

Evaluación de la sedimentación de embalses por medio del modelado matemático de cuencas hidrológicas

Assessment of Reservoir Sedimentation through Mathematical Modeling of Hydrological Basins

Oscar Martín Díaz Meza¹, Josue Aldair Palacios Márquez¹, Cassandra Lizbeth Castillo Maeda¹, Brenda Nayeli Vargas Rosales¹, Jimena Vázquez Cisneros¹, Isacc Reyes Nuñez¹, Ismael Orozco Medina²

¹Licenciatura en Ingeniería Hidráulica, División de Ingenierías del Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

²Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías del Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.
i.orozco@ugto.mx²

Resumen

En México el estudio de la erosión y el transporte de sedimentos de una cuenca hidrológica tiene una alta relevancia al considerar el suelo como un recurso natural no renovable, resulta de vital importancia conservarlo y aprovecharlo de una forma sostenible. En las últimas décadas la vulnerabilidad del suelo ante los procesos de erosión y transporte de sedimentos se ha incrementado producto de los cambios en la hidrodinámica de las cuencas hidrológicas. Lo anterior, producto de los cambios en la cubierta vegetal y los potenciales impactos del cambio climático. Esta nueva hidrodinámica no sólo ha puesto en riesgo al suelo, sino también a las fuentes de abastecimiento superficial al estar expuesta a un mayor volumen de sedimentos que puede reducir su vida y volumen útil. Es por lo anterior, que el presente proyecto tiene como objetivo evaluar el aporte de sedimento en embalses mediante el modelado matemático de los procesos de erosión y transporte de sedimentos.

Palabras clave: Embalses; volumen muerto; erosión y transporte de sedimentos.

Introducción

En México el estudio de la erosión y el transporte de sedimentos de una cuenca hidrológica tiene una alta relevancia al considerar el suelo como un recurso natural no renovable, resulta de vital importancia conservarlo y aprovecharlo de una forma sostenible. En el caso de los embalses de México es un problema cuya solución nos corresponde tanto a la ciencia como a la sociedad, pues reduce el almacenamiento de agua para usos vitales. Al disminuir la capacidad de los embalses se genera menos electricidad y se afecta el aporte hídrico para riego y consumo humano. A medida que los embalses envejecen (la mayoría data de los años 50-60 del siglo XX), el inconveniente se acentúa. Algunos están llenos de sedimentos o, peor aún, de basura. Una vez colmatada la presa es complicado el dragado de los sedimentos, por ejemplo, un vaso de almacenamiento puede tener 60 kilómetros de largo y una cortina (propriadamente la presa) de 100 metros de altura. Si hay cargas de altura de 100 metros no se puede extraer el sedimento y es preciso vaciar vía descargas de fondo, es decir, por aberturas de la presa, aunque después lo complicado es cerrarlas. Con el flushing (una técnica de lavado) es factible arrastrar el material con el líquido fluvial. Un costo excesivo es que se emplea el recurso almacenado y sólo se hace de manera eficiente si los niveles son bajos. En una presa nueva es posible encauzar el sedimento para acercarlo a la cortina y retirarlo. Sin embargo, esta solución no se puede aplicar en embalses de 60 años, como algunos en México. Lo anterior, resalta la gran importancia de diseñar con precisión el volumen de sedimentos para garantizar que la obra hidráulica alcance la vida útil en correcto funcionamiento y garantizar la mitigación de avenidas máximas y el óptimo almacenamiento del volumen útil. En el diseño hidráulico se han venido empleando dos tipos de herramientas. La primera es la empírica, basada en fórmulas clásicas que dan una idea aproximada del problema. Hace 60 años, a partir de su experiencia, los ingenieros las ajustaban para hacer cálculos, que, si bien no deben ser mal juzgados en la actualidad, ya que solían ser las únicas herramientas en aquellos tiempos. La segunda son los modelos numéricos, efectuados vía computadora, con los que, con base en las peculiaridades del flujo, simulan los procesos de erosión y transporte de sedimentos. Con base en lo anterior, este proyecto ha tenido como objetivo evaluar el aporte de sedimento en embalses mediante el modelado matemático de los procesos de erosión y transporte de sedimentos hasta alcanzar una presa.

Metodología

La metodología plantea la combinación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés) y el modelo hidrológico TETIS (Francés et al., 2007). El modelo TETIS es un modelo distribuido desarrollado por el Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA) del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Es capaz de modelar la componente hidrológica y sedimentológica de un sistema hidrológico superficial (Busi, 2014). La metodología propuesta plantea una serie de pasos a desarrollar y que se pueden agrupar en cuatro etapas (Figura 1). En la primera etapa se ha obtenido todos los datos de precipitación, edafología, cubierta vegetal y uso de suelo, porcentajes de limos, arcillas y arenas, los caudales del cauce principal, las elevaciones del terreno, entre otros. Una vez recolectados estos datos (con los que va a construir el modelo TETIS), se ha realizado la calibración del modelo con los datos de caudal del cauce principal para que este se ajuste lo mejor posible a las características de la cuenca, esta calibración consiste en modificar nueve factores correctores de ciertas características, como la escorrentía directa, el flujo subsuperficial, la percolación, etc (Orozco et al., 2020). Una vez calibrada la componente hidrológica del modelos TETIS, se ha procedido a calibrar el submodelo de sedimentos, en el cual se modifican los factores correctores de tres parámetros que son: la capacidad de transporte de cárcavas, de cauce y de ladera. Por último, se realizará un análisis de los resultados obtenidos para saber la situación actual de los vasos.

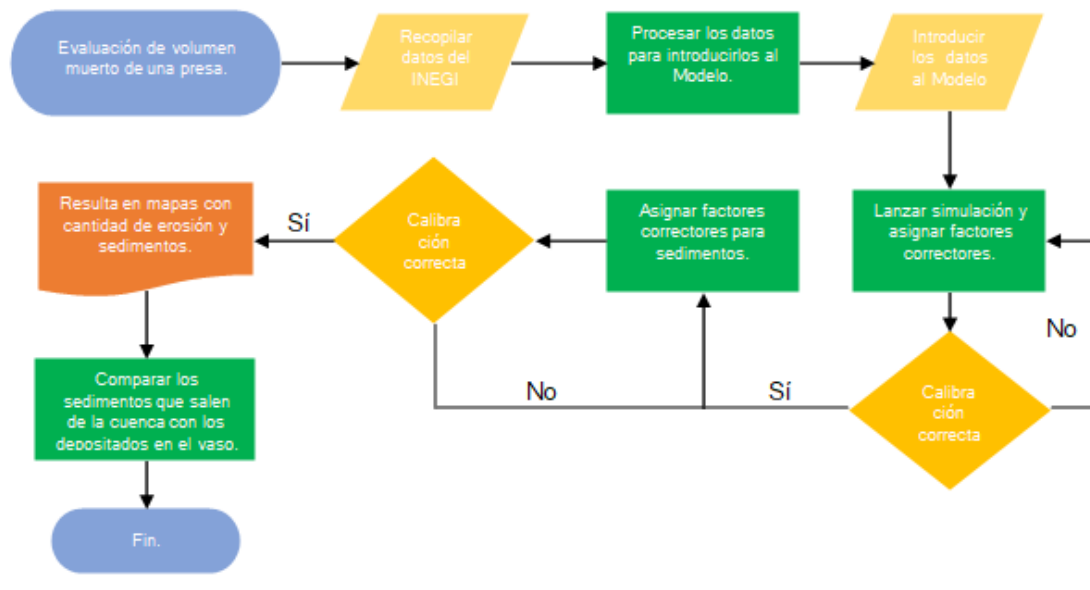


Figura 1. Diagrama de flujo de los pasos a desarrollo en la metodología propuesta.

Caso de estudio

La cuenca de aportación de la presa Solís tiene un área de 8,535 km². En dicha cuenca se encuentra aguas arriba la presa de Tepuxtepec que regula las descargas hacia la presa Solís y que tiene un área de aportación de 5,643 Km² (Figura 2). En el área de estudio se ubica la estación hidrométrica El Gigante, cuyos datos de caudales se han usado en la calibración del modelo hidrológico y el sedimentológico (clave 12649). Los caudales son datos diarios obtenidos del Banco Nacional de Datos Superficiales de la Comisión Nacional del Agua (BANDAS-CONAGUA). Asimismo, se ha contado con datos diarios de precipitación, evaporación, temperatura máxima y mínima de 21 estaciones meteorológicas (Figura 2).

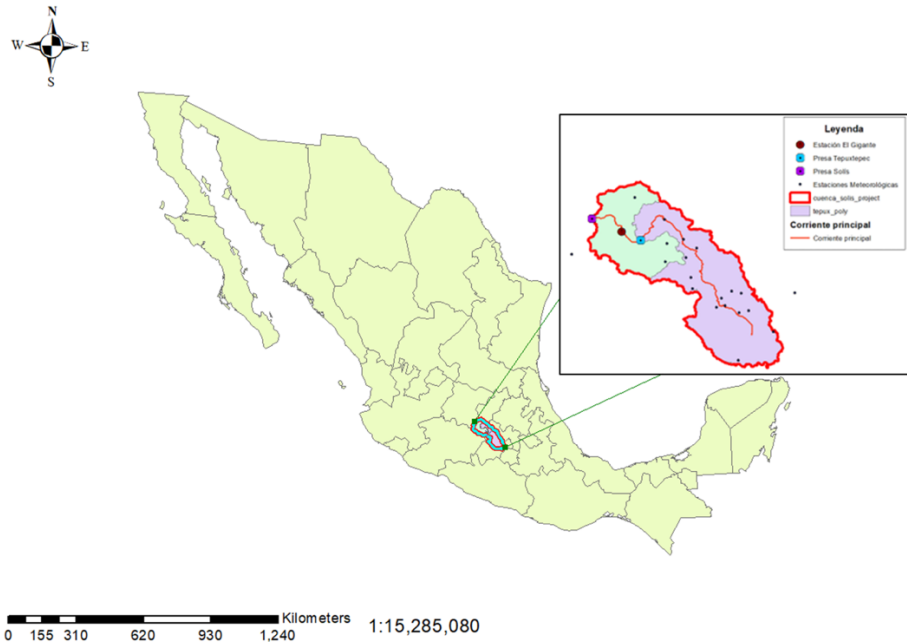


Figura 2. Ubicación de la cuenca de aportación de la presa Solís seleccionada como caso de estudio.

Resultados

Calibración hidrológica

La calibración de la componente hidrológica del modelo TETIS se ha realizado con datos diarios de caudales observados en la estación El Gigante, ubicada aguas arriba de la presa Solís (Figura 1). El periodo seleccionado para realizar la calibración del modelo hidrológico ha comprendido del 1 de enero de 2006 al 31 de diciembre de 2008. La calibración inicialmente se ha realizado de forma manual y posteriormente de forma automática usando el algoritmo Shuffled Complex Evolution desarrollado en la Universidad de Arizona (SCE-UA) (Eckhardt et al., 2001). Empleando como función objetivo el índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, por sus siglas en inglés). Donde el NSE define eficiencias de 0 a 1 (un ajuste perfecto sugiere un valor igual a 1). El valor de NSE obtenido en la calibración del modelo TETIS ha sido de 0.93 (Figura 3).

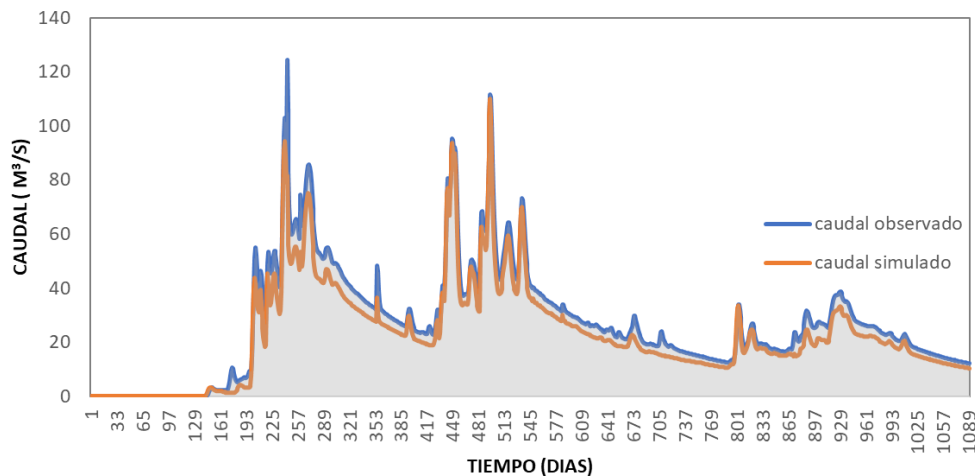


Figura 3. Resultados obtenidos en la calibración del modelo hidrológico distribuido TETIS.

Calibración sedimentológica

Para hacer una correcta calibración del submodelo sedimentológico es necesario contar con series históricas de caudales bifásicos de cada estación hidrométrica dentro de la cuenca, desafortunadamente sólo se ha contado con caudales líquidos para el modelado sedimentológico. Es por ello, que el modelo se ha calibrado usando datos de erosión y transporte de sedimentos indirectos generados usando la ecuación de la USLE (Ramos, 2020) y coeficiente de entrega de sedimentos (CES) (Bodoque et al., 2001). El CES obtenido para la cuenca de estudio ha sido de 7.03% y el transporte de sedimentos que se obtiene con el submodelo sedimentológico calibrado es de 6.92%. En la figura 4 se puede observar el modelado del transporte obtenido para el periodo de calibración según el tipo de textura presente en la cuenca.

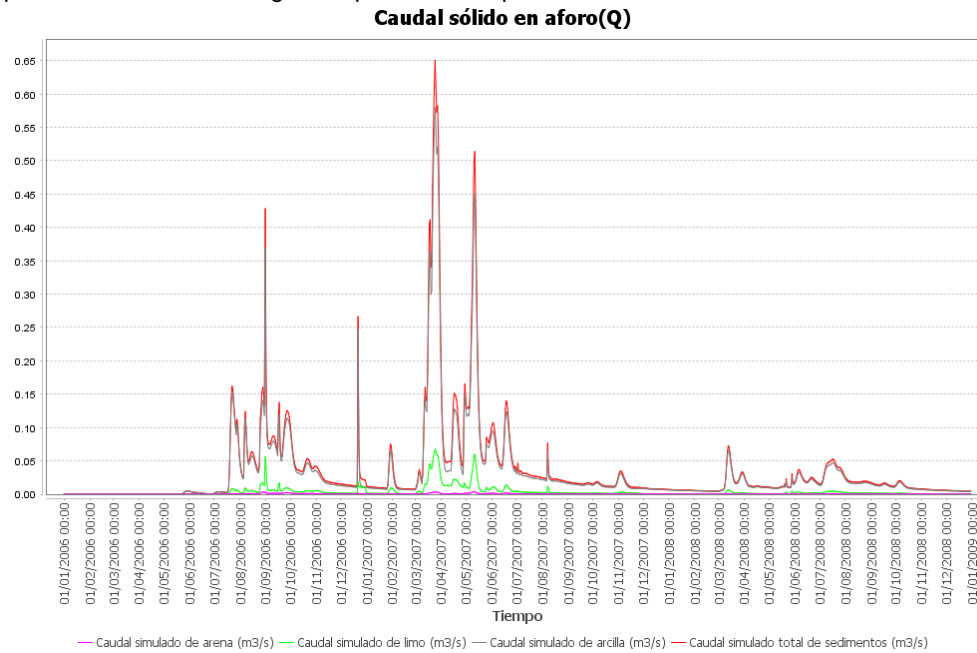


Figura 1. Modelado del transporte de sedimentos con TETIS en el periodo de calibración (2006-2008).

Aportaciones de sedimentos en el embalse

Dado que el modelo TETIS tiene una mejor aproximación en la cuantificación de la erosión y el transporte de sedimentos, se ha procedido a estimar el aporte de sedimentos en la presa Solís y Tepuxtepec en el periodo de calibración. Con base en los resultados del modelado hidrológico y sedimentológico realizado con TETIS, se puede observar en la tabla 1 que la presa que más retiene sedimentos es la Tepuxtepec, esto por estar aguas arriba del vaso de almacenamiento de la presa Solís. Específicamente, se puede observar que la presa Tepuxtepec controla y disminuye el transporte de sedimentos que llega a la presa Solís.

Tabla 1. Eficiencia de atrape de la presa Solís y Tepuxtepec.

Material	Sedimentos almacenados (m³)		Suspendidos (m³)
	Tepuxtepec	Solís	
Arena	67,984	46,085	0
Limo	679,466	381,448	0
Arcilla	4,365,375	3,288,665	
Total	5,112,826	3,716,199	4,233.31
Eficiencia	57.88%	42.07%	0.05%

Por último, se ha evaluado el porcentaje del volumen de azolves de cada uno de los embalses durante los tres años de calibración (Tabla 2).

Tabla 2. Evaluación del volumen de azolve de la presa Solís y Tepuxtepec.

Volúmenes	Tepuxtepec	Solís
Sedimentos almacenados (hm ³)	5.11	3.72
Volumen de azolves (hm ³)	25.05	55
Volumen total del vaso (hm ³)	384.33	785.54
Volumen de azolves consumido %	20.4%	6.8%
Volumen total consumido %	1.3%	0.5%

Conclusiones

La metodología implementada ha permitido evaluar la erosión y el transporte de sedimentos mostrando que, para las condiciones actuales de la cuenca y los eventos de precipitación usados, la presa Tepuxtepec desempeña un papel vital conteniendo una gran cantidad de sedimentos que estarían llegando a la presa Solís poniendo en riesgo su vida útil.

Agradecimientos

A la Universidad de Guanajuato y a la XXVIII edición de Verano de la Ciencia por el apoyo brindado en la ejecución del proyecto.

Bibliografía/Referencias

- Francés, F., Vélez, J. I., y Vélez J. J. (2007). "Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models", *Journal of Hydrology*, 332(1), pp. 226-240.
- Bussi, G. (2014). *Implementación de un Modelo Distribuido de Sedimentos en Diferentes Escenarios de Disponibilidad de Datos*, tesis de doctorado, Valencia: Universitat Politècnica de Valencia, 2014.
- Orozco, I., Martínez, A., y Ortega, V. (2020). "Assessment of the Water, Environmental, Economic and Social Vulnerability of a Watershed to the Potential Effects of Climate Change and Land Use Change", *Water*, 12, pp. 1-23.
- Eckhardt, K., y Arnold, J.G. (2001). "Automatic calibration of a distributed catchment model", *Journal of Hydrology*, 251(1), pp. 103-109.
- Ramos, L. (2020). *Modelado de la Producción de Sedimentos en una Cuenca con Poca Información Incluyendo los Potenciales Efectos del Cambio Climático y el Cambio de Uso de Suelo*, tesis de licenciatura, Guanajuato: Universidad de Guanajuato.
- Bodoque, J., Pedraza, J., Martín-Duque, J., Sanz, M., Carrasco, R., Díez, A., y Mattered, M. (2001). "Evaluación de la Degradación Específica en la Cuenca Vertiente al Embalse de Puente Alta (Segovia) Mediante Métodos de Estimación Directos e Indirectos", *C. & G.*, 15 (3-4), pp. 21-36.