

EL COMPORTAMIENTO DEL SEDIMENTO EN VERTEDORES LATERALES DE RÍOS

Osnaya Romero Javier

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

Gracia Sánchez Jesús

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

Ortiz Martínez Víctor M

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

Fuentes Mariles Oscar A

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

Víctor Franco

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ingeniería
Ciudad de México, México

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



Resumen: El artículo tiene como objetivo investigar la sedimentación en un canal lateral utilizando el modelo SSIIM. El objetivo fue identificar los factores que influyen en el proceso, verificar la confiabilidad de resultados y proporcionar formas para mitigar las implicaciones en la operación y mantenimiento de la estructura.

Palabras clave: Vertedor de desvío, Sedimentación.

INTRODUCCIÓN

Una obra hidráulica que se usa comúnmente en hidráulica fluvial, es el vertedor lateral en un río para derivar gastos durante avenidas extraordinarias. Cuando se instala un vertedor lateral, comúnmente sólo se toma en cuenta la derivación lateral del agua, pero no del sedimento que está transporta. Hay que reconocer que, en la mayor parte de los casos, tal derivación de sedimento no representa una preocupación importante, pero hay casos donde este fenómeno es relevante, porque dependiendo del sitio donde se deposite, puede modificar y reducir la capacidad de descarga.

El cálculo del comportamiento del agua en un vertedor lateral es un problema ampliamente abordado, pues se trata de un escurrimiento clasificado como espacialmente variado. Sin embargo, el cálculo del sedimento transportado no es un caso trivial pues su descarga depende además del comportamiento del gasto líquido de la ubicación del vertedor y del sedimento transportado.

El artículo tiene como objetivo investigar la sedimentación en el Canal de un vertedor lateral utilizando el modelo SSIIM. Identificando las características del sedimento que propician la extracción del río y luego el depósito en el canal lateral. Determinar los factores que influyen en el proceso, analizar la confiabilidad del resultado y proporcionar formas para mitigar en el mantenimiento de

las estructuras.

El software SSIIM se utiliza como herramienta analítica para los estudios de viabilidad de proyectos de ingeniería hidráulica, particularmente la sedimentación en estructuras hidráulicas.

El modelado numérico del flujo y el movimiento de sedimentos en un vertedor lateral tiene el potencial de hacer predicciones cuantitativas de su desempeño en la extracción de sedimentos, para representar una amplia gama de tamaños de grano. Un vertedor lateral puede ser capaz de extraer importantes cantidades de sedimentos y tiene un gran efecto en la distribución del tamaño del sedimento transportado en los flujos desviados a un canal lateral, y esto puede ser más importante que su efecto en la reducción de las concentraciones generales de sedimentos. Un buen diseño de la toma de un vertedor lateral puede excluir todo el material de mayor diámetro, de modo que solo el material fino ingrese al canal. Si el canal es capaz de transportar este material fino, la toma evitará el azolve, lo que de otro modo sería un grave problema de sedimentación. Tales condiciones solo pueden evaluarse con una simulación de los diferentes diámetros del sedimento. Una segunda ventaja del modelado numérico, es que es más económico que la construcción y las simulaciones en un modelo físico.

La sedimentación es un fenómeno complejo que se ha transformado en un fenómeno operativo importante con la necesidad de mantenimiento en la ingeniería hidráulica moderna y fluvial en particular. La acumulación de sedimentos a lo largo del curso del río y sus eventuales derivaciones laterales requieren de mantenimientos importantes, generalmente después de grandes avenidas.

Los principales objetivos de esta investigación se resumen a continuación:

a) Analizar la capacidad de derivación de

sedimento en un vertedor lateral de un río, ocasionado por avenidas severas.

b) Determinar la importancia de la granulometría en la derivación lateral de un río.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un vertedor lateral se instala para derivar los gastos de pico de una avenida. Esto puede realizarse cuando hidráulicamente existen las condiciones para instalar un vertedor de cresta larga y luego existe un sitio donde realizar la descarga. Una vez que descienden los niveles en el río principal, la descarga lateral deja de funcionar y nuevamente se tiene el funcionamiento regular.

En la Fig. 1 se muestra la parte de un vertedor lateral donde después de una avenida ha ocurrido depósito de sedimento del cual se señala el espesor. Como se observa, la obstrucción en el canal de derivación es evidente e influye sobre el desvío del gasto y por supuesto habrá que removerse. En el caso particular que se presenta en la Fig. 1, el problema se acentúa por la acumulación de restos de vegetación transportada. En la figura se observa el recubrimiento del fondo del piso del vertedor y hasta el fondo de la fotografía una de las paredes laterales del canal del vertedor. Sin embargo, nótese el gran espesor de sedimento depositado en una parte del ancho del vertedor.

La conclusión evidente que se obtiene del planteamiento, es la necesidad de cuantificar el comportamiento del sedimento en el proceso de diseño del vertedor.

El problema que esto implica no es sólo resolver el problema de del comportamiento de un flujo especialmente variado del agua, sino el de el comportamiento del sedimento que transportado y definir la parte que pasa hacia el vertedor lateral.

ESTADO DEL ARTE

La sedimentación es un fenómeno complejo, que ha surgido como un importante fenómeno para la operación y el mantenimiento de las estructuras en la ingeniería hidráulica moderna, en la ingeniería en general y particularmente en la fluvial. La acumulación de sedimentos a lo largo del curso de un río y su eventual almacenamiento, puede afectar el ingreso del agua en los sistemas de canales laterales.

Actualmente existen diferentes técnicas para resolver problemas de flujo espacialmente variado en el diseño de vertedores laterales (Sotelo, 2002 y Chow, 2000). En un flujo de estas características, a lo largo del vertedor, cambian tanto el tirante como el gasto el cual va disminuyendo por la salida de agua a través de la estructura de derivación. Sin embargo, determinar la cantidad de sedimento que puede desviarse por el vertedor lateral es un problema que en la actualidad sólo puede intentar resolverse con modelos físicos, pues no existen criterios analíticos confiables para abordar esta problemática. Afortunadamente con el desarrollo de modelos matemáticos puede intentarse abordar la problemática, sin embargo, hay que notar que a la fecha, el mayor desarrollo lo han logrado los modelos bidimensionales de ríos que no sirven para este tipo de análisis que son claramente tridimensionales y por ende requieren de modelos que puedan representar la realidad tridimensional por las características del problema.

El trabajo propone emplear un modelo numérico tridimensional denominado SSIIM (Simulation of Sediment Movements In water Intakes with Multiblock option, Olsen, 2011) que es de uso libre y presenta ventajas para abordar la problemática.

Los modelos numéricos dentro de ciertos límites, permiten investigar el desempeño de las estructuras de manejo de sedimentos sin

el uso de modelos físicos, que generalmente no proporcionan predicciones cuantitativas en esta aplicación. Los modelos numéricos proporcionan diferentes tipos de información: predicciones cuantitativas de los tamaños y cantidades de sedimentos desviados en las derivaciones laterales, el rendimiento de las derivaciones de sedimento, zonas de sedimentación, capacidad de transporte y patrones de deposición dentro de las estructuras. Adoptar un enfoque cuantitativo para el manejo de sedimentos basado en simulaciones numéricas tiene muchas ventajas, la más importante es la capacidad de comparar rápidamente una gama de opciones de manejo de sedimentos, optimizando el desempeño de las estructuras de control de sedimentos y permitiendo comparar los costos de construcción de estructuras de control de sedimentos con una estimación realista de los beneficios.

Los principales objetivos de esta investigación se resumen en:

- a) Analizar la capacidad de desviación de agua y sedimento en una obra de desvío, particularmente cuando es alta la concentración de sedimentos provocada por avenidas severas.
- b) Obtener el diseño básico de estructuras de control de sedimentos para ser consideradas en la toma de decisiones.

La disminución de la carga de sedimentos, hacia aguas abajo, normalmente no afecta de manera significativa el flujo del río aguas abajo. Sin embargo, el flujo de sedimentos por el canal lateral sí puede ser significativo (ver Fig. 1) pero en la medida que no lo obstruya no habrá problema, de hecho si descarga a zonas amplias agrícolas, puede ser benéfico.

Para lograr un diseño óptimo del vertedor lateral destinado a la desviación de flujo, es muy necesario un análisis adicional sobre la elevación apropiada de la estructura. Puede

ayudar a estimar el costo de construcción, ya que la dimensión de las estructuras está determinada por la diferencia de elevaciones entre el fondo y la cresta. Mientras menor sea la carga sobre el vertedor, será más difícil lograr un flujo estable. Se debe diseñar una longitud de vertedor que evite que el flujo espacialmente variado se acentúe. Hay que recordar también que la longitud del vertedor, es desde el punto de vista económico, importante.

Los procesos de sedimentación y erosión que ocurren en el río aguas arriba dan efecto al sedimento desbordado ya que afecta el curso y la velocidad del flujo.

El flujo de sedimentos de alta concentración es difícil de estimar mediante un enfoque matemático, como se demuestra con diferentes coeficientes de escorrentía.

Para el desarrollo de una investigación completa, hay varias cosas que es necesario tener en cuenta:

- a) Debido al problema de complejidad, se requiere un estudio más profundo sobre sedimentos de alta concentración.
- b) Es necesario escalar el modelo físico.
- c) Es necesario realizar un estudio sobre variación de posiciones y ángulos de estructuras.
- d) El experimento puede usar el suministro de sedimentos con una distribución variada de tamaño de grano y concentración, de modo que se pueda desarrollar una ecuación matemática para predecir el volumen de sedimentación.
- e) Se deben realizar más investigaciones de laboratorio incorporando la comparación de datos de campo a fin de desarrollar una ecuación empírica que se pueda utilizar para investigaciones posteriores para predecir el volumen de sedimento desbordado deseado.



Figura. - 1 Depósito de sedimento en un vertedor lateral.

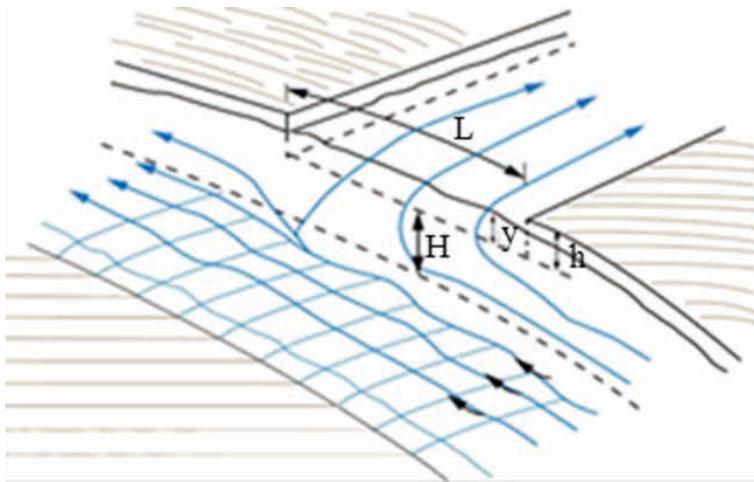


Figura.- 2 Esquema de una derivación lateral.



Figura. - 3 Modelo físico de un vertedor lateral

CASO ANALIZADO

En la Fig. 2 se muestra el esquema de una derivación lateral en la curva de un río donde se pretende emplear el extradós de la curva para ubicar el vertedor y disponer de una carga adecuada para desviar parte del flujo hacia el vertedor lateral. Esta obra es para recortar el pico de las grandes avenidas y disminuir el peligro de inundación aguas abajo. El agua que se derivará lateralmente durante las avenidas, viajará hacia una zona lagunar con la capacidad suficiente para manejar estos picos. En esa figura L es la longitud de la escotadura, H es la altura del fondo de la curva hasta la cresta de la obra de derivación, “ y ” es el tirante de entrada a la escotadura, y “ h ” la altura total de la entrada desde la cresta hasta el nivel del terreno.

El objetivo de las simulaciones realizadas es saber cómo influye el tipo de sedimento en el funcionamiento de la derivación lateral, ya que en la primera ocasión en que funcionó, almaceno importantes cantidades de sedimento, además de troncos y ramas de árboles que causaron daños en la superficie de recubrimiento de la estructura de derivación lateral.

Conviene señalar que adicionalmente, se construyó un modelo físico de la estructura para buscar mecanismos que ayudaran a aumentar las capacidades de descarga del vertedor lateral. Dicho modelo fue de fondo móvil, pero no se detectó el depósito de sedimento en la estructura. En la Fig. 3 se muestra el del modelo físico construido.

Los modelos físicos son necesarios a la falta de datos de campo confiables, particularmente de los sistemas de crecidas, que se necesitan para configurar y verificar modelos numéricos de transporte de sedimentos. Los modelos solo pueden mejorarse y desarrollarse, y los problemas de sedimentación se pueden cuantificar adecuadamente mediante comparaciones con información de campo

confiable. Sin embargo, cuando los aplican ingenieros que conocen los modelos y los procesos que se están simulando, los modelos numéricos de transporte de sedimentos proporcionan una ayuda inestimable para el diseño de desviaciones por crecidas.

Sin embargo, el uso de un modelo físico para hacer predicciones cuantitativas de la exclusión de sedimentos está plagado de dificultades. El problema es principalmente de escala. Si el tamaño del sedimento se escala en proporción a la escala del modelo principal, entonces el material requerido se vuelve tan fino que exhibe propiedades muy diferentes al prototipo. Se han utilizado con cierto éxito artificios como el uso de sedimentos livianos de gran tamaño o modelos de inclinación, pero se ha demostrado que es imposible satisfacer las leyes físicas para escalar sedimentos cuando se usa agua como fluido modelo. En modelos de una escala razonable, solo se pueden representar los sedimentos más grandes, moviéndose como carga del lecho.

En las tablas 1 y 2 se muestran las granulometrías de los sedimentos considerados. Uno se denominó como “arena gruesa”, para distinguirlo del otro “arena fina”, pero el principal interés es mostrar los diferentes comportamientos al entrar a la obra de derivación.

El gasto empleado en las simulaciones de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ a la entrada con una derivación lateral de $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Se simularon 12 hrs. de flujo.

Diámetro [mm]	Velocidad de caída [m/s]
0.0010	0.0981
0.0009	0.0921
0.0008	0.0857
0.0007	0.0787
0.0006	0.0710

Tabla 1.- Arena Gruesa

Diámetro [mm]	Velocidad de caída [m/s]
0.0005	0.0624
0.0004	0.0524
0.0003	0.0403
0.0002	0.0253
0.0001	0.0098

Tabla 2.- Arena Fina

SIMULACIONES REALIZADAS CON ARENA GRUESA

En la Fig. 4 se muestra una figura donde se muestran en planta los vectores de velocidad en el río y del canal lateral de derivación. La línea roja muestra la posición de la derivación lateral.

En la Fig. 5 se muestran las zonas de depósito en el fondo. Y en la Fig. 6 las concentraciones en el fondo.

SIMULACIONES REALIZADAS CON LA ARENA FINA

En la Fig. 7 se muestran las zonas de depósito en el fondo, en la Fig. 8 las concentraciones en el fondo para la arena más fina.

Como se observa en la Fig. 7 el depósito de sedimento obtenido es similar al presentado en la Fig. 1. Es decir se ha logrado reproducir el depósito a la entrada del vertedor lateral, a la entrada del canal.

Otro resultado importante es lo relacionado con las concentraciones de sedimento. La Fig. 8 muestra la distribución de concentraciones para la granulometría de arena fina. Como puede observarse ya se observa la tendencia a transportar el material de estas características por el canal lateral tal como se indicó en la Fig. 1.

RESULTADOS GENERALES OBTENIDOS

En las Figs. 4 a 8, se muestran los principales elementos simulados especialmente para el

caso de la arena más fina. Como se observa, se logra representar, las zonas de depósito y las concentraciones en cualquier punto del sistema analizado. Estos son sólo dos ejemplos de los diferentes resultados que pueden obtenerse con el modelo de simulación. La utilidad de estos resultados sirve para definir la conveniencia de instalar el vertedor lateral en el sitio, o con esa orientación, o bien de diseñar elementos necesarios que permitan mejorar su funcionamiento, en especial en este caso, ha interesado definir los sitios donde ocurre el depósito de sedimento.

Como sólo se permite que las inundaciones más grandes pasen más allá del cauce principal por las crecidas, la mayoría de los sedimentos transportados al primer punto de desvío en un esquema de crecidas se deposita en la zona de derivación. Los sedimentos más gruesos se asientan en el río (sí esto es posible), y los sedimentos más finos salen por la derivación. Si estos sedimentos finos pasan por zonas agrícolas, los agricultores agradecen la sedimentación como fuente de fertilidad. Los sistemas de crecidas construyen sus propios suelos, y los sistemas más antiguos se caracterizan por depósitos de sedimentos finos que tienen muchos metros de profundidad.

La disminución de la descarga de sedimentos afecta el flujo del río aguas abajo, debido al aumento total de masa a través del flujo. Cuando baja el flujo aguas abajo, el flujo de sedimento tenderá a depositarse aguas abajo e influirá en el cambio en la dirección del flujo. El flujo dirigido al canal lateral puede hacer que el sedimento derivado sea más alto.

Es necesario señalar que siempre que sea posible es conveniente usar todas las herramientas disponibles, esto es los modelos físicos no excluyen a los numéricos y viceversa. Ya que se llegan a detectar detalles importantes en los modelos físicos que a veces son indetectables en los numéricos,

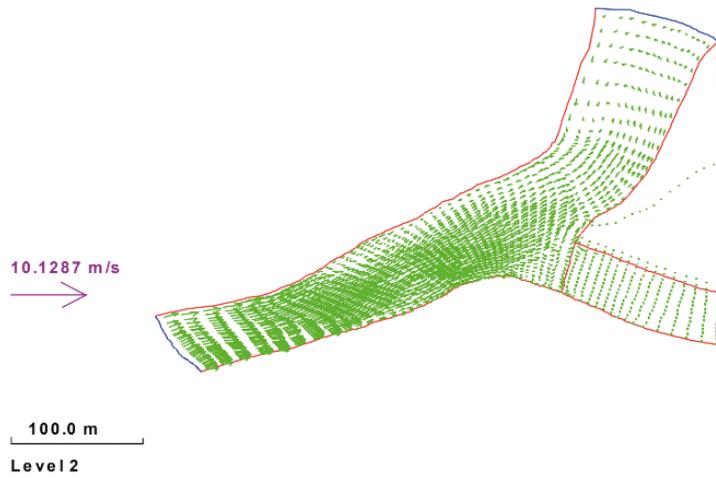


Figura. - 4 Planta de la curva de un río y ubicación del canal del vertedor lateral.

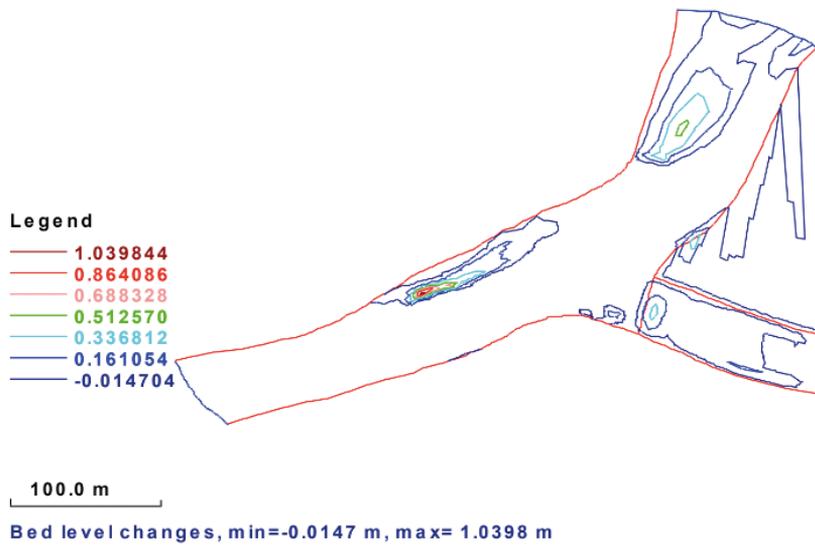


Figura. - 5 Depósito de arena gruesa.

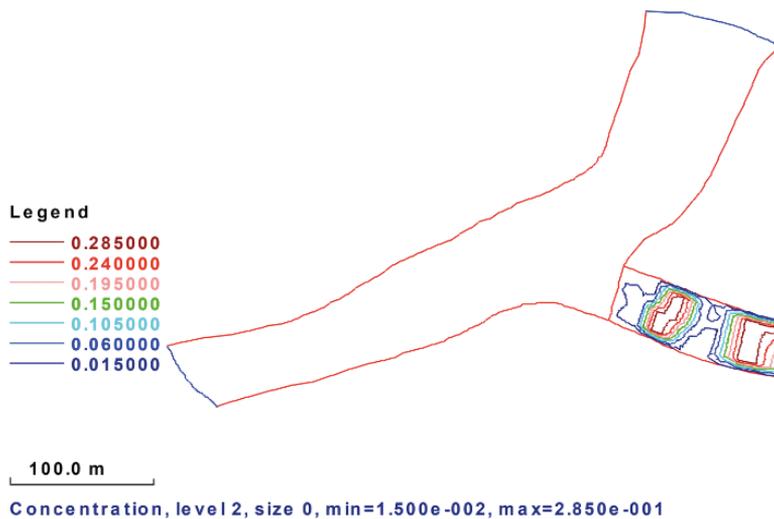


Figura. - 6 Concentraciones de sedimento en el fondo de material grueso.

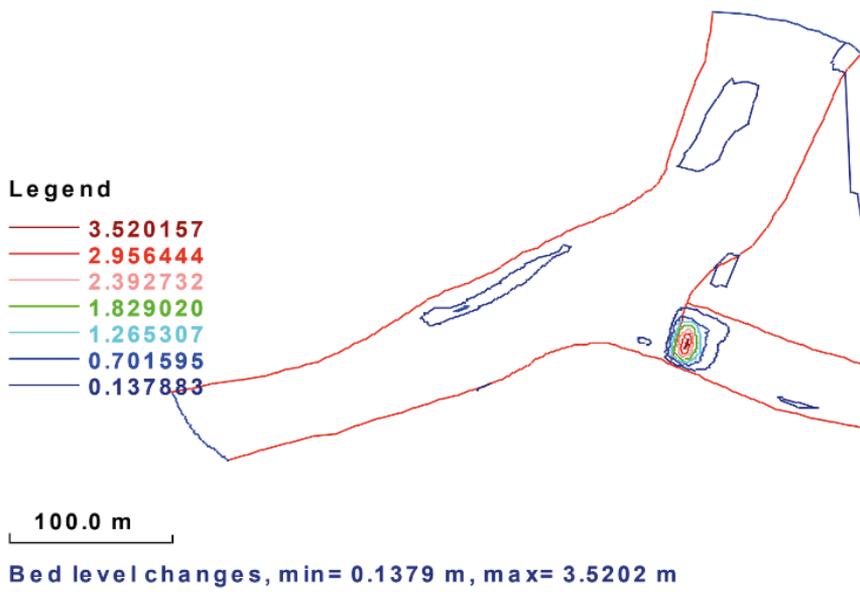


Figura. - 7 Depósito de arena fina.

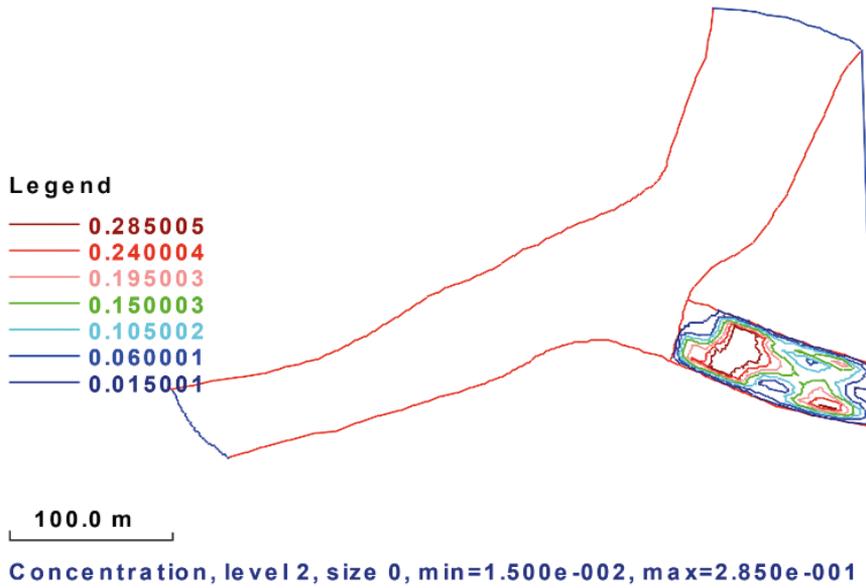


Figura. - 8. Concentraciones de sedimento en el fondo de material fino.

por ejemplo, se recomienda tomas en ángulo recto para ríos cargados de limo. Los modelos físicos y numéricos y la experiencia de campo demuestran que las tomas frontales desvían el mínimo de carga del lecho a los canales. La proporción de carga del lecho en el flujo desviado aumenta a medida que aumenta el ángulo de desviación. La razón es que el menor momento de los flujos cerca del lecho de un canal los hace más fácilmente desviables si se cambia el flujo. En las tomas de crecidas, el ángulo de desviación solo es relevante durante los caudales altos, cuando el agua pasa sobre el vertedero.

CONCLUSIONES

El modelado numérico del flujo 3D y el movimiento de sedimentos en la vecindad de una toma tiene el potencial de hacer predicciones cuantitativas de su desempeño para extraer los sedimentos, sin problemas para representar una amplia gama de tamaños de grano. Una derivación lateral de sedimentos tiene un gran efecto en la distribución del tamaño de los granos de sedimentos transportados en los flujos desviados al canal, y esto puede ser más importante que su efecto en la reducción de las concentraciones generales de sedimentos. Una entrada con un rendimiento de extracción moderado puede extraer todo el material más grueso, de modo que solo el material fino ingrese al canal. Si el canal es capaz de transportar este material fino, la toma evitará lo que de otro modo sería un grave problema de sedimentación. Tales condiciones solo pueden evaluarse con una predicción tamaño por tamaño del sedimento excluyendo el rendimiento. Una segunda ventaja del modelado numérico es que puede ser mucho más económico que construir un modelo físico.

En el trabajo realizado se muestran los resultados de una caracterización del material sólido, en un vertedor de canal lateral de un

río. Tradicionalmente este análisis puede hacerse empleando modelos físicos con las limitaciones que ello implica, (distorsión, el costo económico, etc.). Sin embargo, se muestra en este trabajo que es posible caracterizar el comportamiento del sedimento en un vertedor lateral, empleando la simulación numérica. Sin embargo, tal simulación debe realizarse en un modelo tridimensional para representar correctamente el fenómeno, ya que normalmente los vertedores laterales en ríos se desplantan muy cerca de la superficie del cauce del río principal. Los resultados obtenidos muestran que es posible definir las concentraciones de sedimento para cada diámetro representativo de la curva granulométrica empleada, y aún más, es posible definir los sitios de depósito del material en el fondo del canal de derivación, si este ocurriera.

Ha sido posible simular el comportamiento del sedimento en el prototipo de una derivación lateral, a través de la simulación con un modelo 3D.

Conviene hacer aquí una reflexión sobre el material en suspensión que es de lavado. Este tipo de material es menor que 0.0001mm y generalmente se debe al fenómeno de erosión laminar en las cuencas. Este tipo de material no se deposita fácilmente y normalmente viaja con las avenidas. Debe ser claro que este tipo de sedimento no es el que se trata en este trabajo.

Para lograr un diseño óptimo de un vertedor lateral destinado a la derivación de flujo, es necesario un análisis adicional hacia la elevación apropiada de la cresta. Una mayor diferencia de elevación provocará un mayor costo para construir una cresta más alta de mayor longitud. Se debe diseñar la longitud de la estructura de control de modo que no sea demasiado corta o demasiado larga, ya que una distancia demasiado corta puede hacer que gran parte de los sedimentos

se transporten al canal lateral. El ancho de la cresta se determina considerando el resultado del cálculo del gasto hacia aguas abajo y la capacidad de transporte del canal lateral. El porcentaje del volumen de desviación lateral se puede controlar desde la elevación del aliviadero del canal lateral.

El software SSIIM se puede utilizar como poderosas herramientas para los estudios de viabilidad de proyectos, particularmente la sedimentación en estructuras hidráulicas.

En resumen:

- a) La capacidad de desvío del río depende de la cantidad y el mecanismo del flujo de sedimentos desde aguas arriba y la diferencia de altura de la estructura de control.
- b) El volumen de sedimento desbordado está en función de la granulometría del sedimento transportado.
- c) Los procesos de sedimentación y erosión que ocurren en el río aguas arriba dan efecto al sedimento desbordado ya que afecta el curso y la velocidad del flujo.
- d) El flujo de sedimentos de alta concentración es difícil de estimar mediante un enfoque matemático.

RECOMENDACIONES

De la investigación, hay varias cosas que es necesario tener en cuenta:

- a) Debido a la complejidad problema, se requiere un estudio profundo sobre sedimentos de alta concentración.
- b) Es necesario realizar un estudio sobre la variación de ubicaciones y ángulos de las estructuras para controlar el flujo de sedimento en la dirección deseada.
- c) Se deben realizar más investigaciones de laboratorio incorporando la comparación de datos de campo, a

fin de desarrollar una interpretación o generación de ecuaciones que se pueda utilizar para investigaciones que permitan predecir el volumen sedimentado

d) Los modelos 3D permiten no sólo analizar el flujo de sedimento, sino la mejor orientación y posición de la estructura de derivación.

REFERENCIAS

Chow, V. T. (2000). *“Hidráulica de canales abiertos”*. McGraw Hill. **May RWP, Bromwich B C, Gasowski Y y Rickard C E** (2015). *“Hydraulic design of side weirs: 6. Hydraulic design method”*, H R Wallingford.

Olsen NBR (2011). *“A Three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multi-block option. User’s manual”*, Department of hydraulic and environmental engineering the Norwegian University of science and technology.

Rosier B, Boillat J L y Schleiss A J (2008), *“Outflow angle for side weirs in a channel with mobile bed at flood discharges”*. Interpraevent – conference proceedings, Vol. 1.

Safari A. (2013). *“Analysis of sediment movement in a river diversion system”*, *Civil Engineering Forum, Volume XXII/3, pp 1405-1410.*

Sajedipoor A H, Hedayat N, Mashal M y Nazarzadeh R (2011). *“Comparative Study of Sedimentation in Hydraulic Structures using Sharc and Ssiim Soft Wares - A Case of the Dez and Hamidieh Intake Structures in Iran”*, World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering Vol:5, No:9, 2011.

Sotelo Ávila, G. (2002). *“Hidráulica de canales”*. México: UNAM, Facultad de Ingeniería