

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

Sediment production modelling in a basin with little information including the potential effects of climate change and land use change

Luis Alberto Ramos Castillo¹, Ismael Orozco Medina^{2*}

¹Facultad de Ingeniería Hidráulica, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. Av. Juárez No. 77, Zona Centro, Guanajuato, Gto., México. C.P. 36000. alb_castillo@hotmail.com

²Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. Av. Juárez No. 77, Zona Centro, Guanajuato, Gto., México. C.P. 36000. i.orozco@ugto.mx
Autor de correspondencia

Resumen

Ante los potenciales efectos del cambio climático y el cambio de uso de suelo, resulta trascendental evaluar los procesos de erosión y de transporte de sedimentos en condiciones actuales y futuras. Sin embargo, evaluar correctamente estos procesos no es una tarea sencilla debido a que en la mayoría de los casos no se cuenta con información observada de sedimentos para la calibración y validación de modelos matemáticos. Por ello, esta investigación plantea una alternativa metodológica para el modelado de estos procesos en cuencas sin información, incluyendo los efectos del cambio climático y cambio de uso de suelo. Los resultados obtenidos pronostican en el futuro cercano un aumento de los caudales (hasta $1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) así como reducciones en el transporte de sedimentos ($0.0003 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) y en la erosión (5%), respecto de la registrada actualmente en la subcuenca del río Turbio.

Palabras clave: Erosión; transporte de sedimentos; modelado hidrológico; cambio climático; cambio de uso de suelo.

Abstract

The potential effects of climate change and land use change make it essential to assess the processes of erosion and sediment transport in current and future situations. However, evaluating these processes correctly is not easy, because there is no information for the calibration and validation of mathematical models. This research proposes a methodological alternative for the calibration of a sedimentological model in basins without information and for modeling these processes, including the effects of climate change and land use change. The results foresee an increase in runoff (up to $1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) in the future as well as reductions in the transport of sediments ($0.0003 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) and erosion (5%), compared to the current one in the Turbio river sub-basin.

Keywords: Erosion; sediment transport; hydrological modeling; climate change; land use change.

Recibido: 12 de mayo de 2020

Aceptado: 29 de julio de 2020

Publicado: 02 de septiembre de 2020

Como citar: Ramos Castillo, L. A., & Orozco Medina, I. (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. *Acta Universitaria* 30, e2901. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2020.2901>

Introducción

Ante los potenciales efectos del cambio climático y el cambio de uso de suelo en una cuenca, resulta trascendental evaluar la erosión y el transporte de sedimentos en condiciones actuales y futuras (O'Neal, Nearing, Vining, Southworth & Pfeifer, 2005), ya que el suelo es un recurso natural no renovable que tiene que ser preservado y aprovechado de una forma sostenible (Montanarella & Vargas, 2012). Sin embargo, la erosión hídrica se ha convertido en una de las mayores amenazas globales para el medio ambiente (Zhang, Zhang, Peng & Yang, 2003), dado que el estado del suelo (Ebeid, Lal, Hall & Miller, 1995), la calidad del agua (Borselli, Torri, Poesen & Sanchis, 2001), los hábitats de las especies (Ernst, Linsenmair & Rödel, 2006) y la provisión de servicios ecosistémicos se ven afectados negativamente (Bangash *et al.*, 2013). En la actualidad, evaluar correctamente estos procesos sigue siendo una tarea complicada, debido a que en la mayoría de los casos no se cuenta con información observada de sedimentos (Wilkinson, Prosser, Rustomji & Read, 2009). En el caso específico de México, el monitoreo de sedimentos sobre los cauces y volúmenes de azolve en los vasos es escaso y difícilmente se puede acceder a dicha información. Esto último ha condicionado a que se usen con mucha frecuencia las formulaciones empíricas desarrolladas experimentalmente en décadas pasadas que solo permiten calcular la erosión o el aporte de sedimentos (Cohen, Shepherd & Walsh, 2005). A excepción de la ecuación universal de pérdidas del suelo (USLE, por sus siglas en inglés), el resto de las formulaciones no consideran variables y características morfológicas esenciales en los procesos de erosión y transporte de sedimentos de un sistema hidrológico (Chuenchum, Xu & Tang, 2019). Las generalizaciones de estas formulaciones muestran una tendencia hacia la sobreestimación de los procesos (Cohen *et al.*, 2005), por lo cual se deberá tener prudencia en el uso de sus resultados, más aun si se trata del diseño de obras hidráulicas importantes como las presas (Adeogun, Ibitoye, Salami & Ighagh, 2020).

En este mismo contexto, el uso de conceptualizaciones más completas, como son los modelos matemáticos, se ha visto limitado al no existir información observada de sedimentos para su calibración (Batista, Davies, Silva & Quinton, 2019). Según Batista *et al.* (2019), entre las múltiples ventajas de estos modelos sobre las formulaciones empíricas se encuentra que permiten una cuantificación más precisa de la erosión y el transporte de sedimento, considerando las variables y la morfología del sistema real. Además, permiten considerar el sistema de una forma dinámica, incluyendo los futuros efectos del cambio climático, por ejemplo en las características de la lluvia (cantidad de lluvia, intensidad y distribución espacio-temporal) que afectan directamente la erosión del suelo (Bussi, Francés, Horel, López-Tarazón & Batalla, 2014; Chuenchum *et al.*, 2019; Li & Fang, 2016). Asimismo, permiten considerar los cambios de la cubierta vegetal y el uso de suelo, como la deforestación para uso agrícola, el abandono de cultivos, etc., que agravan las consecuencias de los efectos del cambio climático y tienen un efecto directo sobre la erosión y el transporte de sedimentos (Nikolic *et al.*, 2018). Cuando se retira la capa de vegetación que cubre una zona, el suelo queda más expuesto a la erosión por viento o escorrentía (Zhang, Fan & Zhang, 2016). Las capas superficiales se pierden poco a poco, llegando a quedar expuesta la capa de roca si no se pone remedio (Zhang *et al.*, 2016).

Con base en lo anterior, esta investigación plantea una alternativa metodológica para la calibración de un modelo matemático sedimentológico en cuencas sin información y realizar el modelado de estos procesos, incluyendo los efectos del cambio climático y cambio de uso de suelo, bajo la hipótesis que, a pesar de que un modelo matemático sea calibrado con información indirecta, puede proporcionar mejores resultados que las conceptualizaciones empíricas existentes.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio seleccionada para esta investigación es una subcuenca del río Turbio, ubicada al suroeste del estado de Guanajuato y al noreste del estado de Jalisco, México (figura 1). Esta tiene un área de 2983 km², con un 79% en el estado de Guanajuato y un 21% en el estado de Jalisco. La subcuenca, a su vez, pertenece a la región hidrológica número 12 del Lerma Santiago.

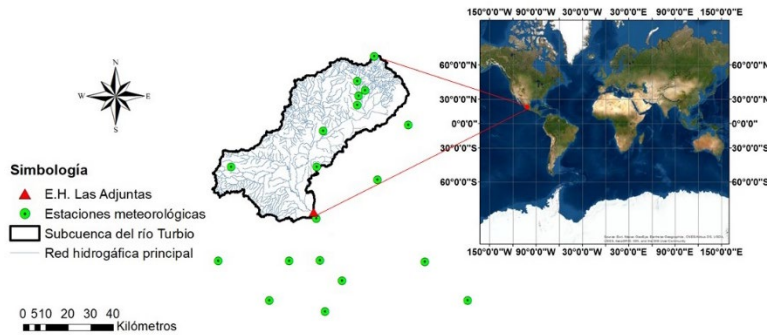


Figura 1. Ubicación de la subcuenca del río Turbio y las estaciones hidrometeorológicas usadas en el modelado hidrológico y sedimentológico.
Fuente: Elaboración propia.

La precipitación acumulada media anual en la subcuenca varía de 560 mm a 807 mm, según los datos diarios de precipitación usados de las estaciones climatológicas para el periodo del 2000 al 2014 (figura 1). La subcuenca se encuentra en una zona con eventos máximos de hasta 73.2 mm de precipitación en 24 horas, que han generado inundaciones como las ocurridas en los años 2003 y 2007. Asimismo, se han presentado períodos de sequía como los registrados en los años 2000, 2005, 2009 y 2011.

Agregado a lo anterior, la subcuenca está sometida a los efectos de la actividad antropogénica, como por ejemplo la industria, la deforestación, grandes urbanizaciones (ciudad de León) y la agricultura. Esta última tiene un papel protagónico, ocupando un 53% del área de la subcuenca para la producción de granos, forrajes, hortalizas y especias (figura 2). Por esto, y dada la importancia de la subcuenca, resulta de gran trascendencia evaluar en la subcuenca del río Turbio los potenciales efectos del cambio climático y el cambio de uso de suelo sobre la erosión hídrica y la producción de sedimentos del sistema.

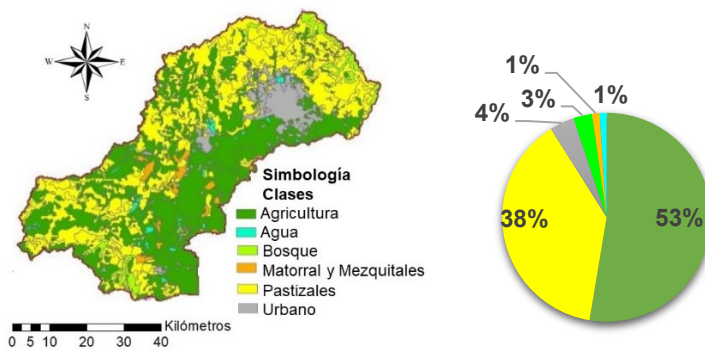


Figura 2. Porcentaje de ocupación del uso de suelo y cubierta vegetal del año 2016 en la subcuenca del río Turbio.
Fuente: Elaboración propia.

Metodología

La metodología propuesta ha sido diseñada con la finalidad de ser una alternativa en el modelado hidrológico y sedimentológico de sistemas hidrológicos con escasa información. La metodología considera el uso del modelo hidrológico distribuido TETIS y su submodelo sedimentológico. Adicionalmente, considera los modelos globales del clima del Proyecto Inter-Comparación de Modelos Acoplados fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés), los escenarios de cambio climático del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y el *software* Terrset®, usados en la creación de escenarios de variables climatológicas y cambio de uso de suelo para el año 2035. En la figura 3 se presenta el esquema conceptual de la metodología.

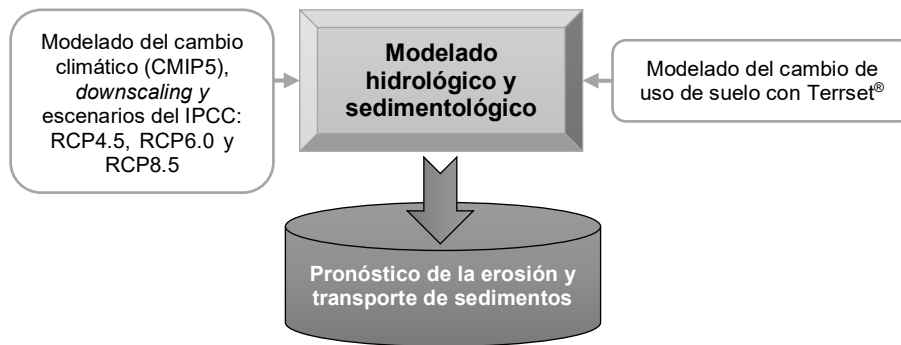


Figura 3. Esquema conceptual de la metodología propuesta para el modelado hidrológico y sedimentológico.
Fuente: Elaboración propia.

Un punto relevante de esta metodología es que propone usar la USLE y el coeficiente de entrega de sedimentos (CES) para la calibración del submodelo sedimentológico de TETIS. Las conceptualizaciones y herramientas se detallan con más precisión en los siguientes apartados.

La información usada en el modelado hidrológico y sedimentológico de la subcuenca del río Turbio ha consistido en datos diarios de precipitación, evaporación y temperatura obtenidos de 18 estaciones climatológicas que opera el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de México (figura 1), de las cuales 15 estaciones se ubican en el estado de Guanajuato, dos en Jalisco y una en Michoacán. Asimismo, se han usado caudales observados diarios obtenidos de la estación hidrométrica Las Adjuntas (figura 1). Se decidió realizar el modelado hasta Las Adjuntas (Latitud: 20.675633; Longitud: -101.844361) dado que es la única estación con datos históricos suficientes para poder llevar a cabo la investigación. Finalmente, se ha usado información geográfica obtenida del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (figura 4 y tabla 1), además de un modelo digital de elevación (DEM, por sus siglas en inglés) obtenido del Servicio Geológico de los Estados Unidos (figura 4 y tabla 1).

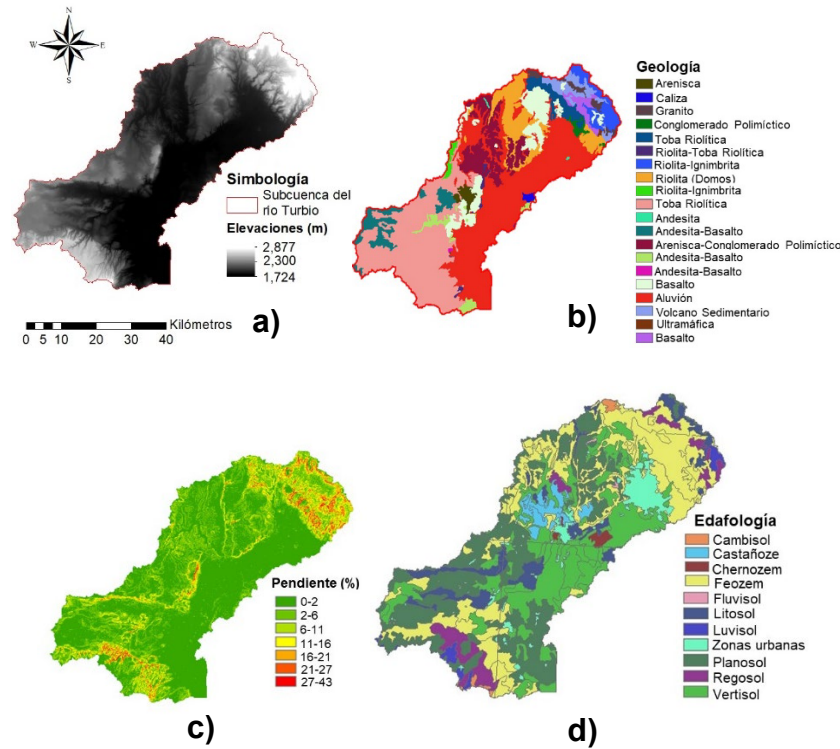


Figura 4. a) Modelo digital de elevaciones; b) geología; c) pendiente; d) edafología presente en la subcuenca del río Turbio.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Información usada en la construcción del modelo TETIS y el modelado hidrológico y sedimentológico.

Información y datos	Formato	Escala	
		Temporal	Espacial
Modelo Digital de Elevaciones	Ráster		30 m
Edafología	Vectorial		1:250 000
Uso de suelo y cubierta vegetal	Vectorial		1:250 000
Geología	Vectorial		1:250 000
Imágenes de satélite	Landsat 8		30 m
Precipitación	Ascii	Diaria	
Temperatura (máx. y mín.)	Ascii	Diaria	
Caudal	Ascii	Diaria	
Tasas de evaporación	Ascii	Diaria	

Fuente: Elaboración propia.

Modelo hidrológico TETIS

El TETIS es un modelo hidrológico distribuido, desarrollado por el Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida (GIMHA) del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universitat Politècnica de València. Se trata de un *software* de descarga libre a través del portal http://lluvia.dihma.upv.es/index_es.html Es un modelo distribuido con parámetros físicamente basados, que simula la producción de escorrentía a través de una conceptualización de tanques (figura 5a) (Francés, Vélez & Vélez, 2007). El modelo TETIS tiene integrado un submodelo sedimentológico cuya conceptualización se basa en la formulación del modelo CASC2D-SED (Rojas, 2002). El submodelo simula en dos dimensiones la producción de sedimentos en la ladera, mientras que en las cárcavas y los canales la simulación es unidimensional (figura 5b y 5c).

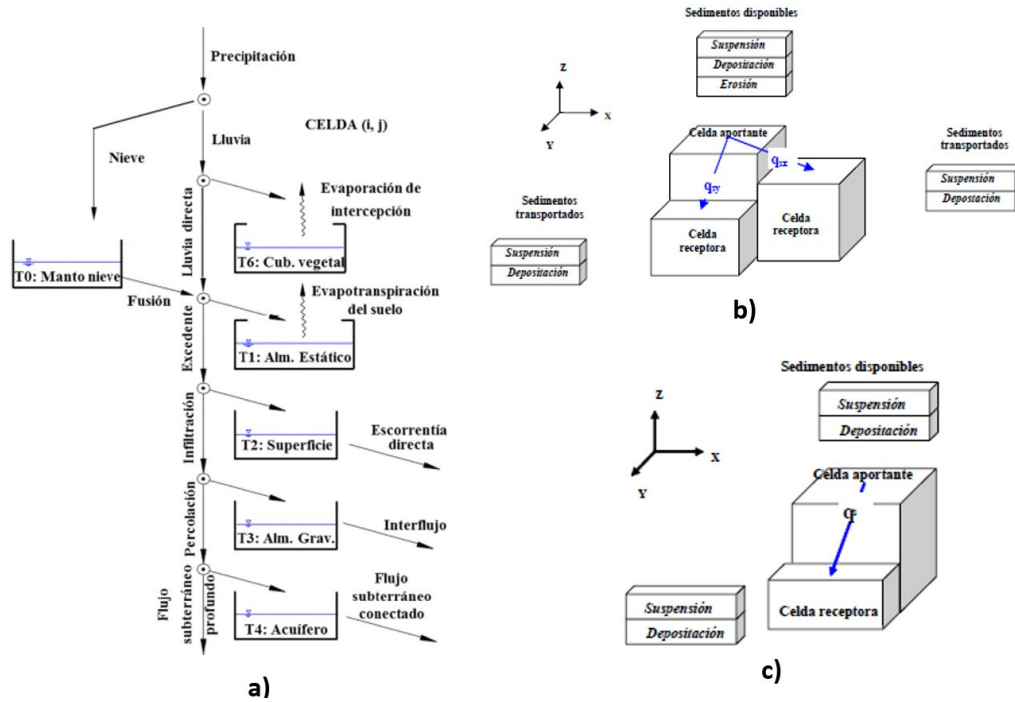


Figura 5. a) Esquema conceptual del movimiento vertical de los flujos del modelo TETIS; b) y c) esquema del transporte de sedimentos en ladera y en canales del submodelo sedimentológico.
Fuente: Francés *et al.* (2007) y Bussi (2014).

El submodelo sedimentológico de TETIS utiliza en la estimación de la capacidad del transporte en zonas de ladera (Q_h) la ecuación de Kilinc y Richardson, modificada por Bussi (2014). Según Bussi (2014), la Ecuación 1 depende del caudal, la pendiente del terreno, el tipo de suelo y los usos de la tierra.

$$Q_{h(i)} = \frac{1}{\gamma_s} W \alpha S_o^{1.66} \left(\frac{Q}{W} \right)^{2.035} \frac{K}{0.15} CP \quad [m^3 s^{-1}] \quad \text{Ec. 1}$$

Donde γ_s es el peso específico de los sedimentos (tonsm^{-3}), α es un parámetro adimensional y empírico que define la capacidad de transporte en laderas, obtenido a través del proceso de calibración, Q es el caudal unitario de agua (m^3s^{-1}), W es la unidad de ancho (m) y S_o es la pendiente del terreno (m). Los parámetros que utiliza la USLE son el factor de erosionabilidad del suelo (K), el factor de cultivo (C) y el factor de prácticas de conservación (P).

El submodelo sedimentológico usa para el transporte de los sedimentos en cárcavas y cauces la ecuación de Engelund y Hansen (GIMHA, 2014). Según Bussi (2014), la ecuación de Engelund y Hansen aplica el concepto de potencia de corriente de Bagnold y el principio de similitud para obtener la concentración de sedimentos por peso ($C_{w(i)}$) a través de la ecuación siguiente:

$$C_{w(i)} = \beta \left(\frac{G}{G-1} \right) \frac{VS_f}{\sqrt{(G-1)gd_i}} \sqrt{\frac{R_h S_f}{(G-1)d_i}} \quad [tons m^{-3}] \quad \text{Ec. 2}$$

donde G es la gravedad específica de los sedimentos, V es la velocidad promedio del canal (m s^{-1}), S_f es el ángulo de fricción del canal (mm^{-1}), g es la aceleración de la gravedad ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), d_i es el diámetro de la

fracción de tamaño i (m), R_h es el radio hidráulico del canal (m) y β es un parámetro adimensional que define la capacidad de transporte en cárcavas (β_1) y cauces (β_2), obtenido a través del proceso de calibración.

Calibración de los modelos

El modelo hidrológico TETIS utiliza nueve parámetros iniciales determinados combinando información geográfica y alfanumérica. Los nueve parámetros son: almacenamiento estático, índice de cobertura vegetal, capacidad de infiltración, velocidad de la escorrentía directa, capacidad de percolación, interflujo, flujo subterráneo profundo, flujo base y velocidad en la red fluvial (Orozco, Martínez & Ortega, 2020). Estos nueve parámetros han sido calibrados de forma manual y automática a través de factores correctores (FC) (Orozco, Francés & Mora, 2019; Orozco, Ramírez & Francés, 2018; Orozco *et al.*, 2020). La calibración automática se ha realizado usando el algoritmo de optimización *Shuffled Complex Evolution* de la Universidad de Arizona (SCE-UA) propuesto por Duan, Sorooshian & Gupta (1992), y se ha empleado como función objetivo el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, por sus siglas en inglés), el cual es el más usado en la calibración de modelos hidrológicos y emplea la ecuación siguiente:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_m)^2} \quad \text{Ec. 3}$$

donde Q_{obs} es el caudal observado ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), Q_{sim} es el caudal simulado ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) y Q_m es el caudal medio observado ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

El submodelo sedimentológico utiliza de forma distribuida los parámetros K , C , P y los porcentajes de arena, limo y arcilla (Bussi, 2014). En la figura 6 se presentan los parámetros obtenidos para el submodelo sedimentológico, estimados usando información geográfica e imágenes de satélite.

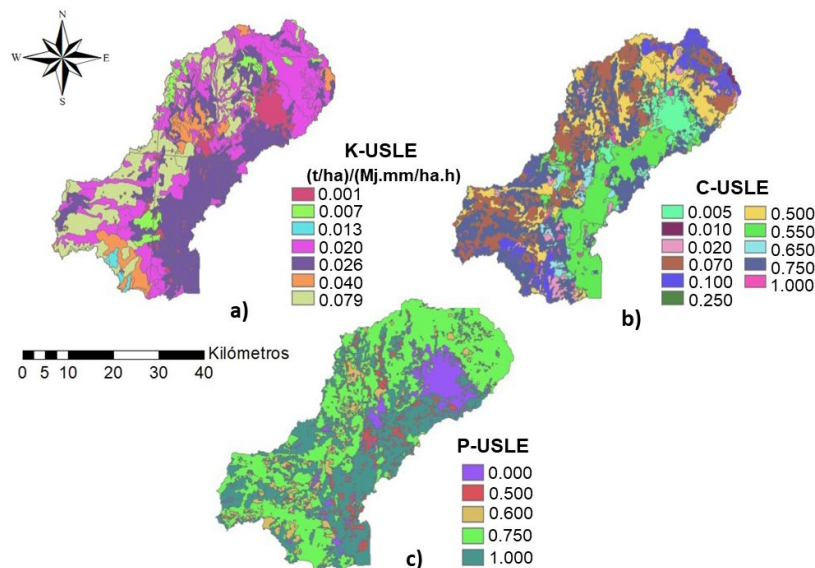


Figura 6. a) factor de erosionabilidad del suelo; b) factor de cultivo; c) factor de prácticas de conservación.
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con Bussi (2014), estos parámetros introducen una elevada incertidumbre en la simulación de los procesos de producción y transporte de sedimentos. Es por ello que a través de los parámetros α y β introducidos en la Ecuación 1 y Ecuación 2 se realiza una corrección mediante la

calibración manual o automática. En la conceptualización del submodelo sedimentológico α y β son denominados FC (tabla 2).

Tabla 2. Factores correctores usados en la calibración del submodelo sedimentológico.

Proceso inicial	FC	Proceso calibrado (*)
Capacidad de transporte en laderas (adimensional)	α	$Q_{h(i)}^* = \alpha \cdot Q_{h(i)}$
Capacidad de transporte en cárcavas y cauces (adimensional)	β_1 y β_2	$C_{w(i)}^* = \beta_{1,2} \cdot C_{w(i)}$

Fuente: Elaboración propia.

Según Bussi et al. (2014), el submodelo sedimentológico puede ser calibrado usando datos de descarga observada que ingresa a un embalse. Sin embargo, en la mayoría de los casos no se cuenta con esta información. Es por ello que en este trabajo se propone calibrar el submodelo sedimentológico usando la ecuación de la USLE y el CES. La USLE utiliza, al igual que el submodelo sedimentológico de TETIS, los parámetros K , C , P y emplea la Ecuación 4 en el cálculo de la pérdida de suelo (A) de una cuenca:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad [\text{tons } m^{-1} \text{ s}^{-1}] \quad \text{Ec. 4}$$

donde R es el factor de erosividad de la lluvia ($MJ \text{ mm } ha^{-1} h^{-1} \text{ año}^{-1}$), L es el factor de longitud de la pendiente (adimensional) y S es el factor de grado de pendiente (adimensional). Los factores R y el producto de los factores LS estimados con información geográfica e imágenes de satélite se presentan en la figura 7.

A diferencia de otros trabajos, en esta investigación A es cuantificada de forma distribuida utilizando la Ecuación 4 (figura 10).

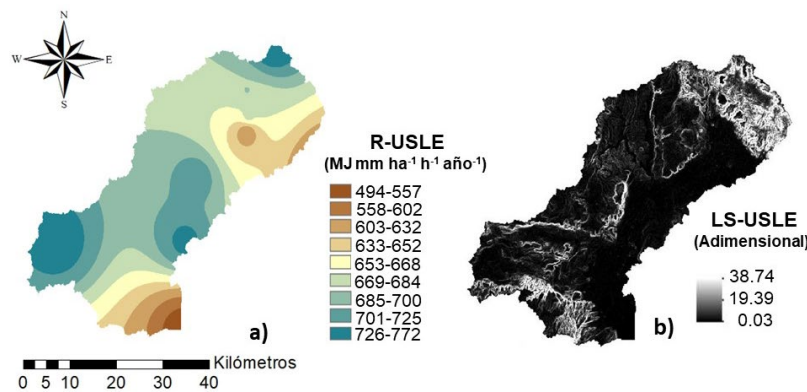


Figura 7. a) factor de erosividad de la lluvia; b) producto de los factores de longitud de la pendiente y el grado de pendiente.
Fuente: Elaboración propia.

En el caso del transporte de sedimentos en la desembocadura de la subcuenca se ha usado el CES (Bodoque et al., 2001). El CES es el porcentaje de material erodado que sale de la cuenca y es calculado utilizando la ecuación siguiente:

$$CES = 36Area^{-0.2} - \frac{2}{\log P} + \log BR \quad [\%] \quad \text{Ec. 5}$$

donde P es la pendiente del cauce principal (%) y BR es el coeficiente de bifurcación de la red hidrográfica. En la Ecuación 5 el área de la cuenca se introduce en km^2 .

Cambio climático y cambio de uso de suelo

La metodología propuesta considera el uso de los modelos globales del clima del CMIP5, los escenarios RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 del IPCC y el *software* Terrset® para generar los pronósticos de las variaciones de precipitación, temperatura y uso de suelo para el año 2035. Lo anterior, al considerar que estas herramientas han sido ampliamente utilizadas desde finales de los ochenta en el pronóstico de los efectos del cambio climático (Giorgetta *et al.*, 2013). Se seleccionaron los escenarios RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 por representar los forzamientos radiactivos más drásticos y, a su vez, las mayores variaciones en las precipitaciones y las temperaturas.

Un dato relevante es que el CMIP5 considera en los pronósticos las predicciones de 18 modelos globales del clima (Neelin, Langenbrunner, Meyerson, Hall & Berg, 2013). Se implementó la técnica *downscaling* para la generación de los resultados a escala de cuenca. Los resultados se trabajaron como anomalías para los tres escenarios del IPCC (figura 8a y tabla 3). En el caso del escenario de cambio de cubierta vegetal y uso de suelo se empleó el *software* Terrset®, utilizando como insumos la información de cubierta vegetal y uso de suelo del año 1997 y 2016 para obtener el escenario en el año 2035 (figura 8b). Los pronósticos en Terrset® para años superiores al 2035 presentaron inconsistencias en la ocupación; por ejemplo, se observó una disminución de los núcleos urbanos y la ocupación de estas zonas por la clase agricultura (Orozco *et al.*, 2020). Esta inconsistencia generó incertidumbre sobre la exactitud de las proyecciones y la decisión de solo realizar el modelado al año 2035.

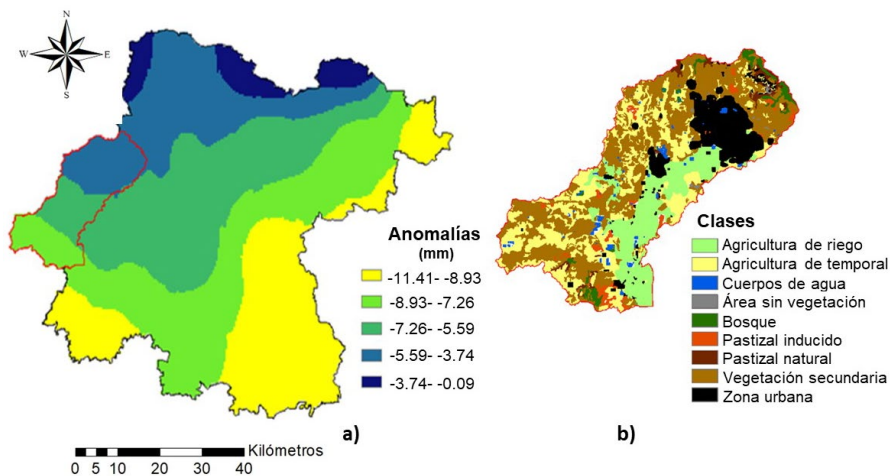


Figura 8. a) ejemplo de anomalías del mes de julio para el escenario RCP8.5; b) escenario de uso de suelo y cubierta vegetal para el año 2035, introducidas al modelo TETIS.
Fuente: Elaboración propia.

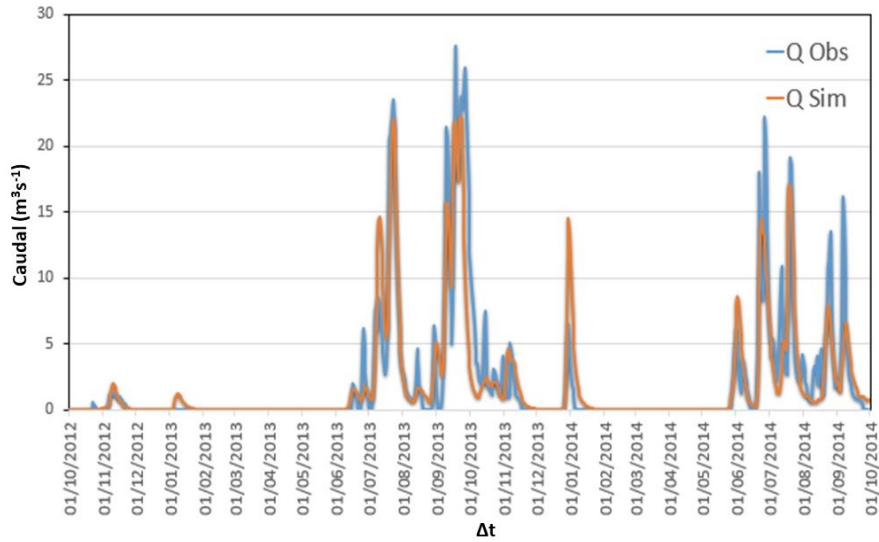


Figura 9. Modelado de los caudales observados obtenido con la calibración automática (Qobs: caudal observado; Qsim: caudal simulado).
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Precipitación proyectada con las anomalías mensuales y su disminución respecto a la precipitación de la serie histórica (1982-2014).

Escenarios de cambio climático	Años	Pronóstico de precipitación* CMIP5 (mm)	Precipitación* observada (mm)	Variación de precipitación (mm)
RCP4.5	2015-2039	620.4	656.4	-36.1
RCP6.0	2015-2039	621.1	656.4	-35.4
RCP8.5	2015-2039	623.8	656.4	-32.6

*Precipitación acumulada media anual.

Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

La calibración del modelo hidrológico ha alcanzado una eficiencia de 0.75 de NSE en la reproducción de los caudales observados en la estación Las Adjuntas (figura 9). Se seleccionó el periodo del 01 de octubre de 2012 al 30 de septiembre de 2014, al representar el patrón de lluvias más frecuente en la subcuenca del río Turbio. Asimismo, se utilizaron solo dos años hidrológicos con la finalidad de reducir el tiempo de cómputo de la calibración automática con el algoritmo SCE-UA.

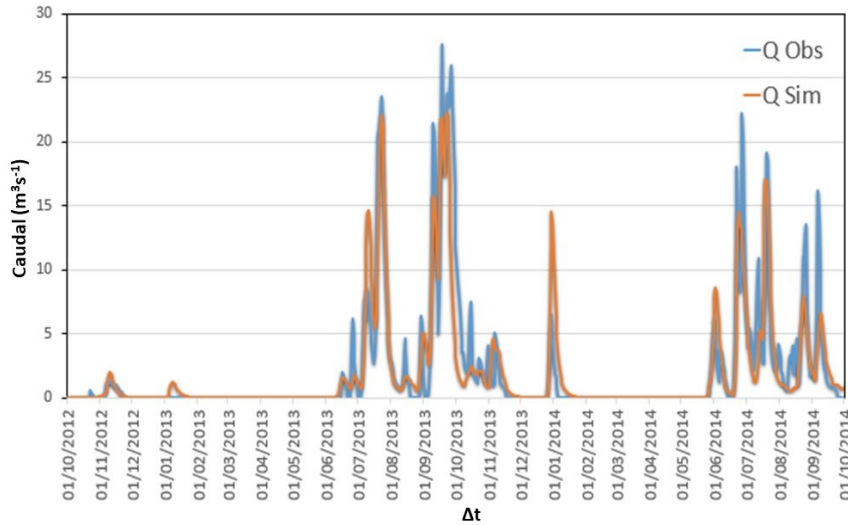


Figura 9. Modelado de los caudales observados obtenido con la calibración automática (Qobs: caudal observado; Qsim: caudal simulado).
Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que el modelo calibrado presenta inconsistencias en simular los picos de los hidrogramas (figura 9), el resultado es aceptable considerando que, según Moriasi *et al.* (2007), los modelos con 0.6 de NSE son aceptables. Es importante comentar que en esta primera etapa del trabajo no se ha incluido el modelado de los cuerpos de agua que influyen de manera directa en la respuesta hidrológica del sistema. En el caso de la validación temporal realizada al modelo, se usaron cuatro años hidrológicos (01 de octubre de 2005 al 30 de septiembre de 2009), obteniendo un NSE de 0.63, que es nuevamente aceptable de acuerdo con Moriasi *et al.* (2007).

La calibración del submodelo sedimentológico se realizó en dos fases y en el mismo periodo de calibración que el modelo hidrológico. De acuerdo con la metodología planteada, la primera fase consistió en usar como erosión observada la estimada de forma distribuida con la ecuación de la USLE (Ecuación 4) y obtener una reproducción de esta erosión con el submodelo sedimentológico (figura 10a y 10b). El procedimiento de calibración de la erosión consistió en la comparación espacial de los mapas USLE vs. submodelo sedimentológico (figura 10). En dicho proceso se usó como función objetivo nuevamente el NSE evaluado a escala de celda (30 m). El resultado ha sido una eficiencia media del 0.54 de NSE con un $FC \alpha = 175$.

A escala de cuenca se ha podido observar que mientras la ecuación de la USLE estima erosión hídrica en prácticamente toda la subcuenta del río Turbio, el submodelo sedimentológico estima erosión en celdas específicas de la subcuenta (figura 10). Al evaluar dichas celdas se ha podido confirmar que efectivamente esas celdas presentan características hidromorfológicas que favorecen el proceso de erosión. Esto tiene una gran relevancia en términos de sobreestimación de la erosión y destaca las ventajas de modelar de forma distribuida el proceso de erosión hídrica con el submodelo sedimentológico de TETIS.

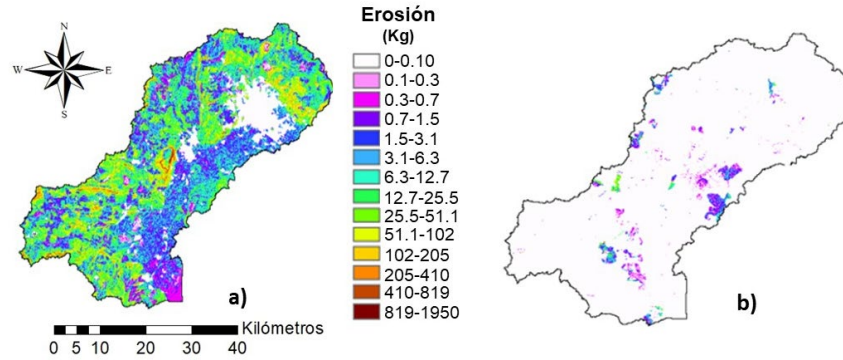


Figura 10. a) valores de erosión obtenidos con la ecuación de la USLE; b) valores de erosión obtenidos con el submodelo sedimentológico calibrado (periodo de calibración 2012–2014).
Fuente: Elaboración propia.

A escala de celda se puede observar que las mejores eficiencias ($NSE \approx 1$) se han obtenido en las laderas con mayores pendientes (figura 11). Es decir, bajo estas condiciones hidromorfológicas ambas herramientas obtienen resultados similares en la estimación de la erosión hídrica. Por otro lado, las mayores diferencias se han obtenido en las planicies de la subcuenca y en donde la ecuación de la ULSE estima erosión hasta del 98% más que el submodelo sedimentológico de TETIS.

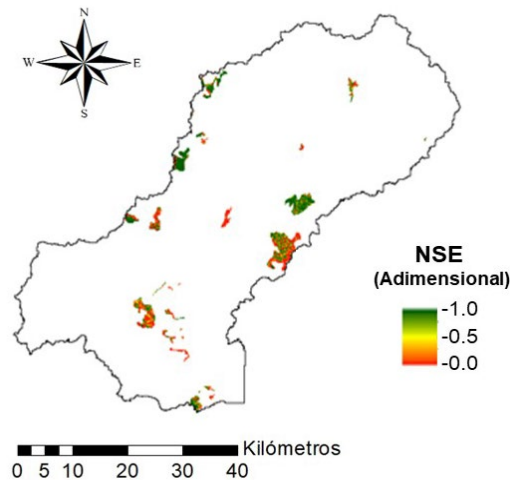


Figura 11. NSE obtenidos a escala de celda comparando las estimaciones de erosión de la USLE y el submodelo sedimentológico.

La segunda fase ha consistido en calibrar la capacidad de transporte de sedimentos del submodelo sedimentológico. Para ello, la metodología propuesta propone el uso del CES (Ecuación 5), considerando que no todo el sedimento erosionado es transportado hasta la desembocadura de la subcuenca. Al aplicar la ecuación del CES se ha obtenido un transporte del 8.9% (5671 m^3) en la subcuenca del río Turbio. El submodelo sedimentológico calibrado con base en los resultados del CES ha obtenido un transporte del 8.89% (tabla 4) con los FC para el transporte en cárcavas y cauces de β_1 y $\beta_2 = 0.007$.

Tabla 4. Transporte de sedimentos obtenido en la calibración del submodelo sedimentológico de TETIS.

Material	Erosión (m ³)	Sedimentos en transporte (m ³)		Aporte de sedimentos (m ³)
		Suspendidos	Depositados	
Arena	4625.98	0.00	4549.61	76.31
Limo	32 181.75	0.00	31 536.34	644.89
Arcilla	26 888.39	51.06	21 893.38	4943.80
Total	63 696.12	51.06	57 979.33	5665.00
%	100	0.08	91.02	8.89

Fuente: Elaboración propia.

Una vez calibrado el modelo hidrológico y el submodelo sedimentológico, se procedió al modelado de los procesos de erosión y transporte de sedimentos, incluyendo los efectos del cambio climático y el cambio de uso de suelo. Los resultados obtenidos para el modelado del 01 de octubre de 2033 al 30 septiembre de 2035 denotan una disminución en la escorrentía superficial, erosión hídrica y transporte de sedimentos. En el caso del transporte, se observa una disminución para todos los escenarios del IPCC (figura 12). En la figura 13 se puede observar el caudal sólido y líquido que, al compararlo con las condiciones actuales, presenta proporciones muy similares.

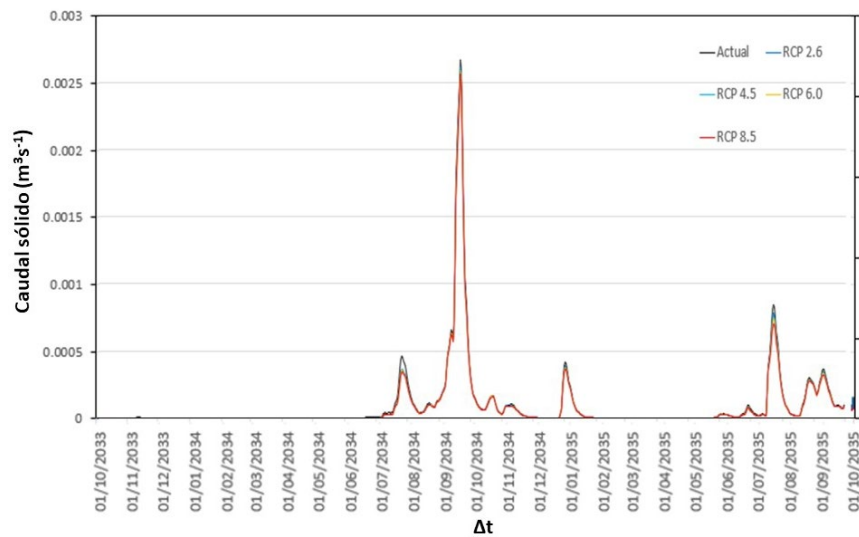


Figura 12. Caudal sólido modelado para el periodo 2033-2035, integrando el cambio climático y los cambios en el uso del suelo (escenario RCP8.5).
Fuente: Elaboración propia.

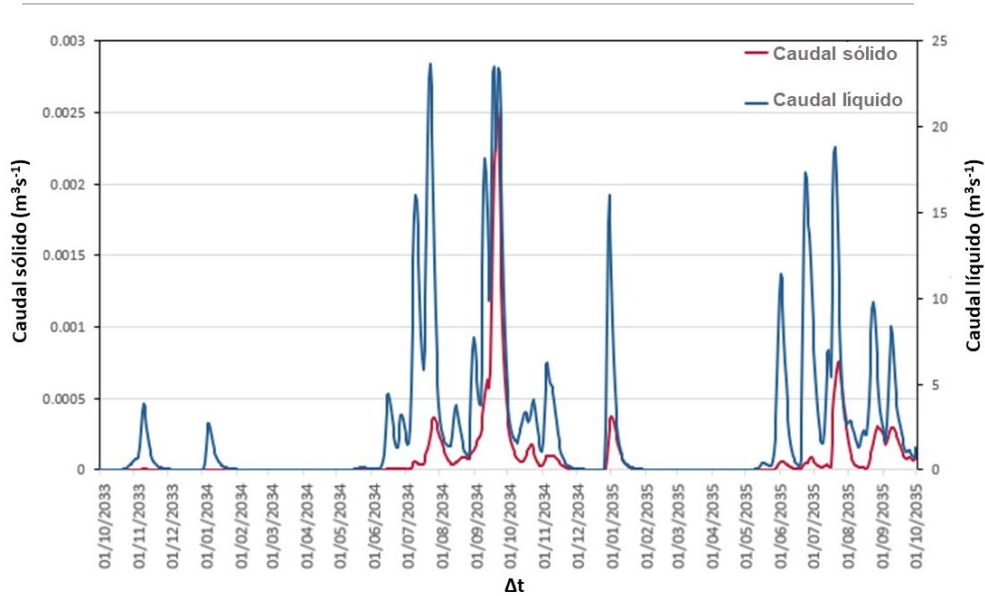


Figura 13. Caudal sólido y líquido modelado para el periodo 2033-2035, integrando los cambios en el uso del suelo y los efectos del cambio climático (escenario RCP8.5). Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior se debe a que las proyecciones de los modelos globales del clima del CMIP5 pronostican disminuciones generalizadas de las precipitaciones afectadas por la media de las anomalías (tabla 3). Una alternativa para validar el resultado anterior sería realizar el modelado de eventos máximos de precipitación con gran potencial energético para la erosión y transporte de sedimentos. Es por ello que se han analizado cuatro eventos (tabla 5) con la finalidad de observar algún cambio respecto de la relación de descarga. Los resultados muestran un comportamiento de equilibrio similar al de las condiciones actuales (figura 14).

Tabla 5. Fecha y duración de eventos seleccionados para análisis de la relación de descarga.

Evento	Fecha inicio	Fecha término	Días
1	17/07/2034	06/08/2034	21
2	14/09/2034	03/10/2034	20
3	27/12/2034	12/01/2035	17
4	16/07/2035	04/08/2035	20

Fuente: Elaboración propia.

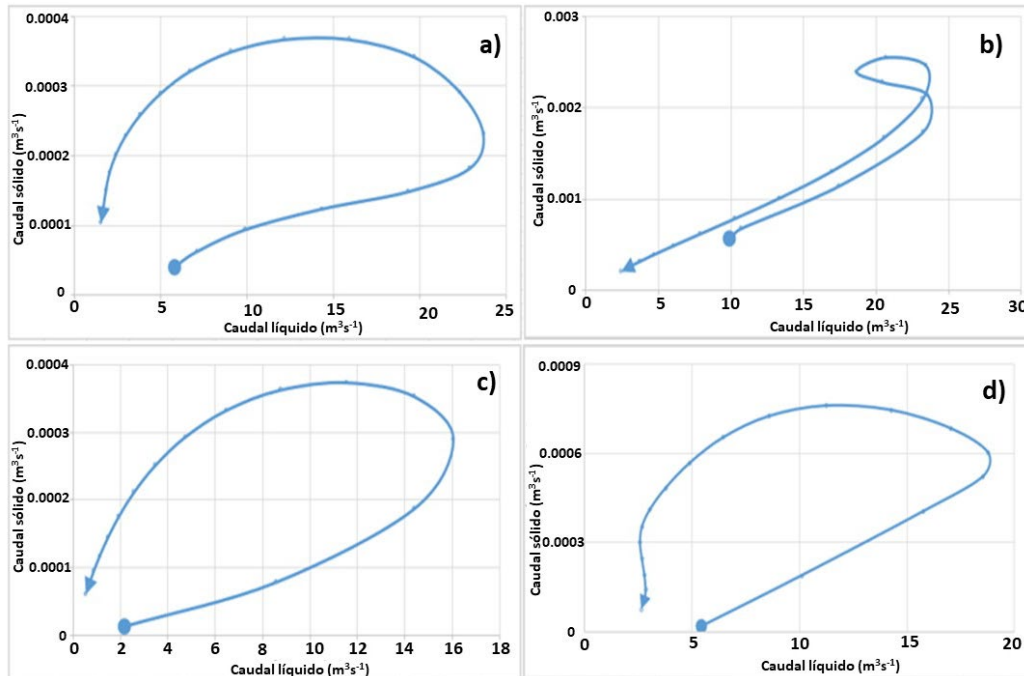


Figura 14. a) relación de descarga del evento 1; b) relación de descarga del evento 2; c) relación de descarga del evento 3; d) relación de descarga del evento 4.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo TETIS permite obtener la erosión hídrica y el transporte de sedimentos en discretizaciones temporales menores a la escala temporal del modelado. Aprovechando esta opción, se evaluó la evolución del transporte de sedimentos en la subcuenca del río Turbio en los eventos de la tabla 5. En el caso del evento tres que se presenta como ejemplo, la evolución del transporte se puede observar en la tabla 6. En la figura 15 se puede observar cómo es el transporte por la red hidrográfica de la subcuenca. Lo anterior tiene una gran relevancia en el diseño de medidas estructurales y no estructurales para contrarrestar la erosión y el transporte de los sedimentos.

Tabla 6. Fechas de interés en el análisis del comportamiento de respuesta al transporte de sedimentos modelados.

Fecha	Características	Volumen de sedimentos (m ³)
23/12/2034	Inicio de la precipitación (inicio erosión)	0.00
27/12/2034	Máxima precipitación (máxima erosión)	132.64
01/01/2035	Pico del hidrograma de sedimentos (máximo transporte)	250.56
20/01/2035	Final de escurrimiento directo (final transporte)	19.87

Fuente: Elaboración propia.

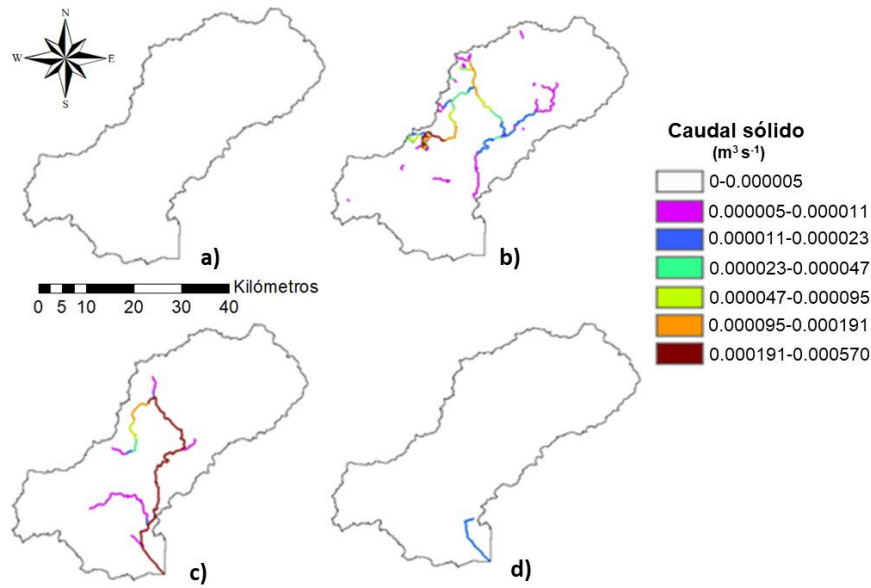


Figura 1. Evolución del transporte de sedimento para el evento 3 de la tabla 5: a) inicio del transporte; b) máximo transporte; c) descenso del transporte; d) final del transporte.
Fuente: Elaboración propia.

Los mapas de caudales de sedimento (figura 15) son de gran utilidad para interpretar y dar seguimiento al comportamiento del caudal sólido y su relación con el caudal líquido, en función de la intensidad, distribución y cantidad de lluvia. Además, resulta una herramienta novedosa en el control de eventos de pérdida de suelo para identificar las zonas de máxima acumulación o transporte y evaluar posibles acciones de prevención o, en su defecto, de rehabilitación.

Conclusiones

La metodología propuesta ha permitido evaluar la erosión hídrica y el transporte de sedimentos de una subcuenca sin información observada, usando un modelo hidrológico y un submodelo sedimentológico. La evaluación se ha realizado de forma distribuida para las condiciones actuales y futuras en la subcuenca, incluyendo los potenciales efectos del cambio climático que pronostican los modelos globales del clima y el cambio de uso de suelo. Una de las principales aportaciones de la metodología es que contribuye a resolver el problema de falta de información observada para la calibración del submodelo sedimentológico, empleando en la calibración la USLE y el CES.

Entre las principales conclusiones obtenidas se tienen que el submodelo sedimentológico de TETIS arroja resultados más congruentes, con relación a la cantidad y distribución de la erosión hídrica, en comparación con la USLA, que sobrestima la erosión en las zonas bajas de la subcuenca. El modelado de los caudales bifásicos con el modelo TETIS ha demostrado las ventajas de usar un modelo matemático. Es decir, los resultados son más fiables al considerar las características hidromorfológicas del sistema. Asimismo, pueden ser de gran utilidad en el diseño o evaluación del dimensionamiento del volumen de sedimentos de presas existentes e identificar sitios de monitoreo permanente.

Los efectos del cambio climático y el cambio de uso de suelo en la subcuenca tendrán un efecto no tan significativo en los picos de los hidrogramas y sedimentogramas. Sin embargo, para el escenario más drástico se observa un aumento del caudal de hasta 1 m³s⁻¹. Caso contrario, se observa en el

sedimentograma que presenta reducciones de aproximadamente $0.0003 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. La erosión también se ve modificada a partir del cambio de uso de suelo en las zonas cercanas a los asentamientos humanos, que es donde la modelación en Terrset® pronostica los mayores cambios, pasando de un área de 102 km^2 a 419 km^2 . Este aumento se proyecta alrededor de las zonas urbanas, por lo que para efectos de erosión tiene cambios menores que resultan en una disminución del 5%, en comparación al año actual.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido apoyada por la Dirección General de Educación Superior Universitaria (DGESU) de la Secretaría de Educación Pública a través de su Programa para el Desarrollo Profesional Docente (Folio PRODEP: UGTO-PTC-613).

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Adeogun, A. G., Ibitoye, B. A., Salami, A. W., & Ihagh, G.T. (2020). Sustainable management of erosion prone areas of upper watershed of Kainji hydropower dam, Nigeria. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 32(1), 5–10. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.05.001>
- Bangash, R. F., Passuello, A., Sanchez-Canales, M., Terrado, M., López, A., Elorza, F. J., Ziv, G., Acuña, V., & Schuhmacher, M. (2013). Ecosystem services in Mediterranean river basin: Climate change impact on water provisioning and erosion control. *Science of The Total Environment*, 458–460, 246–255. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.025>
- Batista, P. V. G., Davies, J., Silva, M. L. N., & Quinton, J. N. (2019). On the evaluation of soil erosion models: Are we doing enough? *Earth-Science Reviews*, 197, 1-17. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102898>
- Bodoque, J., Pedraza, J., Martín-Duque, J., Sanz, M., Carrasco, R., Díez, A., & 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. *Revista C. & G*, 15(3-4), 21-36. http://www.andresdiezherrero.es/publicaciones/articulos_en_revistas/bodoque_et_al_2001_puente_alt_a.pdf
- Borselli, L., Torri, D., Poesen, J., & Sanchis, P. S. (2001). Effects of water quality on infiltration, runoff and interrill erosion processes during simulated rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(3), 329-342. doi: [https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200103\)26:3<329::AID-ESP177>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200103)26:3<329::AID-ESP177>3.0.CO;2-Y)
- Bussi, G. (2014). *Implementation of a distributed sediment model in different data availability scenarios* (PhD Thesis). Universitat Politècnica de València, España.
- Bussi, G., Francés, F., Horel, E., López-Tarazón, J. A., & Batalla, R. J. (2014). Modelling the impact of climate change on sediment yield in a highly erodible Mediterranean catchment. *Journal of Soils and Sediments*, 14, 1921-1937. doi: <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0956-7>
- Chuenchum, P., Xu, M., & Tang, W. (2019). Estimation of soil erosion and sediment yield in the Lancang-Mekong river using the modified revised universal soil loss equation and GIS techniques. *Water*, 12(1), 135. doi: <https://doi.org/10.3390/w12010135>
- Cohen, M. J., Shepherd, K. D., & Walsh, M. G. (2005). Empirical reformulation of the universal soil loss equation for erosion risk assessment in a tropical watershed. *Geoderma*, 124(3-4), 235-252. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.003>
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 28(4), 1015-1031. doi: <https://doi.org/10.1029/91WR02985>

- Ebeid, M. M., Lal, R., Hall, G. F., & Miller, E. (1995). Erosion effects on soil properties and soybean yield of a Miamian soil in Western Ohio in a season with below normal rainfall. *Soil Technology*, 8(2), 97–108. doi: [https://doi.org/10.1016/0933-3630\(95\)00010-9](https://doi.org/10.1016/0933-3630(95)00010-9)
- Ernst, R., Linsenmair, K. E., & Rödel, M. (2006). Diversity erosion beyond the species level: Dramatic loss of functional diversity after selective logging in two tropical amphibian communities. *Biological Conservation*, 133(2), 143–155. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.05.028>
- Francés, F., Vélez, J. I., & Vélez, J. J. (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332(1-2), 226–240. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.032>
- Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida (GIMHA). (2014). Description of the distributed conceptual hydrological model TETIS v.9. *Ingeniería del Agua*, 18(1), 1–87. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3293> (Nota: La última parte de la referencia no corresponde con el autor. La fuente no se encontró en la web)
- Giorgetta, M. A., Jungclaus, J., Reick, C. H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Brovkin, V., Cruieger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H., Ilyina, T., Kinne, S., Kornblueh, L., Matei, D., Mauritsen, T., Mikolajewicz, U., Mueller, W., Notz, D., Pithan, F., Raddatz, T., Rast, S., Redler, R., Roeckner, E., Schmidt, H., Schnur, R., Segschneider, J., Six, K. D., Stockhause, M., Timmreck, C., Wegner, J., Widmann, H., Wieners, K., Claussen, M., Marotzke, J., & Stevens, B. (2013). Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(3), 572–597. doi: <https://doi.org/10.1002/jame.20038>
- Li, Z., & Fang, H. (2016). Impacts of climate change on water erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 163, 94–117. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.10.004>
- Montanarella, L., & Vargas, R. (2012). Global governance of soil resources as a necessary condition for sustainable development. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(5), 559–564. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.06.007>
- Moriassi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. doi: <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Neelin, J. D., Langenbrunner, B., Meyerson, J. E., Hall, A., & Berg, N. (2013). California winter precipitation change under global warming in the Coupled Model Intercomparison Project phase 5 ensemble. *Journal Climate*, 26(17), 6238–6256. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00514.1>
- Nikolic, G., Spalevic, V., Curovic, M., Khaledi, A., Skataric, G., Pajic, M., Kavian, A., & Tanaskovik, V. (2018). Variability of soil erosion intensity due to vegetation cover changes: Case study of Orahovacka Rijeka, Montenegro. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 47(1), 237–248. doi: <https://doi.org/10.15835/nbha47111310>
- O'Neal, M. R., Nearing, M. A., Vining, R. C., Southworth, J., & Pfeifer, R. A. (2005). Climate change impacts on soil erosion in Midwest United States with changes in crop management. *CATENA*, 61(2-3), 165–184. doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.03.003>
- Orozco, I., Francés, F., & Mora, J. (2019). Parsimonious modeling of snow accumulation and snowmelt processes in high mountain basins. *Water*, 11(6), 1288. doi: <https://doi.org/10.3390/w11061288>
- Orozco, I., Ramírez, A. I., & Francés, F. (2018). Modelación de los impactos del Cambio Climático sobre los flujos y almacenamientos en una cuenca de alta montaña. *Revista Ingeniería del Agua*, 22(3), 125–139. doi: <https://doi.org/10.4995/ia.2018.8931>
- Orozco, I., Martínez, A., & 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(6), 1682. doi: <https://doi.org/10.3390/w12061682>
- Rojas, R. (2002). GIS-based upland erosion modeling, geovisualization and grid size effects on erosion simulations with CASC2D-SED (PhD Thesis). Colorado State University, Colorado.
- Wilkinson, S. N., Prosser, I. P., Rustomji, P., & Read, A. M. (2009). Modelling and testing spatially distributed sediment budgets to relate erosion processes to sediment yields. *Environmental Modelling & Software*, 24(4), 489–501. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.09.006>

-
- Zhang, Q., Fan, J., & Zhang, X. (2016). Effects of simulated wind followed by rain on runoff and sediment yield from a sandy loessial soil with rills. *Journal of soils and sediments*, 16, 2306–2315. doi: <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1470-x>
- Zhang, Y., Zhang, H., Peng, B., & Yang, H. (2003). Soil erosion and its impacts on environment in Yixing tea plantation of Jiangsu Province. *Chinese Geographical Science*, 13, 142–148. doi: <https://doi.org/10.1007/s11769-003-0008-5>