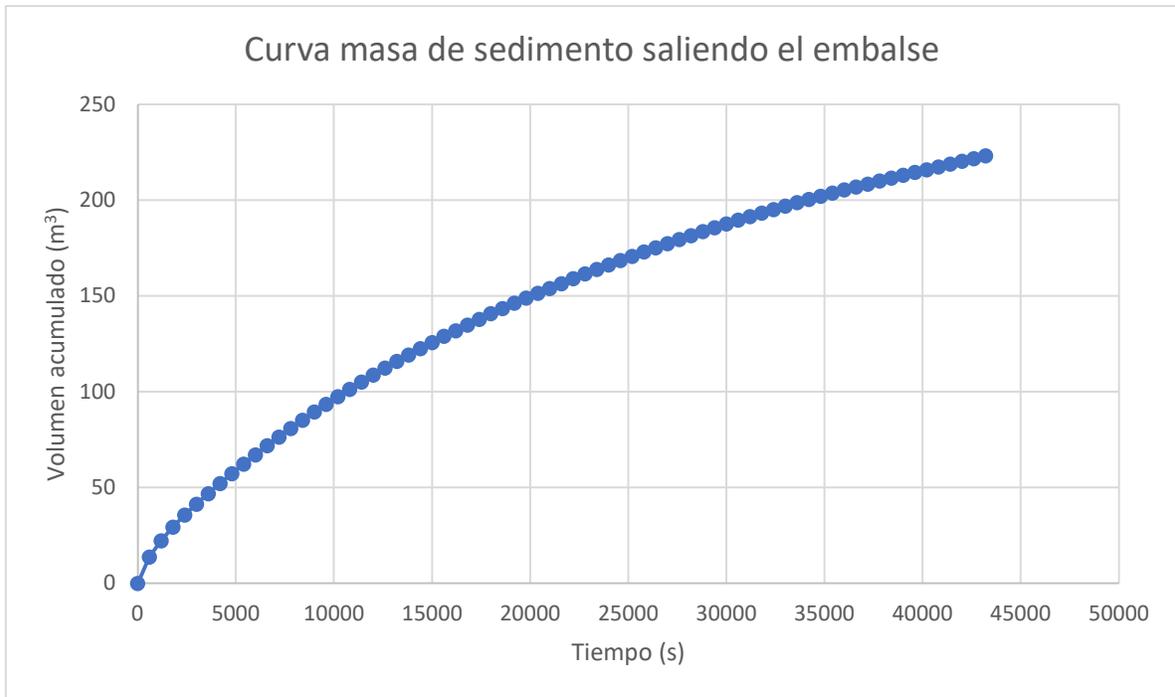


Ilustración A2-16. Curva masa de sedimento saliendo el embalse para la simulación con Q medio anual y $H = 721$ msnm.

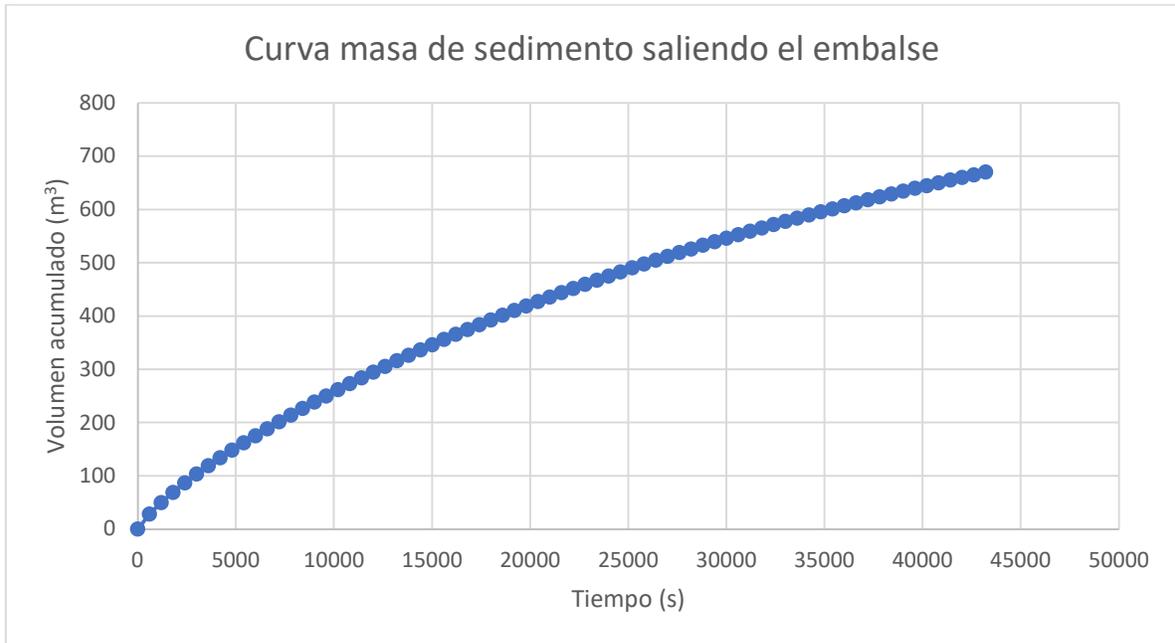


Ilustración A2-17. Curva masa de sedimento saliendo el embalse para la simulación con Q medio anual y $H = 740.095$ msnm.

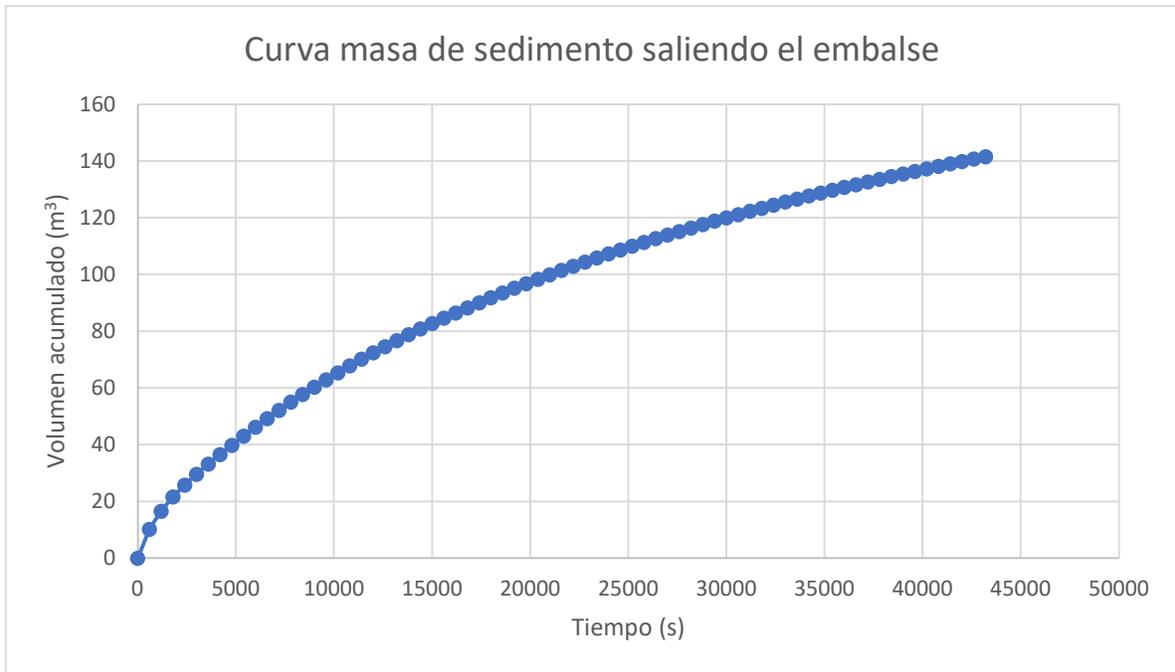


Ilustración A2-18. Curva masa de sedimento saliendo el embalse para la simulación con Q medio anual y $H = 727.365$ msnm.

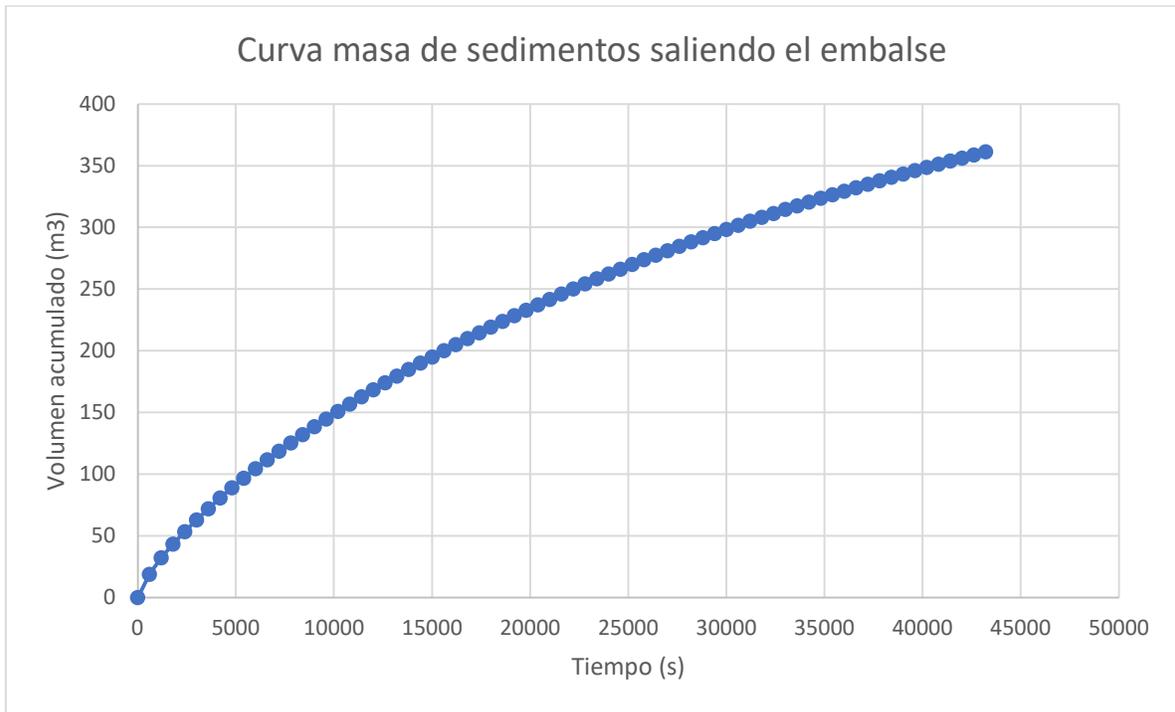


Ilustración A2-19. Curva masa de sedimento saliendo el embalse para la simulación con hidrograma triangular y $H = 733.73$ msnm.



Ilustración A2-20. Curva masa de sedimento saliendo el embalse para la simulación con hidrograma triangular y $H = 721$ msnm.

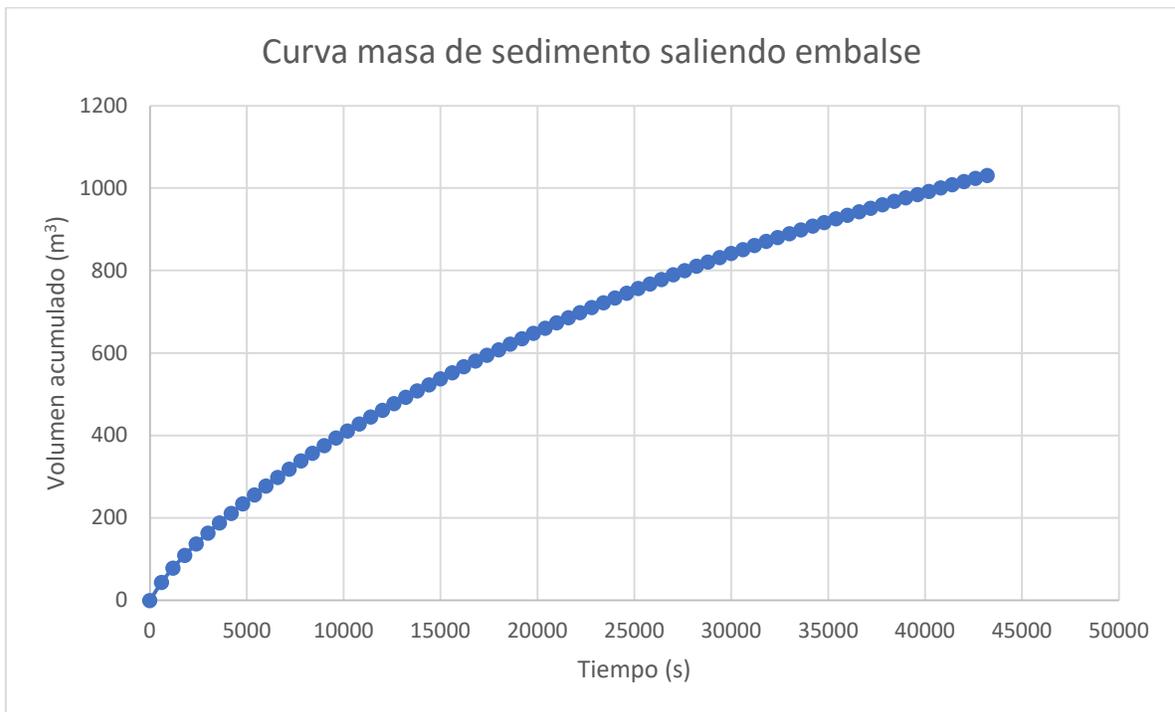


Ilustración A2-21. Curva masa de sedimento saliendo el embalse para la simulación con hidrograma triangular y $H = 746.46$ msnm.

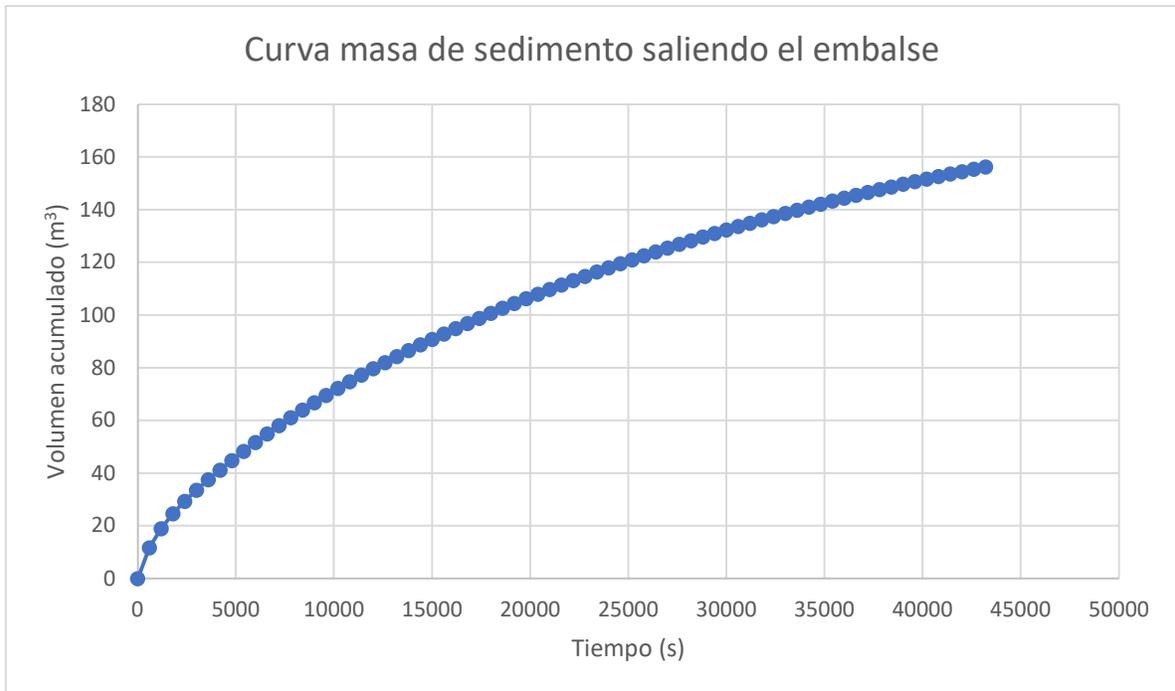


Ilustración A2-22. Curva masa de sedimento saliendo el embalse para la simulación con hidrograma triangular y $H = 727.365$ msnm.

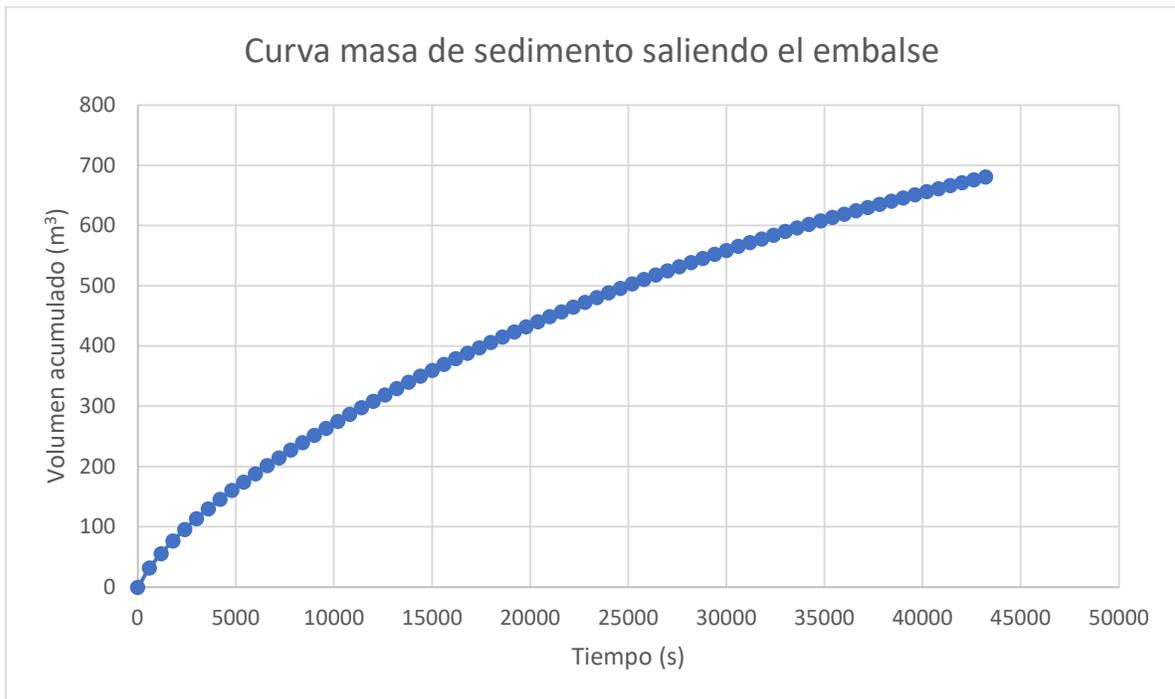


Ilustración A2-23. Curva masa de sedimento saliendo el embalse para la simulación con hidrograma triangular y $H = 740.095$ msnm.

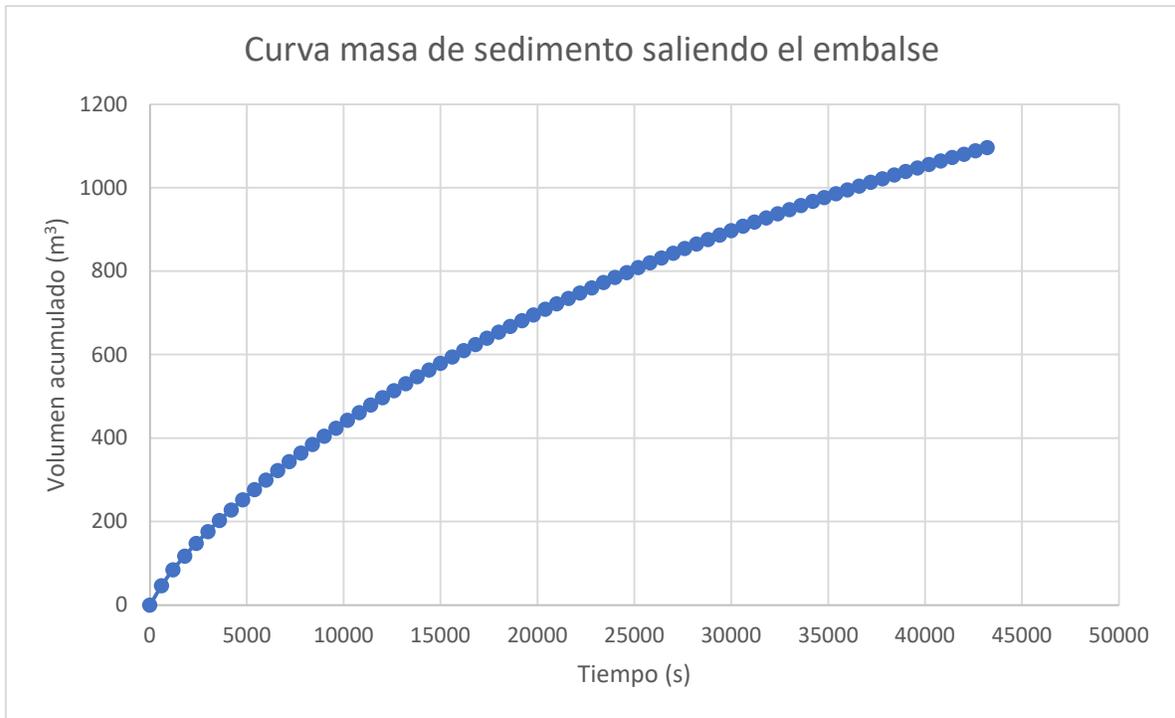


Ilustración A2-24. Curva masa de sedimento saliendo el embalse para la simulación con hidrograma triangular y $H = 748$ msnm.

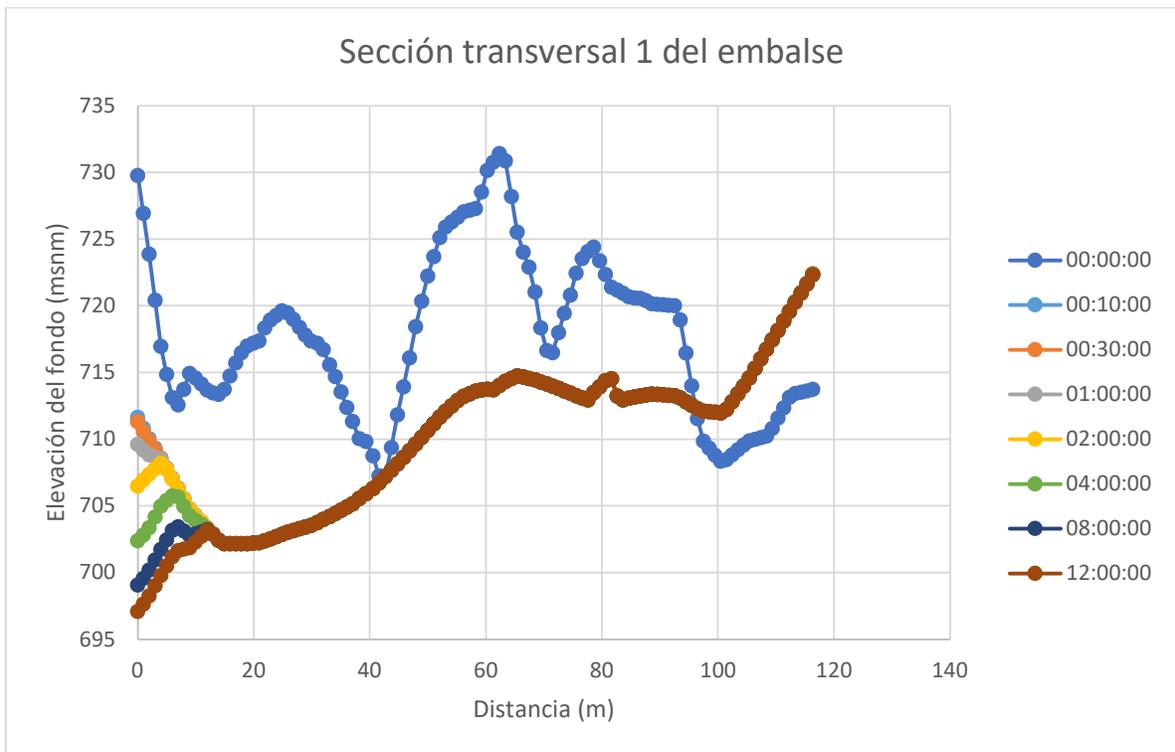


Ilustración A2-25. Sección transversal 1 aguas arriba de la cortina para la simulación con Q medio anual y $H = 746.46$ msnm.

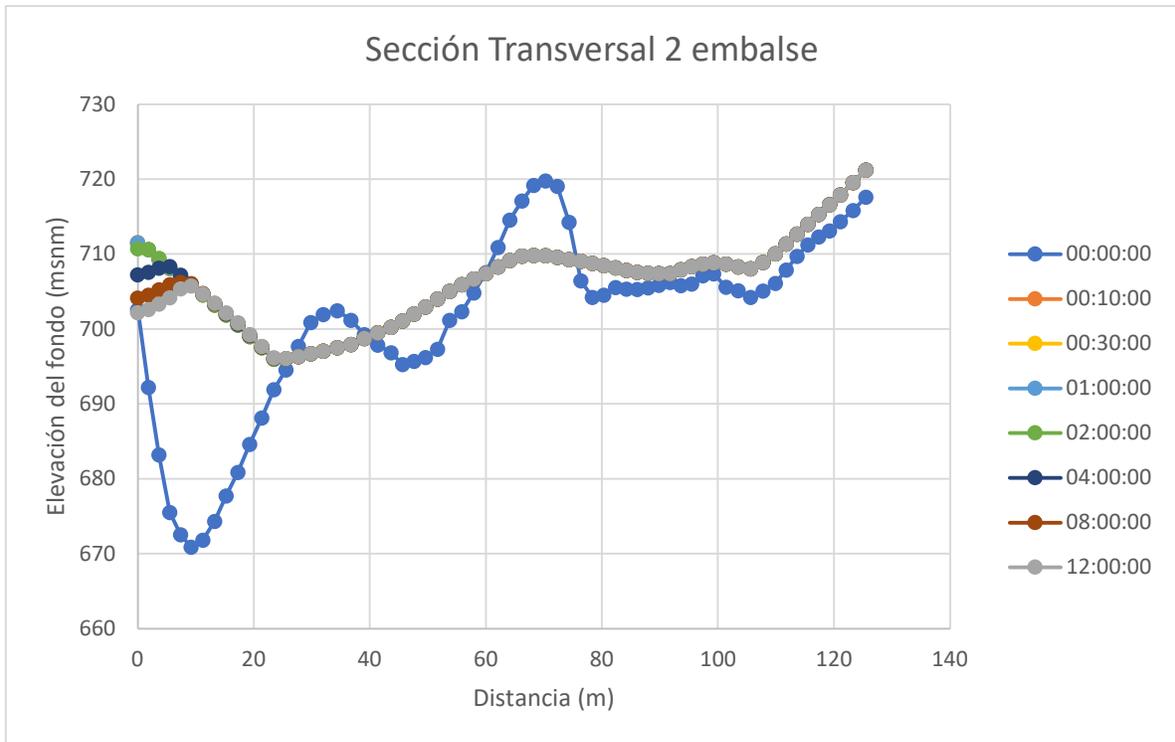


Ilustración A2-26. Sección transversal 2 aguas arriba de la cortina para la simulación con Q medio anual y H = 746.46 msnm.

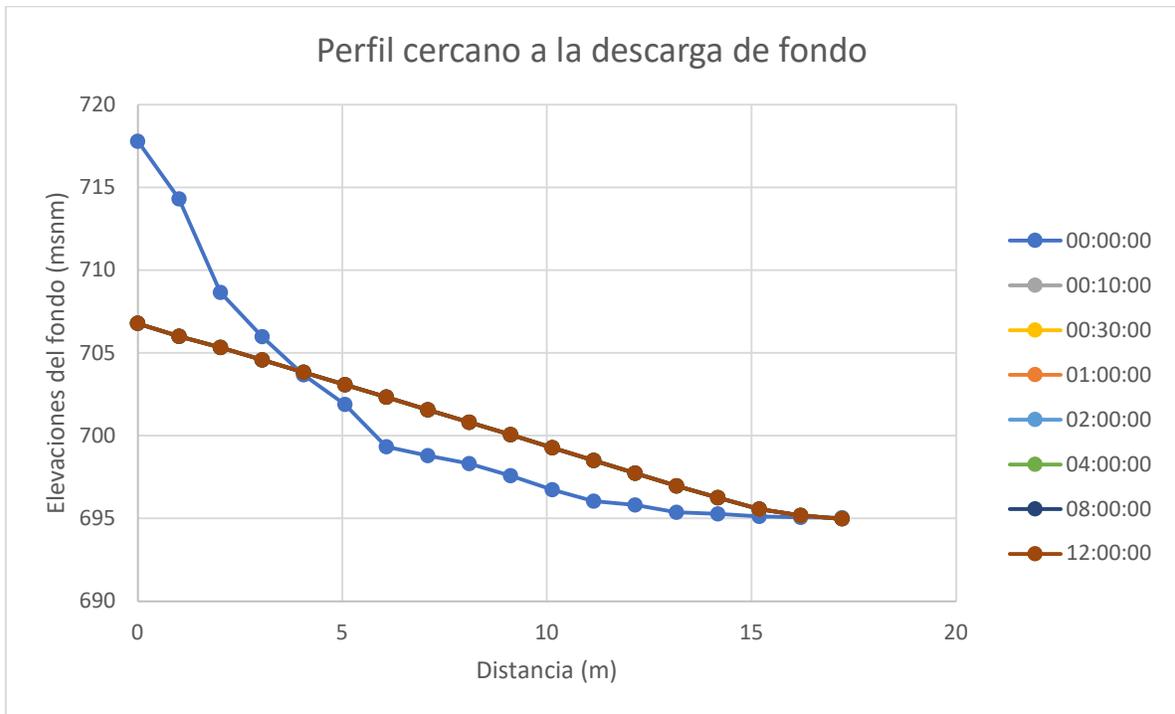


Ilustración A2-27. Perfil longitudinal cercano a la descarga de fondo para la simulación con Q medio anual y H = 746.46 msnm.

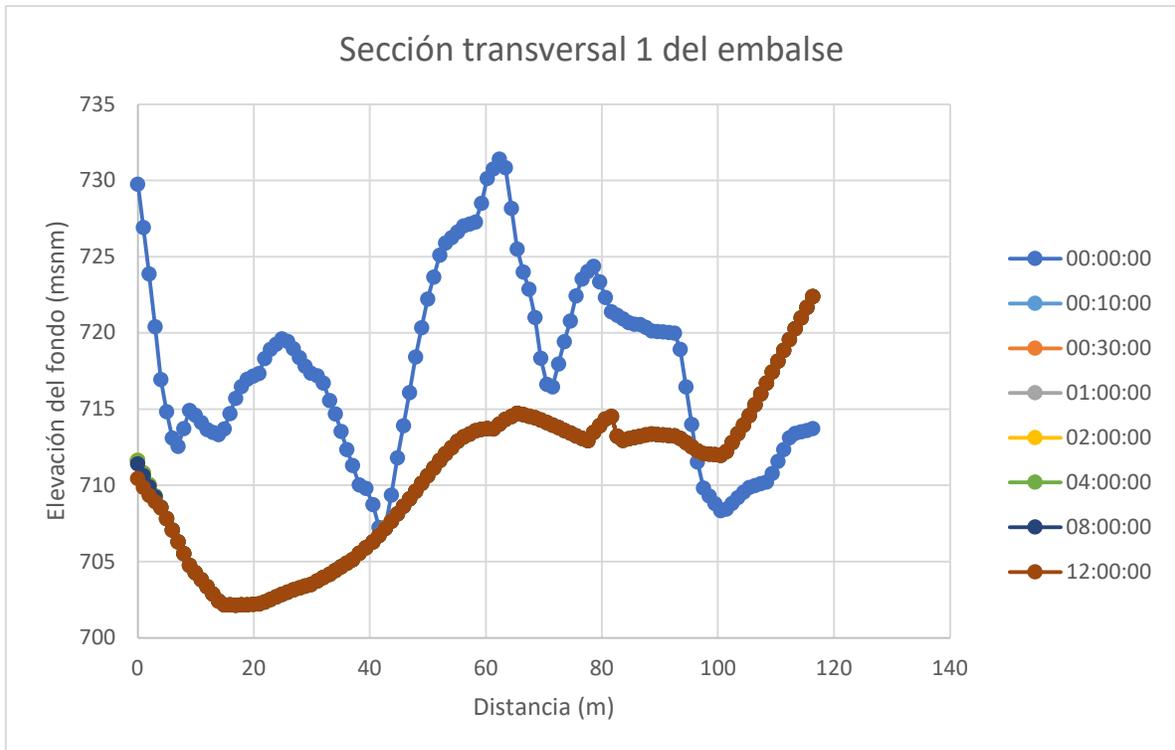


Ilustración A2-28. Sección transversal 1 aguas arriba de la cortina para la simulación con Q medio anual y $H = 721$ msnm.

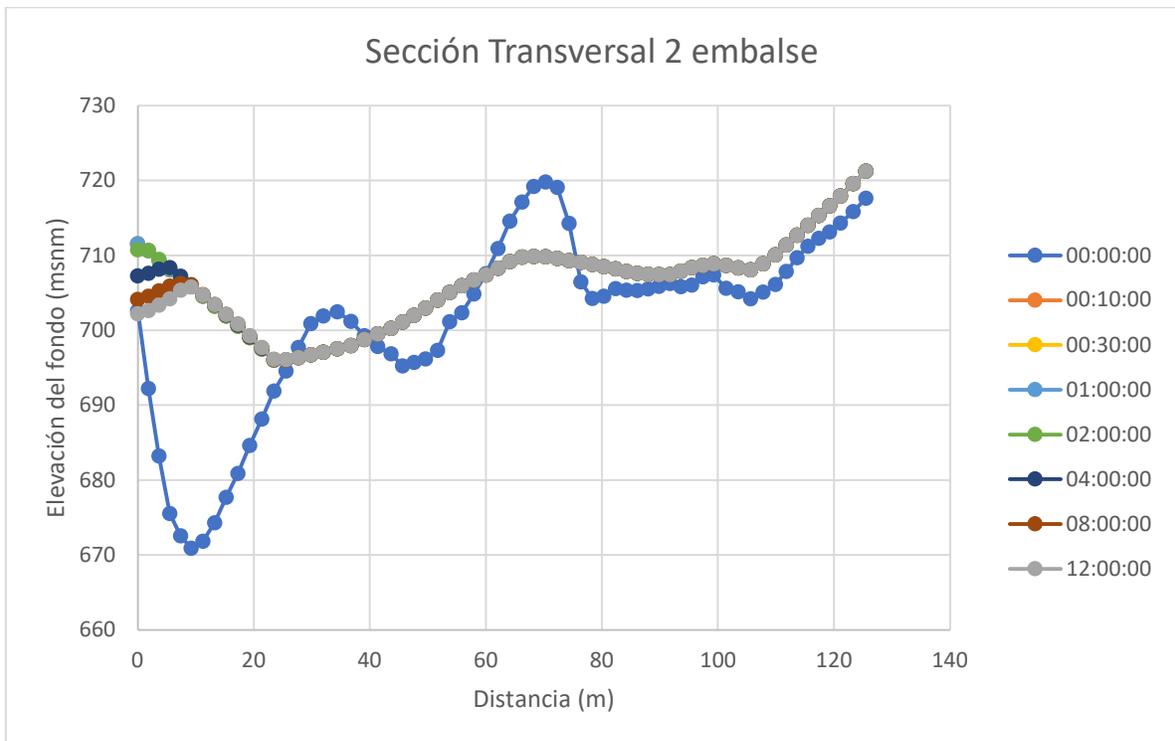


Ilustración A2-29. Sección transversal 2 aguas arriba de la cortina para la simulación con Q medio anual y $H = 721$ msnm.

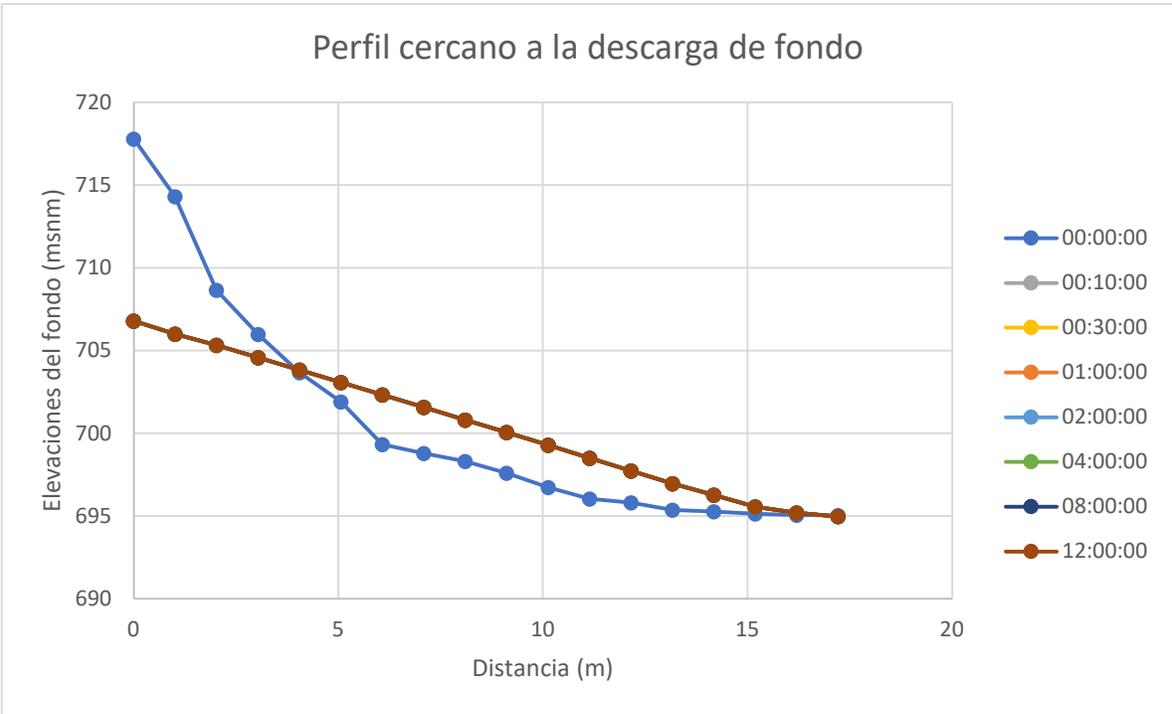


Ilustración A2-30. Perfil longitudinal cercano a la descarga de fondo para la simulación con Q medio anual y H = 721 msnm.

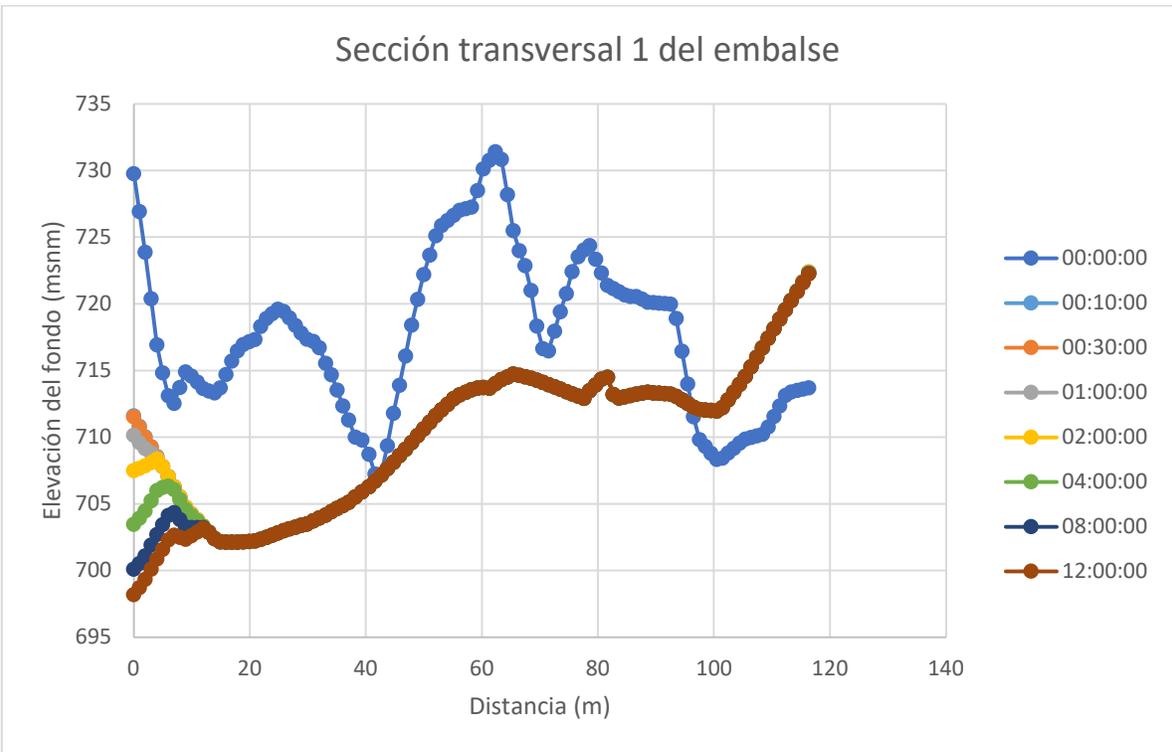


Ilustración A2-31. Sección transversal 1 aguas arriba de la cortina para la simulación con hidrograma triangular y H = 746.46 msnm.

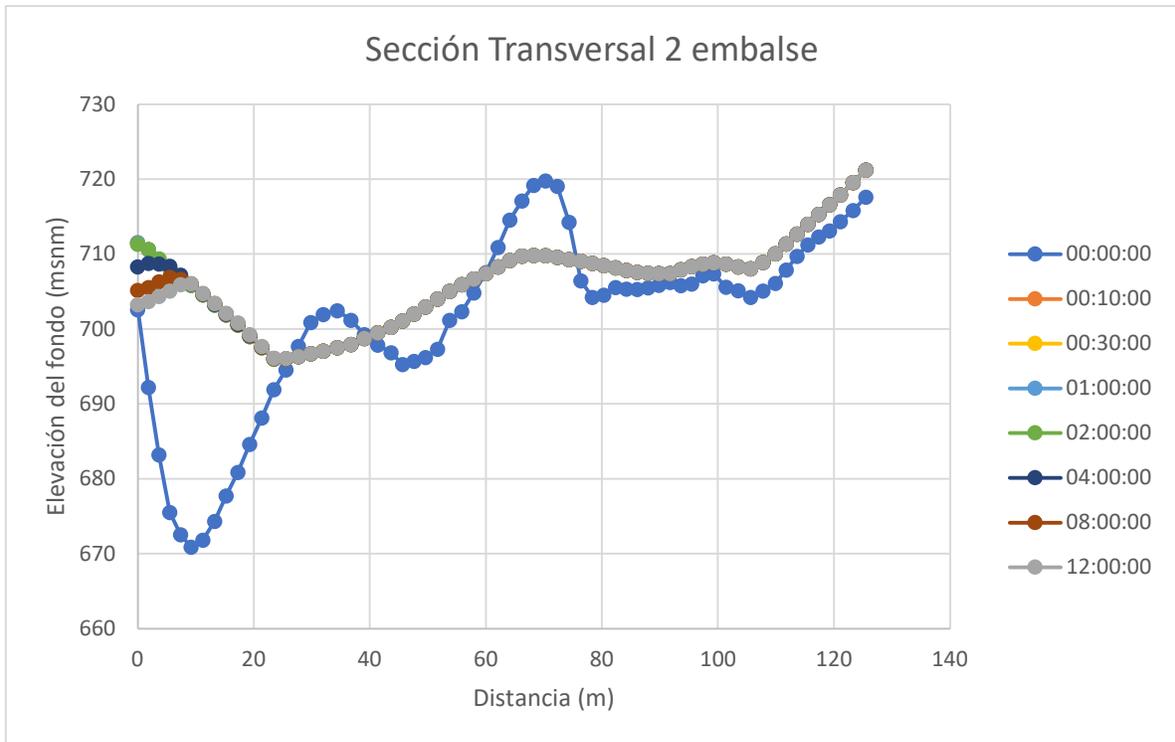


Ilustración A2-32. Sección transversal 2 aguas arriba de la cortina para la simulación con hidrograma triangular y $H = 746.46$ msnm.

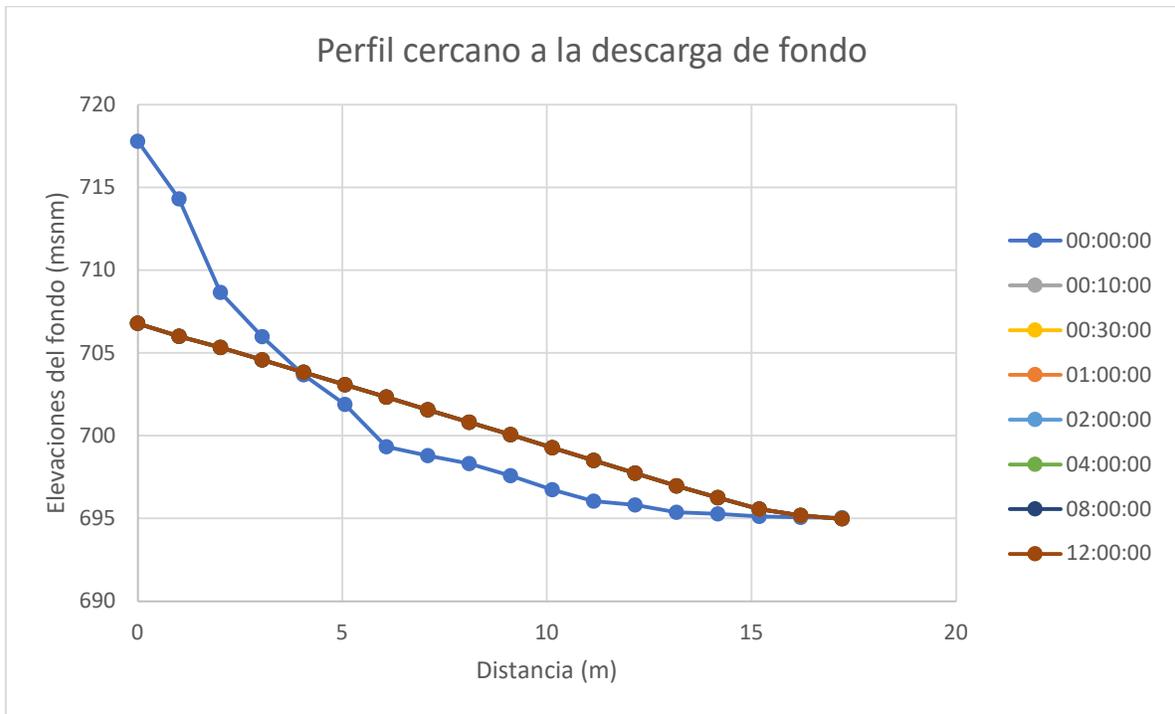


Ilustración A2-33. Perfil longitudinal cercano a la descarga de fondo para la simulación con hidrograma triangular y $H = 746.46$ msnm.

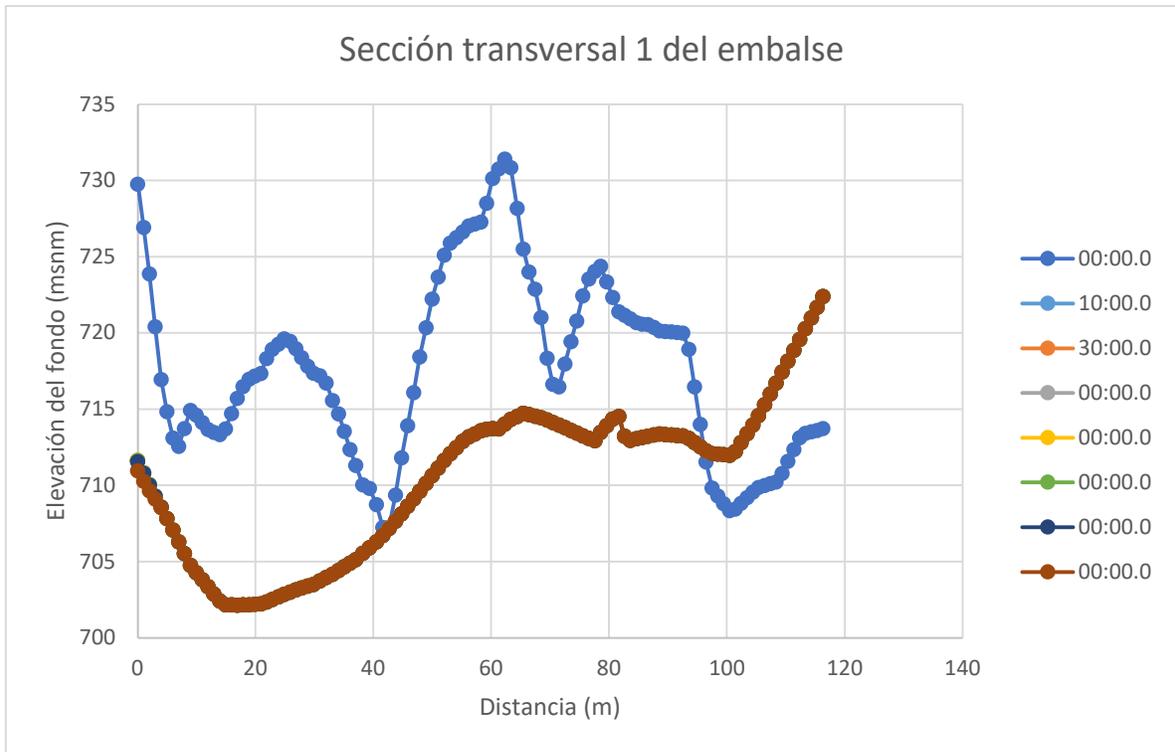


Ilustración A2-34. Sección transversal 1 aguas arriba de la cortina para la simulación con hidrograma triangular y $H = 721$ msnm.

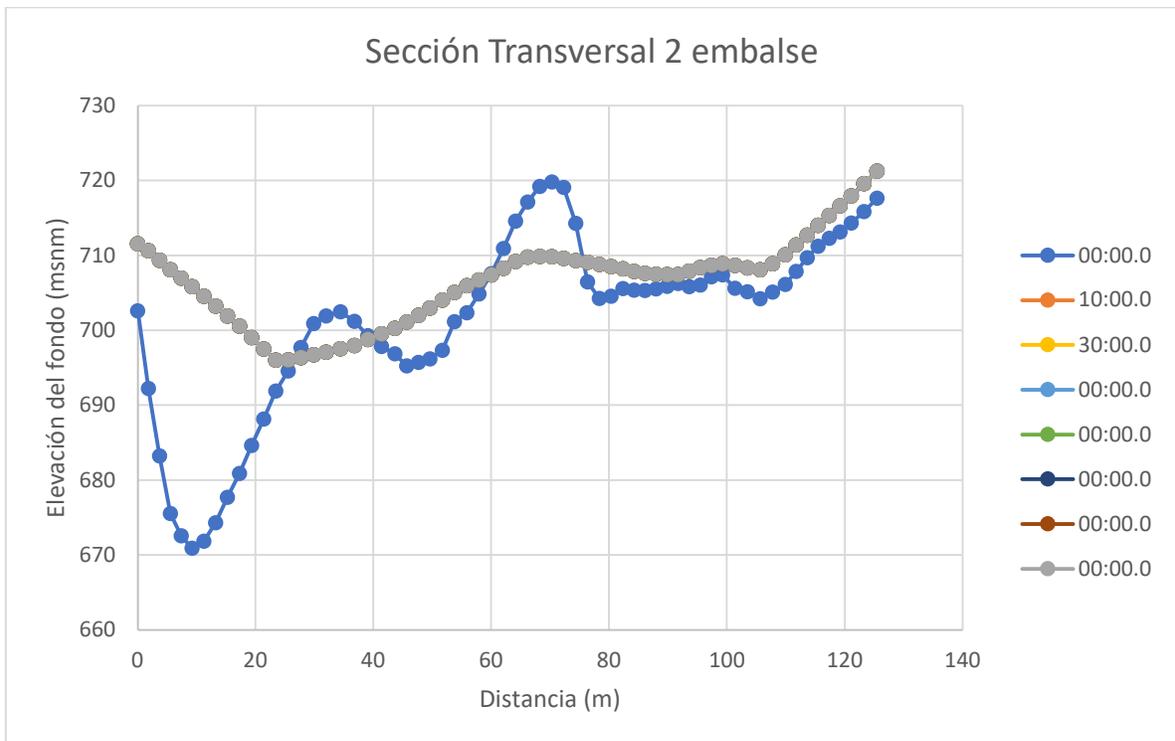


Ilustración A2-35. Sección transversal 2 aguas arriba de la cortina para la simulación con hidrograma triangular y $H = 721$ msnm.

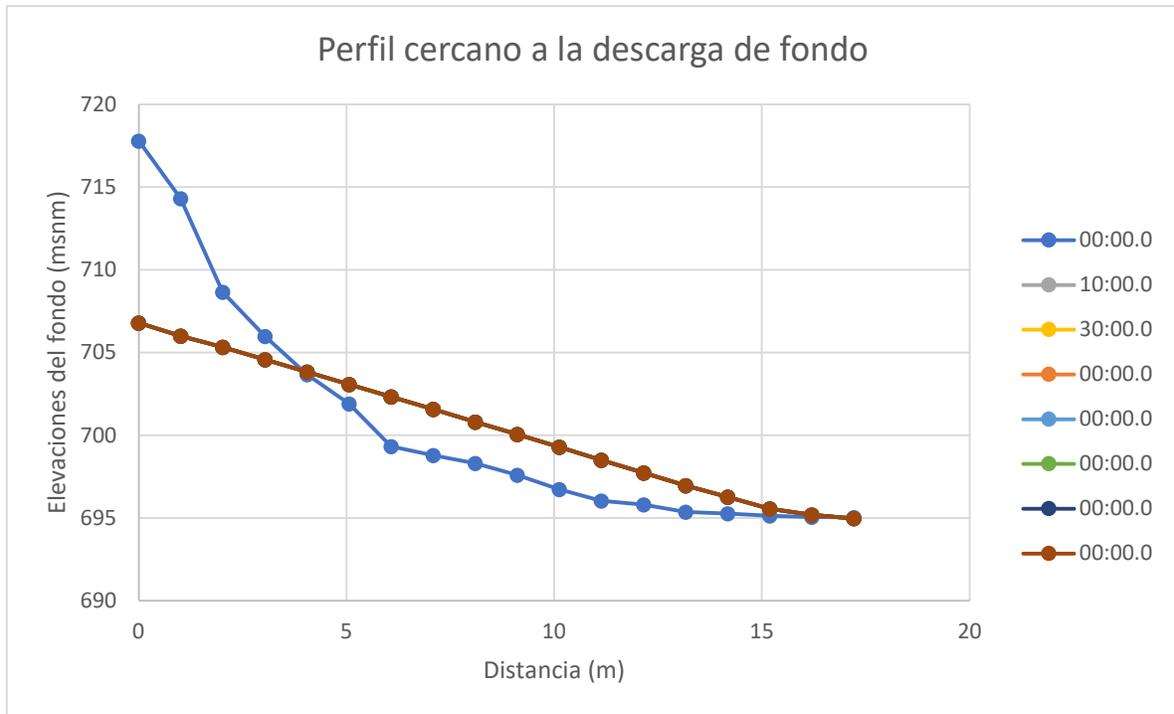


Ilustración A2-36. Perfil longitudinal cercano a la descarga de fondo para la simulación con hidrograma triangular y $H = 721$ msnm.

Anexo 3. Recomendaciones para mejorar los modelos numéricos de simulación flushing y trabajos futuros.

El autor recomienda continuar con esta línea de investigación utilizando modelos de flujo a superficie libre con datos más actualizados de batimetrías y registros históricos de caudales a la entrada del embalse. Así mismo los datos de campo son indispensables para calibrar los coeficientes de pérdida para el flujo en la alcantarilla, para calibrar el coeficiente de rugosidad del fondo y para caracterizar el sedimento (granulometrías, densidad, porosidad, ángulo de reposo, etc.) y su forma de transporte.

En el caso de tener interés en el vaciado completo del embalse se requiere de tiempo de simulación mayores (días o semanas) dependiendo del caso de estudio por lo que se recomienda conseguir un equipo de cómputo más actual y de mejores características. Es evidente que la falta de instrumentación de presas es un problema importante sin embargo esto representa una dificultad e inexactitud al momento de realizar estudios con modelos computacionales con el fin de hacer recomendaciones para programas de mantenimiento en embalses con varias decenas de años de operación por lo que se recomienda que en los siguientes años las autoridades a cargo pongan en prioridad invertir en la instrumentación de estas.

Si el interés del flushing va más enfocado a predecir la geometría y dimensiones del cono de flushing se recomienda trabajar con áreas más reducidas y modelos de superficie libre en tres dimensiones (por ejemplo, aquellos que resuelven las ecuación de Navier Stokes en 3 direcciones cómo lo son Telemac-3D o Flow 3D) con menores tiempos de simulación ya que se ha comprobado que la erosión importante en la vecindad de la obra ocurre en los primeros minutos dependiendo del área de la sección transversal de la obra de descarga de fondo.

Finalmente, se recomienda antes de realizar un proyecto de este tipo verificar los coeficientes de cálculo (número de Courant, periodo de acoplamiento, etc.) para hacer más eficiente el cálculo del problema obteniendo los resultados con una calidad aceptable (costo-beneficio) y evitar resultados inadecuados o inestabilidades en el método numérico.