

## MODELOS HIDROLÓGICOS Y DE CAMBIO EN EL USO DEL SUELO INTEGRADOS A MÉTODOS PARTICIPATIVOS PARA LA TOMA DE DECISIONES

Lina García-Corrales<sup>1</sup>, Humberto Avila<sup>2</sup>, Ronald Gutierrez<sup>1</sup> y Yhonattan Mendez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.

<sup>2</sup>Universidad Pontificia Bolivariana, Montería, Colombia.

E-mail: lmcorrales@uninorte.edu.co, havila@uninorte.edu.co, rgutierrez1@uninorte.edu.co, yhonattan.mendez@upb.edu.co

### Introducción

Los modelos hidrológicos han sido ampliamente utilizados para el estudio de las cuencas, para analizar diferentes escenarios de uso del suelo (Dwarakish, Ganasri, & De Stefano, 2015). Recientemente, también se están integrando modelos hidrológicos con modelos geográficos de cambios de uso del suelo, por sus potenciales ventajas en la predicción de respuestas hidrológicas (Öztürk, Copty, & Saysel, 2013).

Por otra parte, se ha resaltado la necesidad de nuevos enfoques que permitan entender mejor las interconexiones entre las condiciones hidrológicas, el uso de la tierra y la sociedad, como por ejemplo en casos de migración o de abandono la agricultura (Banco Interamericano de Desarrollo, 2012). Especialmente, la se considera importante la incorporación de la participación de actores sociales, que son determinantes en los usos del suelo (Reed, 2008).

En este trabajo se presenta una comparación de la respuesta hidrológica de una cuenca ante escenarios de uso del suelo para el año 2030. Un escenario denominado *tendencial* fue construido utilizando un modelo de cambio en el uso del suelo, Land Change Modeler for ArcGis (Clark Labs & Clark University, 2013). El otro escenario fue construido con la participación de tomadores de decisión de la cuenca y se denominó *deseado*. Los dos escenarios se utilizaron como información de entrada a un modelo hidrológico-SWAT (Arnold et al., 2012), con el propósito de estudiar la respuesta hidrológica, que oriente la toma de decisiones en la cuenca del río Canalete, en Colombia.

### Materiales y metodología

El área de estudio es la cuenca del río Canalete, está ubicada en el departamento de Córdoba en el norte de Colombia, el cauce principal tiene una longitud aproximada de 90,2 km desde el nacimiento hasta su desembocadura en el Mar Caribe. El área de la Cuenca hidrográfica es de aproximadamente 92.000 hectáreas (CVS & Universidad Pontificia Bolivariana, 2008), las actividades económicas principales de la cuenca son la ganadería extensiva y el cultivo de productos agrícolas.

La modelación de los cambios en el uso del suelo se realizó para un clúster de municipios del departamento de Córdoba que incluían la cuenca que tienen dinámicas económicas similares. Se utilizaron coberturas de la tierra de los periodos 2000-2002, 2005-2009 y 2010-2012 a escala 1:100.000 y resolución de 30 metros (IDEAM, 2012a, 2012b, 2014). Los usos del suelo se clasificaron en seis categorías: Construcciones, Pastos, Cultivos, Bosque, Arbustos y Agua. La calibración del modelo se realizó con para los años 2001 y 2006 (configuraciones 2000-2002 y 2005-2009) y la validación para el año 2011 (configuración) 2010-2012.

Para la modelación de las transiciones de uso del suelo se utilizó el programa Land Change Modeler for ArcGis (Clark Labs & Clark University, 2013), se usó una red neuronal perceptrón multicapa (MPL) y un conjunto de 19 variables explicativas (7 biofísicas y 12 socioeconómicas). Adicionalmente para la predicción del escenario *tendencial* al año 2030, se utilizó una cadena de Markov. Este escenario tendencial corresponde a aquel en que las variables explicativas se mantienen sin modificación.

El escenario *deseado* fue construido mediante mapeo participativo (Reilly, Adamowski, & John, 2017), en reuniones realizadas el mes de diciembre con tres grupos de actores tomadores de decisiones de la cuenca, que incluían a entidades locales, regionales, ambientales, agropecuarias y de investigación. A los actores se les facilitó un mapa de la cuenca a escala 1:80.000 que mostraba la corriente del río Canalete y los asentamientos humanos. Los actores expresaron en el mapa los usos del suelo deseado para el año 2030, teniendo como guía la ilustración de los usos del suelo al año 2015. Los mapas de los tres grupos fueron consolidados en un solo escenario deseado en cuadrículas de 1x1 km. En la Figura 1 se muestra un grupo de actores construyendo el escenario deseado.



Figura 1.- Mapeo participativo con tomadores de decisión.

El modelo hidrológico utilizado es SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 2012). Los datos de entrada incluyeron características de los suelos (IGAC, 2009), modelo de elevación digital (ASTER GDEM) y usos de suelo para el año 1996 (clasificados de LANDSAT) (U.S. Geological Survey, 2017). La información climática utilizada corresponde a registros de 8 estaciones de precipitación y 3 estaciones de temperaturas máximas y mínimas, para las simulaciones se usaron 4 años de calentamiento.

El modelo hidrológico fue calibrado para los años 1993 a 1994, a partir de caudales mensuales (CVS & FONADE, 2005) de la estación Canalete ubicada en las coordenadas 1.464.104mN, 762.364mO con origen Bogotá, y validado para los años 1995 a 1997.

En la Figura 2 se muestra un esquema general de la metodología empleada en este trabajo.

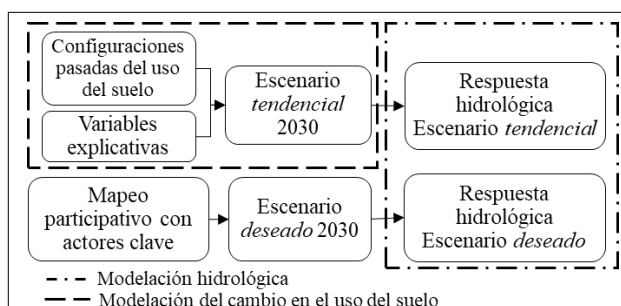


Figura 2.- Metodología de trabajo.

### Resultados y discusión

La calibración del modelo de cambio en el uso del suelo se realizó para los años 2001 y 2006 (configuraciones 2000-2002 y 2005-2009 respectivamente) con dos submodelos, denominados

“desde pastos” y “hacia pastos”, considerando que este uso es el que tiene mayor dinámica de cambios. La precisión de los submodelos fue de 0.65, que se considera aceptable (Castillo, Güneralp, & Güneralp, 2014). La calibración para el año 2011 (configuración 2010-2012), arrojó un buen indicador Kappa de 0.7. La configuración para el año 2030 predicha con el modelo o escenario *tendencial* y el escenario *deseado* construido con tomadores de decisiones, se muestran en la Figura 3.

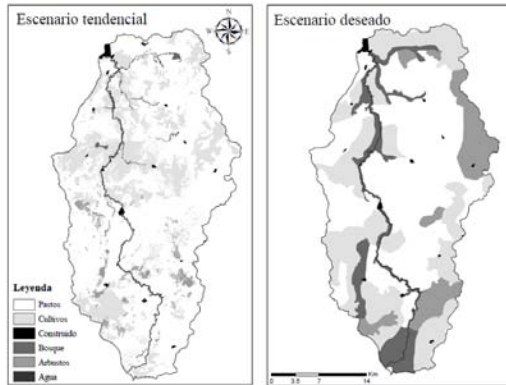


Figura 3.- Escenarios tendenciales y deseados para el año 2030.

El escenario tendencial tiene mayores áreas de pastos, mientras que el escenario deseado tiene mayores áreas de cultivos. Además, el escenario deseado tiene mayores áreas de bosques y arbustos, especialmente en el nacimiento y en las riberas del río. Los resultados del modelo hidrológico muestran un coeficiente de determinación  $R^2$  para la calibración de caudales mensuales los años 1989 a 1994 fue de 0.91 y para la validación de los años 1995 a 1997 fue de 0.81. Las configuraciones de los escenarios tendencial y deseado para el año 2030 fueron utilizadas para modelar los caudales mensuales, bajo condiciones climáticas uniformes del periodo 1985-2015. En la Figura 4 se muestran los caudales promedios multianuales.

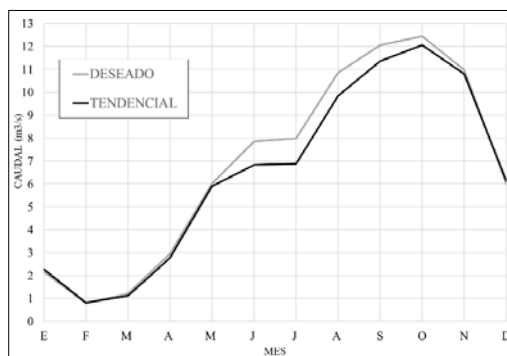


Figura 4.- Caudales mensuales para los escenarios tendencial y deseado.

Los resultados muestran que el comportamiento de los escenarios a 2030, son similares. Los caudales mensuales bajos se presentan en los meses de enero hasta abril, con un aumento progresivo de caudales en los meses de mayo a noviembre, siendo los caudales más altos en octubre, lo cual es consistente con comportamiento que está influenciado principalmente por la dinámica temporal de la precipitación (CVS & FONADE, 2005). Sin embargo, el escenario tendencial presenta caudales más bajos desde mayo a noviembre, lo cual sugiere una mejor regulación de caudales.

## Conclusiones

Las investigaciones que acoplan modelos hidrológicos y modelos de cambio en el uso del suelo son escasos en contextos latinoamericanos (Méndez Morales, 2012), a pesar de que las cuencas están especialmente sujetas a fuertes presiones de uso

del suelo en la últimas décadas, especialmente por la expansión de cultivos (Hosonuma et al., 2012) y pastizales (Ogden, Crouch, Stallard, & Hall, 2013). En este trabajo además se incorporan métodos participativos reconociendo la importancia de los actores en la toma de decisiones.

Los resultados muestran que el escenario deseado traería mayores caudales mensuales en los meses de mayores precipitaciones, a pesar de tener mayores áreas de bosques y arbustos. Lo cual indica que la regulación de caudales está asociada también a la distribución de las áreas de pastos y cultivos en la cuenca.

Considerando que el escenario tendencial obedece a las mismas variables explicativas de cambio en el uso del suelo que han operado, los resultados sugieren que las políticas del uso del suelo deberán estar asociadas al impacto hidrológico, especialmente en contextos como la cuenca del río Canalete, donde la agricultura y la ganadería son las actividades económicas principales. Además, se resalta que la ampliación de bosques en las áreas de nacimiento, si bien es una medida reconocida para la regulación de caudales, debe acompañarse de una visión general de todos los usos del suelo de la cuenca. Lo cual deberá complementarse también con el análisis de otros servicios ecosistémicos, para lo cual la generación de escenarios tendencial y deseado puede brindar también oportunidades de integración con otras disciplinas.

## Referencias

- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... Jha, M. K. (2012). Swat: Model Use, Calibration, and Validation. *Asabe*, 55(4), 1491–1508.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2012). *Evaluación Sectorial y Temática El reto del Manejo Integrado*.
- Castillo, C. R., Güneralp, I., & Güneralp, B. (2014). Influence of changes in developed land and precipitation on hydrology of a coastal Texas watershed. *Applied Geography*, 47, 154–167.
- Clark Labs, & Clark University. (2013). Land Change Modeler for ArcGIS Tutorial. Clark Labs.
- CVS, & FONADE. (2005). *Diagnóstico Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Río Canalete*.
- Dwarakish, G. S., Ganasri, B. P., & De Stefano, L. (2015). Impact of land use change on hydrological systems: A review of current modeling approaches. *Cogent Geoscience*, 1(1), 1115691.
- Hosonuma, N., Herold, M., De Sy, V., De Fries, R. S., Brockhaus, M., Verchot, L., ... Romijn, E. (2012). An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters*, 7(4), 1–12.
- IDEAM. (2012a). Mapa de Cobertura de la Tierra. Metodología Corine Land Cover. Adaptada para Colombia. Periodo 2005-2009. (2012b). Mapa de Coberturas de la Tierra. Metodología Corine Land COVer. Adaptada para Colombia. Periodo 2000-2002. (2014). Mapa de Coberturas de la Tierra. Metodología Corine Land Cover. Adaptada para Colombia. Periodo 2010-2012.
- IGAC. (2009). *Estudio general de suelos y zonificación de Tierras*. Departamento de Córdoba.
- Méndez Morales, M. (2012). Predicción del impacto del cambio temporal en el uso del suelo sobre cuencas hidrológicas de alta pendiente en Costa Rica. *Tecnología En Marcha*, 26(506), 13.
- Ogden, F. L., Crouch, T. D., Stallard, R. F., & Hall, J. S. (2013). Effect of land cover and use on dry season river runoff, runoff efficiency, and peak storm runoff in the seasonal tropics of Central Panama. *Water Resources Research*, 49(12), 8443–8462.
- Öztürk, M., Coptý, N. K., & Sarsel, A. K. (2013). Modeling the impact of land use change on the hydrology of a rural watershed. *Journal of Hydrology*, 497, 97–109.
- Reed, M. S. (2008). Stakeholder participation for environmental management: A literature review. *Biological Conservation*, 141(10), 2417–2431.
- Reilly, K. H., Adamowski, J. F., & John, K. (2017). Participatory mapping of ecosystem services to understand stakeholders' perceptions of the future of the Mactaquac Dam, Canada. *Ecosystem Services*, 30, 107–123.
- U.S. Geological Survey. (2017). LT05\_LIGS\_010054\_19960622\_20170104\_01\_T2