

## Modelación de los posibles impactos del cambio climático en Un sistema hidrológico y su repercusión en la seguridad hídrica.

León Bosque, Lucía (1), Alemán Ramírez Christopher Sebastián (2), Orozco Medina, Ismael (3), Delgado Galván, Xitlali (3).

1 Universidad de San Carlos de Guatemala | Dirección de correo electrónico: [lucialeonbosque@gmail.com](mailto:lucialeonbosque@gmail.com)

2 ingeniería Hidráulica, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico:

3 Departamento de Ingeniería en Geomántica e Hidráulica, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico: [i.orozco@ugto.mx](mailto:i.orozco@ugto.mx)

---

### Resumen

En la presente investigación se desarrolla una metodología para estimar y evaluar los efectos del cambio climático y el cambio de uso de suelo sobre los flujos y almacenamientos de un sistema hidrológico, incluyendo además los efectos en la producción y transporte de sedimentos. Lo anterior, considerando que los flujos y almacenamientos presentan en la mayoría de los sistemas hidrológicos una marcada estacionariedad que repercute directamente en la disponibilidad hídrica. Sin embargo, en la última década se han realizado estudios que aseveran que la estacionariedad en las cuencas a muerto como consecuencia de los efectos del cambio climático. Es por ello, que resulta de gran interés poder evaluar matemáticamente estos efectos y generar información para la toma de decisiones. La propuesta incluye un modelo hidrológico distribuido, un submodelo de sedimentos, modelos climáticos, los escenarios de IPCC y un modelo de cambio de uso de suelo. Los resultados obtenidos muestran disminuciones significativas en las precipitaciones y por consecuencia una disminución en la recarga del acuífero. Además de un aumento en la producción y transporte de los sedimentos.

### Abstract

This research presents a methodological proposal to estimate and evaluate the effects of climate change and the change of land use on the flows and storage of a basin, including also the effects on sediment production and transport. Because, the flows and storage present in most of the hydrographic basins a marked stationarity that has a direct impact on water availability. However, in the last decade there have been studies that claim that stationarity in the basins has died as a result of the effects of climate change. That is why it is of great interest to be able to mathematically evaluate these effects and generate information for decision making. The proposal includes a distributed hydrological model, a submodel of sediments, climate models, IPCC scenarios and the land use change model. The results obtained show significant decreases in rainfall and consequently a decrease in aquifer recharge. In addition to an increase in the production and transport of sediments.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una gran incertidumbre sobre los posibles efectos del cambio climático y los cambios del uso de suelo en el comportamiento de los sistemas hidrológicos y su disponibilidad hídrica. Lo anterior, considerando que los flujos y almacenamientos presentan en la mayoría de los sistemas hidrológicos una marcada estacionariedad que repercute directamente en la disponibilidad hídrica. Sin embargo, en la última década se han realizado estudios que aseveran que la estacionariedad en las cuencas a muerto como consecuencia de los efectos del cambio climático. Una forma de cuantificar dichos flujos y almacenamientos es a través de simples balances hídricos superficiales que simplifican el funcionamiento de la cuenca en entradas y salidas. Según Vilchis-Mata et al. (2015), la precipitación y temperaturas son los procesos del ciclo hidrológico más importantes que deben tomarse en cuenta en estudios hidrológicos y de disponibilidad [2]. Dada la importancia de estas variables y su efecto en los procesos físicos de una cuenca, resulta de gran relevancia conocer cómo modifican éstas los flujos y almacenamientos de un sistema tomando en cuenta los efectos del cambio climático y el cambio de uso de suelo. Es por ello, que evaluar los impactos del Cambio Climático en una cuenca hidrográfica es de gran importancia en la planificación y prevención de situaciones de riesgo como son las crecidas y las inundaciones [1], así como en la disponibilidad hídrica [9].

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio para este trabajo es una subcuenca del Río Turbio (IMAGEN 1), ubicada al suroeste del estado de Guanajuato y al noreste del estado de Jalisco, México. La subcuenca posee un área de 3,041 km<sup>2</sup> de la cual el 79% de su área abarca el territorio del estado de Guanajuato y el 21% del estado de Jalisco. La precipitación de la cuenca oscila entre los 600 mm y 700 mm. Su actividad productiva se caracteriza por producir granos, forrajes, hortalizas y especias.

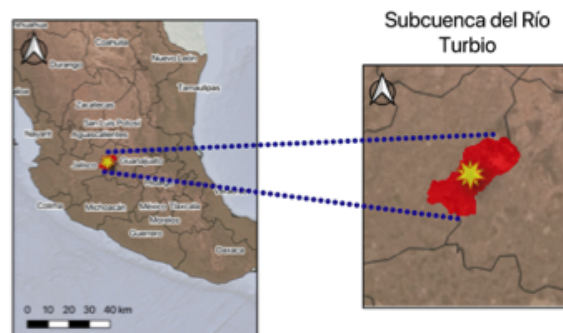


IMAGEN 1: Ubicación de la subcuenca del río Turbio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología propuesta incluye el acoplamiento del hidrológico distribuido TETIS y su submodelo de sedimentos. Además de Modelos Globales del Clima (GCM) y los escenarios de cambio climático del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Finalmente, se usó el software TerrSet® para modelar los cambios de uso de suelo. El modelo TETIS ha sido desarrollado por el Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA) del Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universitat Politècnica de València (UPV), España. El TETIS realiza la simulación hidrológica a través de una estructura de tanques interconectados vertical y horizontalmente, y que representan los procesos de ladera y acuífero [5]. El submodelo de sedimentos en TETIS está basado en la formulación desarrollada en el modelo CASC2D-SED. El modelo considera los procesos de ladera (IMAGEN 2), los procesos en cárcavas y cauces. Además, separa las partículas de sedimentos en tres categorías de tamaño, arena, limo y arcilla [3].

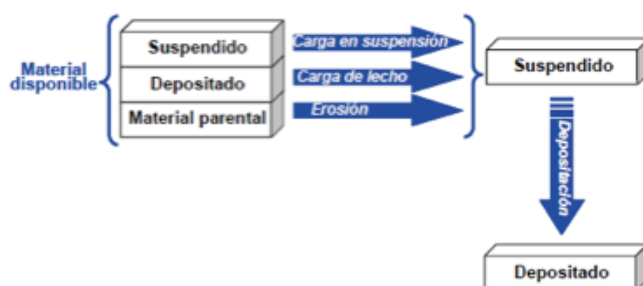


IMAGEN 2: Modelo conceptual de los procesos en ladera del submodelo de sedimentos de TETIS.

El submodelo de sedimentos utiliza los parámetros de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE por sus siglas en inglés) [4], introducidos en tres mapas de parámetros: factor de cobertura y manejo (C) [7], factor de erodabilidad del suelo (K) [7] y el factor de prácticas de soporte (P) [8] (IMAGEN 3). Además de los mapas de porcentaje de arena, limo y arcilla en la capa de suelo.

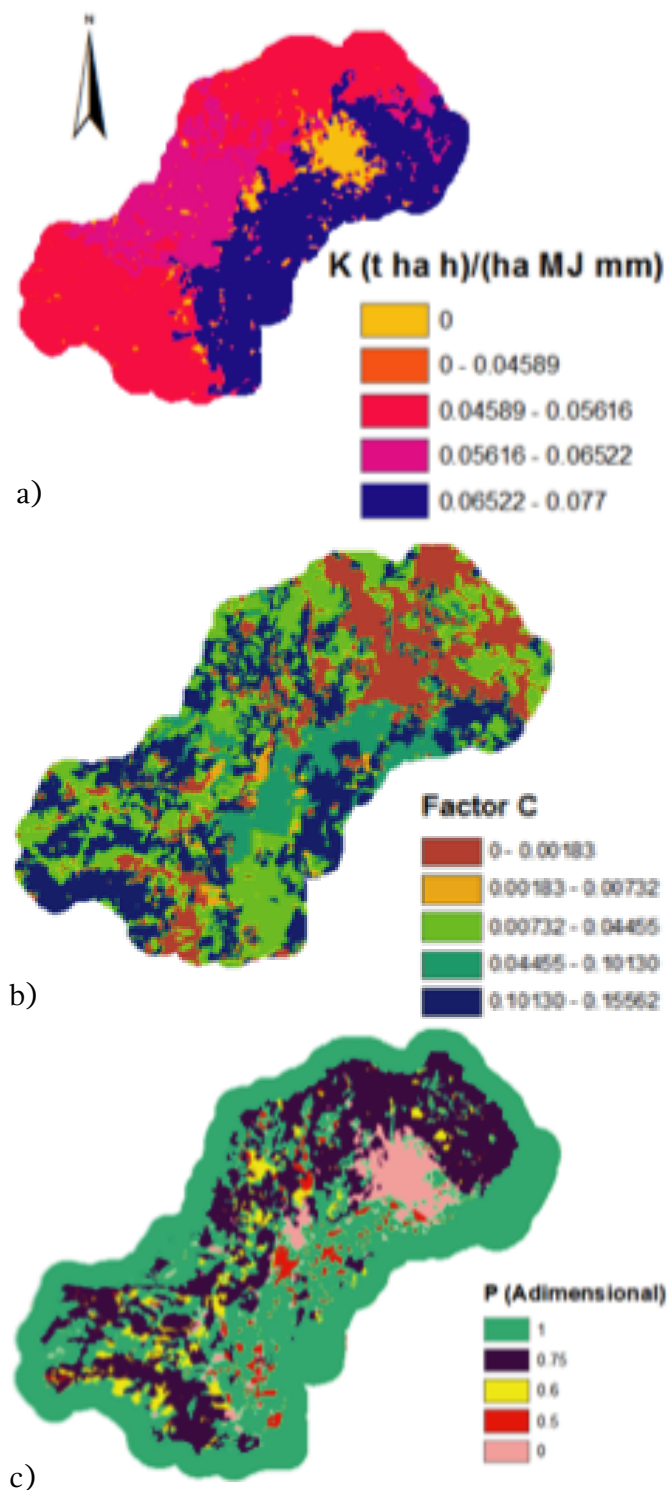


IMAGEN 3: Parámetros del submodelo de sedimentos: a) parámetro K, b) parámetro C y c) parámetro P.

Los efectos del cambio climático en las precipitaciones y temperaturas han sido estimados usando los Modelos del Proyecto Inter-Comparación de Modelos Acoplados-fase 5 (CMIP5) [6]. Usando para ello los escenarios RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 del IPCC [10]. El CMIP5 considera un total de 18 GCMs de manera conjunta para realizar las predicciones [6]. Por otro lado, la modelación de los cambios de uso de suelo y cubierta vegetal se realizaron usando el software TerrSet®. Usando para ello los mapas de edafología, geología, caminos, uso del suelo y cuerpos de agua obtenidos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). En la IMAGEN 4 se presenta el pronóstico de cambio de uso de suelo para el año 2035.

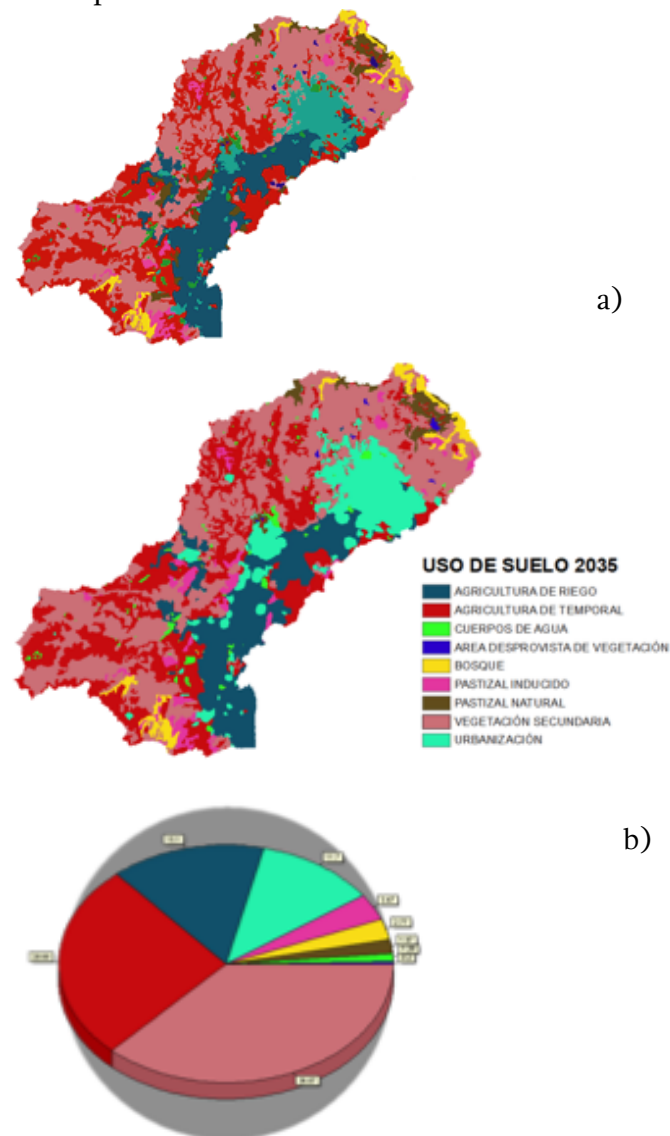
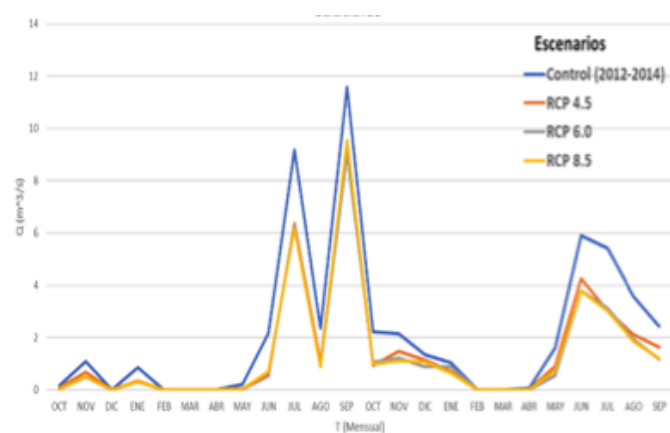


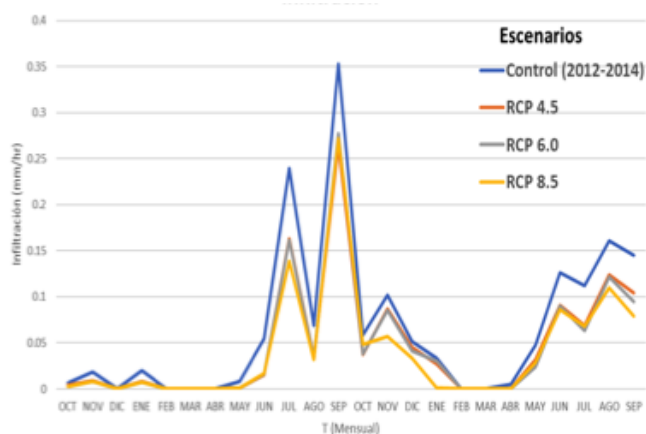
IMAGEN 4: a) uso de suelo de suelo del año 2019 obtenido de INEGI y b) pronóstico del cambio de uso de suelo al año 2035 obtenido con TerrSet®.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al introducir los efectos del cambio climático y modelar los flujos en la subcuenca, se ha podido observar que los mayores efectos se presentan en la escorrentía directa (IMAGEN 5a) e infiltración (IMAGEN 5b). En ambos casos se presenta una disminución para todos los escenarios climáticos, siendo el escenario RCP8.5 el más significativo. Lo anterior, tomando en cuenta que es el escenario que prevé una mayor disminución de las precipitaciones (-32 mm) y el mayor aumento en las temperaturas (+2.64 °C). Tomando en cuenta los resultados obtenidos se prevé una disminución hídrica superficial y una afectación en la recarga del acuífero.



a)



b)

IMAGEN 5: Modelación de los posibles efectos del cambio climático en la hidrodinámica de la subcuenca para el año 2035: a) escorrentía superficial y b) infiltración.

Al modelar el transporte de sedimentos en el año 2035, una vez calibrado el submodelo de sedimentos usando para ello como valor observado los resultados de la ecuación de la USLE (IMAGEN 6a). Los resultados obtenidos muestran un aumento del transporte total de sedimentos

en la cuenca (IMAGEN 6b). Se puede observar un aumento gradual en todos los escenarios, siendo el aumento más significativo en el RCP8.5 (IMAGEN 6b). El cual responde al comportamiento de las lluvias que se presentan con más frecuencia durante los meses de otoño-invierno.

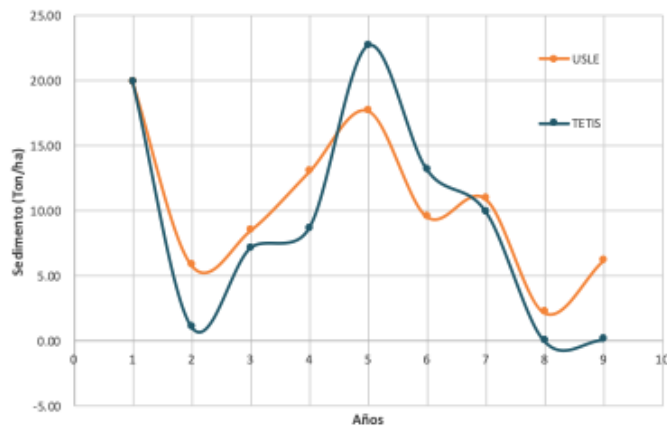


IMAGEN 6: Modelación de los posibles efectos del cambio climático en la sedimentología de la subcuenca para el año 2035: a) resultados en la calibración y b) caudales bifase (agua-sedimentos).

El posible impacto en la disponibilidad hídrica tiene que ver en que al aumentar la producción y transporte de sedimentos las fuentes reducirán su capacidad de almacenamiento afectando la disponibilidad superficial. Al aumentar el transporte de sedimentos es posible afectaciones en la capacidad de infiltración del suelo por el arrastre de materiales más impermeables.

## CONCLUSIONES

La metodología propuesta que acopla varias herramientas matemáticas ha permitido modelar los posibles efectos del cambio climático en la hidrodinámica, producción y transporte de sedimentos de la subcuenca del río Turbio. Lo anterior, resulta de gran trascendencia debido a

que a través de estas herramientas se ha podido cuantificar los flujos y el efecto que tendrán en la disponibilidad hídrica del sistema. En términos generales se pronostica una disminución en la disponibilidad hídrica superficial y subterránea. Enfatizando una afectación en la reducción de la capacidad de almacenamiento de las presas por el aumento que se prevé del transporte de sedimentos.

#### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido apoyada por la Dirección General de Educación Superior Universitaria (DGESU) de la Secretaría de Educación Pública de México (a través de su Programa para el Desarrollo Profesional Docente FOLIO PRODEP: UGTO-PTC 613) y por la División de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato, México.

#### REFERENCIAS

[1]. Arnell, N. W., Gosling, S. N. (2013). "The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale". *Journal of Hydrology*, Vol. 486, pp. 351–364.

[2]. Burlando, P., Rosso, R. (2002). "Effects of transient climate change on basin hydrology. 2. Impacts on runoff variability in the Arno River, central Italy". *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 1177–1199.

[3]. Bussi, G.; Francés, F; Montoya, J.J; Pierre Y. J. (2014). "Distributed sediment yield modeling: importance of initial sediment conditions". *Journal Elsevier*.

[4]. Blanquer, J.M.; Ibáñez, S.; Moreno, H. (2012). "El factor k de la ecuación universal de pérdidas suelo (USLE)". *Universitat Politècnica de València (UPV). Departamento de Producción Vegetal. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. España.*

[5]. Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida (2018). "Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v.9.0.1". *Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de Valencia. España, 2018.*

[6]. Taylor, K.E; Stouffer, R.J.; Meehl, G.A. (2012). *An overview of cmip5 and the experiment design.* Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California. American Meteorological Society.

[7]. Panagos, P.; Borelli, P; Meusburger, K.; Alewell, C.; Lugato, E. y Montaranella, L. (2015). "Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale". *Journal of Land Use Policy*, 48, 38-50.

[8]. Panagos P.; Borrelli P.; Meusburger K.; Van der Zanden E.H.; Poesen J.; Alewell C. (2015). "Modelling the effect of support practices (p-factor) on the reduction of soil erosion by water at european scale". *Journal Elsevier*. 2015.

[9]. Ruiz-Villanueva, V. Stoffel, M., Bussi, G., Francés, F., Bréthaut, C. (2014). "Climate change impacts on discharges of the Rhone River in Lyon by the end of the twenty-first century: model results and implications". *Regional Environmental Change*, Vol. 15(3), pp. 505–515.

[10]. Stocker, T.F., Dahe, Q., Gian-Kasper, P., Melinda, M.B., Tignor, S.K. Allen, J.B., Alexander, N., Yu X., Vincent B., Pauline M.M. (2013). "Cambio climático 2013-Bases físicas. Quinto Inf. Edited by 2013 Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático". pp. 1–34.

[11]. Vilchis, M, I., Bâ, K. M., Franco-Plata, R., Díaz-Delgado, C. (2015). "Modelación hidrológica con base en estimaciones de precipitación con sensores hidrometeorológicos". *Tecnología y Ciencias Del Agua*, Vol. 6(4), pp. 45–60.