



Thematic week: Water and Land

Thematic axis: Land Use Planning, Forest Cover and Afforestation

Title: Modelación de los cambios de cobertura del territorio y sus consecuencias hidrológicas.

Authors: Acevedo, Miguel F.¹, Redfearn, Howard²

¹ Ingeniería Biológica y Ambiental, Universidad del Norte de Texas, Denton Texas 76203 EEUU, Correo electrónico: acevedo@unt.edu, Teléfono: 940-891-6701

² Stormwater Manager, City of Mansfield, 1200 E. Broad St. Mansfield, Texas 76063, Correo electrónico: howard.redfearn@ci.mansfield.tx.us

RESUMEN

Los cambios de uso del territorio en las cuencas hidrográficas son acciones humanas muy prevalentes que afectan el comportamiento de la cantidad y calidad del agua en las cuencas. Los factores principales son cambios en la permeabilidad de la superficie, la remoción de suelo, y los cambios de cobertura vegetal. Ha sido práctica común que se efectúan dichos cambios sin planificación cuidadosa que tome en cuenta los efectos potencialmente negativos sobre los recursos de agua. El avance en los modelos de hidrológicos provee una herramienta que permite anticipar los posibles efectos potenciales de dichos cambios. Aun más, el desarrollo de los modelos de toma de decisión multi-agentes acoplados a los modelos hidrológicos, despunta como una metodología que permita incluir los múltiples actores humanos en los cambios de una cuenca. En este artículo presentamos dos ejemplos de modelos aplicados a una cuenca en el centro norte del Estado de Texas en los EEUU de Norteamérica. En el primer ejemplo se describe la aplicación de un modelo hidrológico para la planificación del uso del territorio, y en el segundo de describe el uso de un modelo multi-agente para entender la dinámica del proceso de cambios de uso del territorio. El modelo presentado en el segundo ejemplo puede usar resultados del modelo presentado en el primer ejemplo. De este modo se logra un enfoque integrado. **Key words:** modelos, cuencas, uso del territorio.

INTRODUCCION

La deforestación o remoción de cobertura vegetal con fines agrícolas o de expansión urbana son tan prevalentes en todo mundo que su aumento afecta la cobertura y uso del territorio en tal magnitud que representa un reto de dimensión planetaria (v.g., Lepers et al., 2005). Por ejemplo, la urbanización produce cambios en la cantidad de agua de escorrentía, un acortamiento el tiempo que se toma en alcanzar el pico de caudal a la salida de la cuenca (Cheng & Wang, 2002) y además la recesión del hidrógrafo es más rápida (Rose & Peters, 2001). Otro ejemplo demostrativo lo representa el aporte de sedimentos y agroquímicos al agua de escorrentía proveniente de zonas agrícolas.

Se plantea entonces la necesidad de entender cuales patrones de cambio de uso del territorio (en adelante CUT) pueden sustentarse a largo plazo. Más expresamente nos podemos hacer dos preguntas: ¿Cuáles son los valores y actitudes de los habitantes y de grupos de presión que conducen las decisiones de CUT que afectan una cuenca? ¿Y cómo puede este conocimiento ser usado para dirigir decisiones y políticas que logren la sustentabilidad de la cuenca? (Acevedo et al., 2007). Planteamos en este artículo que los modelos hidrológicos y los modelos multi-agentes pueden emplearse para ayudar a responder estas preguntas.

Los modelos hidrológicos pueden usarse para predecir como los CUT se traducen en cambios del régimen de caudal en el área, y así alertar sobre decisiones erradas de CUT o sugerir estrategias mejores (v.g., Post et al. 1996). Con este fin los modelos hidrológicos requieren de información fidedigna de la cobertura de la cuenca y de los regímenes de precipitación que ocurren y podrían ocurrir en el área. Los sistemas de información geográfica (SIG) y de percepción remota satelital ayudan mucho en la preparación de datos espaciales para insumo de los modelos hidrológicos. De igual modo los sistemas de radar meteorológicos proveen una información crucial sobre la distribución espacial de la precipitación (Bronstert et al., 2002). Aun modelos simples, como los basados en el método empírico del “Número de Curva” (en adelante NC), pueden dar buenos resultados si se implementan apropiadamente (Garen & Moore, 2005).

Por otro lado, los modelos multi-agente (MMA) facilitan las simulaciones del comportamiento de los sistemas humanos, ya que capturan lo esencial de los procesos de decisión y valores o preferencias que conllevan a CUT. A su vez estos cambios generan efectos en el sistema natural simulado por modelos basados en procesos y funciones de la cuenca, tal como los modelos hidrológicos explicados anteriormente (Acevedo et al. 2007, Monticino et al. 2007). Las interacciones entre los grupos de presión son simuladas usando MMA que actúan en modelos de paisaje forestales en la forma del cambio de CUT; el MMA recibe la reacción o efectos de estas acciones en forma de métricas de respuestas hídricas proporcionadas por los modelos hidrológicos. Los habitantes y grupos de presión pueden ver entonces los efectos potenciales de sus decisiones y reconsiderar aquellas decisiones a fin de lograr la sostenibilidad del sistema.

En este artículo nos enfocaremos a un área de estudio situada en una zona suburbana y agrícola cerca de la ciudad de Denton, Texas, en la cuenca del “Clear Creek” (Arroyo Claro) y la planicie de inundación del “Elm Fork of the Trinity River” (Caño Olmo del Río Trinidad). Dicha planicie está situada entre dos embalses, “Ray Roberts” aguas arriba y “Lewisville” aguas abajo (Figura 1). La parte protegida de esta planicie cubre ~20 km² de la provincia biogeográfica de los “Cross-Timbers” (praderas surcadas por bosques). Cubierto históricamente por bosques en las áreas inundadas y por una combinación roble-sabana en las altiplanicies, esta zona es ahora un mosaico de vegetación herbácea y bosques en varios estadios de sucesión. La historia humana del área se ha borrado recientemente por cambios de uso generados por los granjeros y los rancheros, y ahora por los habitantes sub-urbanos. El área está experimentando actualmente un crecimiento residencial y comercial muy rápido. El condado de Denton duplicó su población en el periodo 1990 a 2004, duplicó el porcentaje de tierra desarrollada en el periodo 1995 a 2000, y aumento en 25% las unidades habitaciones en el periodo 2000 a 2005 (NTCOG, 2005). Veremos dos ejemplos

relacionados y aplicados a esta zona de estudio: en uno se describe la aplicación de un modelo hidrológico para la planificación del uso del territorio y el otro el uso de un MMA para entender la dinámica del proceso de CUT.

EJEMPLO: MODELO HIDROLOGICO

Existen muchos tipos de modelos hidrológicos; pero en cuanto a la forma como se maneja la distribución espacial se puede diferenciar entre modelos distribuidos y agregados. Los primeros dividen la cuenca en una rejilla (o mapa “raster” en la terminología de SIG) y se dan características diferentes a cada celda de la rejilla. Mientras que los modelos agregados dividen la cuenca en varias sub-cuencas (delimitadas por “polígonos” en la terminología SIG). A cada sub-cuenca se le asigna características diferentes. La resolución espacial (o nivel de detalle) aumenta a medida que las celdas (en el caso distribuido) o las sub-cuencas (en el caso agregado) sean más pequeñas. Así pues, el área de cada sub-cuenca es una variable muy importante para los modelos agregados (Jha et al. 2005).

Para analizar el ejemplo hemos usado el Sistema de Modelación Hidrológica (HMS) del “U.S. Corps of Engineers Hydrological Engineering Center” (HEC, Centro Hidrológico del Cuerpo de Ingenieros de los EEUU). En adelante nos referimos a este modelo como HEC-HMS (Duncan 2003, Upton 2004). Se seleccionó HEC-HMS por su versatilidad, simplicidad y popularidad. Las cuencas fueron delimitadas con el programa denominado ArcHydro que es una extensión del ArcView, un software de SIG.

En este ejemplo de modelo hidrológico agregado con el cual hemos explorado el efecto del tamaño de las sub-cuencas, desde 4 sub-cuencas de ~260 Km² hasta 59 sub-cuencas de ~18 km² (Redfearn 2005). El razonamiento de esta división fue el siguiente. En el Clear Creek, aproximadamente 100 Km de sus nacientes, hay una estación de aforo del Servicio Geológico de los EEUU (“US Geological Survey”, USGS) con el cual se pueden comprobar los resultados del modelo. Luego, unos 18 Km aguas abajo de dicha estación, Clear Creek tiene su confluencia con el río Trinidad, en la planicie de inundación del área de estudio, y el mismo desemboca en el embalse Lewisville. Se definieron dos puntos de drenaje: uno correspondiente a la estación de aforo y otro en la llegada del Río Trinidad al lago Lewisville. El área que drena al punto USGS es de 760 km² lo cual es muy extenso para un modelo agregado y así fue dividida en tres sub-cuencas: superior, media e inferior. El área que drena al punto del lago es de 265 km² lo cual es adecuado. Este total de 4 sub-cuencas es la resolución baja del modelo. Luego 59 sub-cuencas para alta resolución se generaron usando tributarios menores. Estas fueron combinadas de tal manera que hubiese cuatro partes para cada sub-cuenca de baja resolución. Esto dio lugar a 17 sub-cuencas de resolución media con área de 60 km² (Figura 2).

Para este ejemplo hemos seleccionado el método de NC del US Soil Conservation Service (SCS, Servicio de Conservación de Suelos de los EEUU) como método de pérdida (esto es el método para determinar el escurrimiento como función de la cobertura). Así mismo hemos explorado dos modelos para la conversión del escurrimiento en el hidrógrafo de esorrentía (es decir, el método de transformación). Se usó tanto el hidrógrafo del SCS como el hidrógrafo unitario de Clark.

Una vez delineadas las sub-cuencas, los parámetros del modelo se extraen usando un software de SIG para manipular los archivos de datos crudos. Las capas de suelos (por tipo hidrológico) y cobertura se usan para crear una capa raster de NC y promediando la misma dentro de cada polígono se obtiene el NC para cada sub-cuenca (Figura 2).

Se usaron el modelo digital de terreno (MDT) y los datos del National Land Cover Dataset (Datos Nacionales de Cobertura, NLCD) descargados del USGS Seamless Data Distribution System (USGS, 2005). Los suelos se tomaron de la base de datos de SSURGO. Los cursos de agua

se tomaron del USGS National Hydrography Dataset para la unidad hidrológica con código 12030103, que contiene al río Trinidad. La precipitación se tomó del radar meteorológico a partir del sistema NexRAD para la estación KFWS - DALLAS/FTW, TX (NCDC, 2005). Se seleccionó el producto nivel III, de precipitación de una hora (OHP). El MDT corregido para eliminar huecos se usó para derivar la dirección y acumulación de caudal, que fue usado para definir celdas en el curso de agua basado en el área de drenaje de ~1 ha. Luego se definió la segmentación de los ríos, con celdas pertenecientes al segmento con valores iguales. La información de NC para las sub-cuencas se ingresa al HEC. Aunque en promedio, el CN es aproximadamente 75 para todas las resoluciones, los tiempos de concentración promedio varían de 14.6, 7.5 y 3.6 horas, para baja, media y alta respectivamente.

Los modelos hidrológicos requieren de buena caracterización de la precipitación (Beven, 2001). Es importante que los valores de lluvia correctos ocurran en los momentos y sitios correctos de la cuenca. Esta es la premisa para la hipótesis que la resolución media y alta producen resultados más apropiados que la resolución baja. Los datos NexRAD fueron los correspondientes a intervalos de 5 minutos (Figura 3). Se diseñaron programas de SIG y de lenguaje R para producir series temporales de precipitación para cada sub-cuenca de cada una de las resoluciones. Se seleccionaron varios eventos importantes en varias épocas del año. Estas series se generaron a 5 y a 15 minutos para cada evento y se ingresan a HEC-HMS. Uno de los resultados más importantes de este esfuerzo es la variabilidad espacio-temporal de la lluvia, aun en esta cuenca relativamente pequeña. La Figura 4 muestra como para dos sub-cuencas (de resolución alta) se obtienen series temporales muy diferentes. La capacidad de generación de estas series es una de las posibilidades que aportamos en este trabajo. Para demostrar la ventaja de usar sub-cuencas de alta resolución comparamos en la Figura 5 el caudal medido en la estación de aforo con el caudal simulado para el evento correspondiente, vemos como aun con este modelo agregado simple podemos hacer una buena predicción del caudal real.

Una vez evaluado este modelo, procedemos a explorar con el mismo los efectos de escenarios de desarrollo o de CUT. En la Figura 6 mostramos escenarios de desarrollo en la zona de la sub-cuenca número 4 de baja resolución en los alrededores de la Ciudad de Denton. Nos hemos planteado escenarios de CUT con un horizonte de 50 años, en tres etapas de desarrollo: corto plazo 5-10 años, mediano plazo 20-30 años, y largo plazo 30-50 años. Ejecutamos el modelo para estos tres escenarios usando todos los eventos. Obtenemos como resultado que el pico de caudal aumenta hasta 8% del actual con la intensidad de CUT del escenario de largo plazo. Se obtienen además resultados correspondientes en acortamiento del tiempo al cual ocurre el pico de caudal.

EJEMPLO: MODELO ACOPLADOS

Los MMA son útiles para el análisis integrado del ambiente y políticas ambientales (Bousquet & Le Page 2004, Hare & Deadman 2004). Así pues se han reportado recientemente muchas aplicaciones de MMA para simular decisiones humanas y cambios en CUT (Deadman et al. 2004, Evans et al. 2001; Hoffman et al. 2002, Ligtenberg et al. 2001, Parker et al. 2003, Schneider et al., 2001). Estos modelos se han empleado para estudiar localización de áreas verdes en áreas urbanas como elemento dilatorio del crecimiento (Brown et al. 2004), cambios paisajísticos en áreas sub urbanas (Loibl & Toetzer, 2003), y deforestación de bosques tropicales (Huigen 2002, Lim et al. 2002, Moreno et al. 2007). Estos modelos son muy útiles cuando se enlazan con otros y con tecnologías geo-espaciales (Arima et al. 2005, Bhaduri et al. 2000, Mas et al. 2004); cuando incluyen la importancia de los factores socioeconómicos (Walker et al. 2002, Walker 2003, Aspinall 2004, Brown et al. 2000); cuando plantean aplicaciones de gerencia ambiental (Pahl-Wostl 2004, 2005); y cuando se usan para la integración de varias escalas de estudio (Evans & Kelley 2004).

Veremos como un segundo ejemplo de este artículo la aplicación de MMA al área de estudio descrita anteriormente (Monticino et al. 2007). Hemos diseñado un MMA que incluye como agentes los: dueños de tierras rurales, los residentes, los urbanizadores, y el gobierno local. El MMA captura rasgos relevantes de los procesos de decisión y preferencias de los agentes que conducen a cambios de cobertura. El objetivo del modelo es ayudar a revelar tendencias de cambio de CUT y así orientar a los entes que toman decisiones sobre las sensibilidades de CUT a las acciones de los grupos de presión. Las preferencias de los agentes pueden ser representadas explícitamente usando funciones de utilidad de múltiples atributos (v.g., Keeney & Raiffa, 1993). Estas funciones expresan las incertidumbres inherentes a las decisiones de los agentes cuando estos responden a oportunidades económicas dentro del contexto cultural y de gobierno. Por ejemplo, cuando los dueños de tierras consideran si hay que vender o aferrarse en su tierra, pesan la riqueza adicional que obtendrán de vender contra la integridad bio-cultural del lugar que ellos habitan. Comparado con una métrica puramente monetaria, este es un modo más realista de modelar las decisiones de CUT que la gente realmente toma.

Los agentes pueden alterar su preferencia en respuesta a las decisiones de otros agentes, a los cambios locales de gobierno y a los cambios de CUT. Por ejemplo, en respuesta al cambio de CUT que da lugar a mayor inundación local debido a la pérdida de superficie permeable, los agentes residenciales pueden ajustar su estructura de valor para poner un peso más alto en los efectos ambientales del desarrollo sub-urbano. Los agentes residenciales pueden también influenciar el cambio de los agentes del gobierno votando por un gobierno que ponga un peso más alto en consecuencias ambientales negativas de la política de desarrollo que en la maximización de la base de impuesto.

El MMA opera bajo varios escenarios sociales y económicos y recibe la reacción de los modelos del sistema natural. Estos modelos simulan como se afectan el paisaje y la hidrología por acciones de los agentes, y producen cambios en calidad del hábitat y del agua bajo escenarios climáticos. Estos cambios se pasan al modelo del sistema humano. En nuestro ejemplo, la métrica ambiental detectada por el modelo MMA es el pico de caudal, para reflejar que los residentes del área perciben esta métrica como consecuencia del aumento de urbanización del área.

Los agentes representan los individuos, los grupos de individuos, las organizaciones privadas y las instituciones gubernamentales que toman acciones que afectan el cambio de CUT, directamente o indirectamente. En nuestro ejemplo, solamente el agente urbanizador afecta directamente la CUT; cada agente no reacciona directamente a la acción de agentes vecinos, sino al estado actual del sistema que contiene la historia de últimas decisiones. Por ejemplo, la decisión de un dueño de tierra de vender la tierra es influenciada por el desarrollo de una tierra vecina (y no directamente por la acción de la venta del vecino). Por otra parte, el agente residencial y los agentes del gobierno obran recíprocamente. Los agentes del gobierno deciden sobre las ofertas de desarrollo basándose en protestas de los ciudadanos, y estos responden a las decisiones del agente del gobierno.

Mientras que los seres humanos reales llegan a una decisión con base a una multiplicidad de valores y de preferencias, los agentes en nuestros modelos disponen solamente de acciones limitadas en amplias categorías del cambio de CUT: así, mientras el tamaño de la parcela y de la casa puede ser una diferencia económica crucial para un urbanizador residencial, nuestros modelos caracterizan solamente los cambios de CUT que siguen la decisión de un dueño de tierra para vender la tierra forestal para la conversión al desarrollo residencial unifamiliar.

Los resultados de la simulación indican que al considerar los valores del agente en la formulación de la gerencia del crecimiento, se pueden lograr resultados más acertados. Las interacciones entre agentes produjeron dinámicas complejas, y las simulaciones revelaron las sensibilidades dominantes de estas dinámicas. Particularmente, la mayor sensibilidad a los factores principales del cambio de CUT fue hacia el precio de la tierra, el desarrollo de áreas vecinas, y las interacciones espaciales entre los dueños de tierras. Mientras que la sensibilidad a los valores

económicos no representa una sorpresa, las simulaciones revelaron otra sensibilidad que podría ser de importancia al interés gubernamental: los dueños de tierra tienden a aferrarse a sus tierras si las parcelas vecinas continúan sin urbanizarse. Por lo tanto si los gobiernos compraran parcelas o los derechos del desarrollo en forma de “espacios abiertos estratégicos” los dueños de tierras vecinos sensibles al CUT vecino se opondrían a la tentación de vender al ocurrir aumentos modestos en precios de la tierra. Así, los fondos de conservación para preservar espacios podrían ser más eficientes si se distribuyen en forma dispersa. Claro está, los gobiernos locales necesitarían estar enterados de los efectos potenciales de tal estrategia. El desarrollo de una densidad más baja da lugar a costes más altos para la distribución de los servicios. Sin embargo, tal estrategia ayudaría en última instancia a alcanzar la meta de sostener los sistemas humanos y naturales.

CONCLUSIONES

Con base a los resultados, consideramos que el incremento de la resolución espacial de los modelos hidrológicos produce buenos resultados aun con modelos agregados y con mecanismos relativamente simples. Gran parte de la razón estriba en una buena representación de la precipitación, lo cual se logra con la tecnología de radar. Aun más, la alta resolución temporal de dichos instrumentos, es también una contribución importante al mejor rendimiento de estos modelos. El planteamiento de los cambios de cobertura debido a escenarios de desarrollo o CUT permite utilizar los modelos hidrológicos para comprender los cambios de caudal debidos a los CUT. Hemos formulado modelos MMA que incluyen una representación de las fuerzas impulsoras de los CUT. El modelo MMA permite la representación de las decisiones humanas con la ventaja de una representación espacial que pueda capturar la localización y la magnitud del CUT. Las simulaciones produjeron los patrones cualitativos de CUT similares a éstos observados. Esto ayuda a validar el enfoque de modelos mientras se obtiene métodos más cuantitativos de evaluación.

RECONOCIMIENTOS

Este artículo resultó de los trabajos parte de un proyecto de Biocomplejidad en el ambiente financiado por la Fundación Nacional de Ciencia de los E.E.U.U. (subvención NSF CNH BCS-0216722). Se agradece la participación de los miembros del equipo de dicho proyecto: Michael Monticino, Baird Callicott, y Jenny Palomino.

FIGURAS

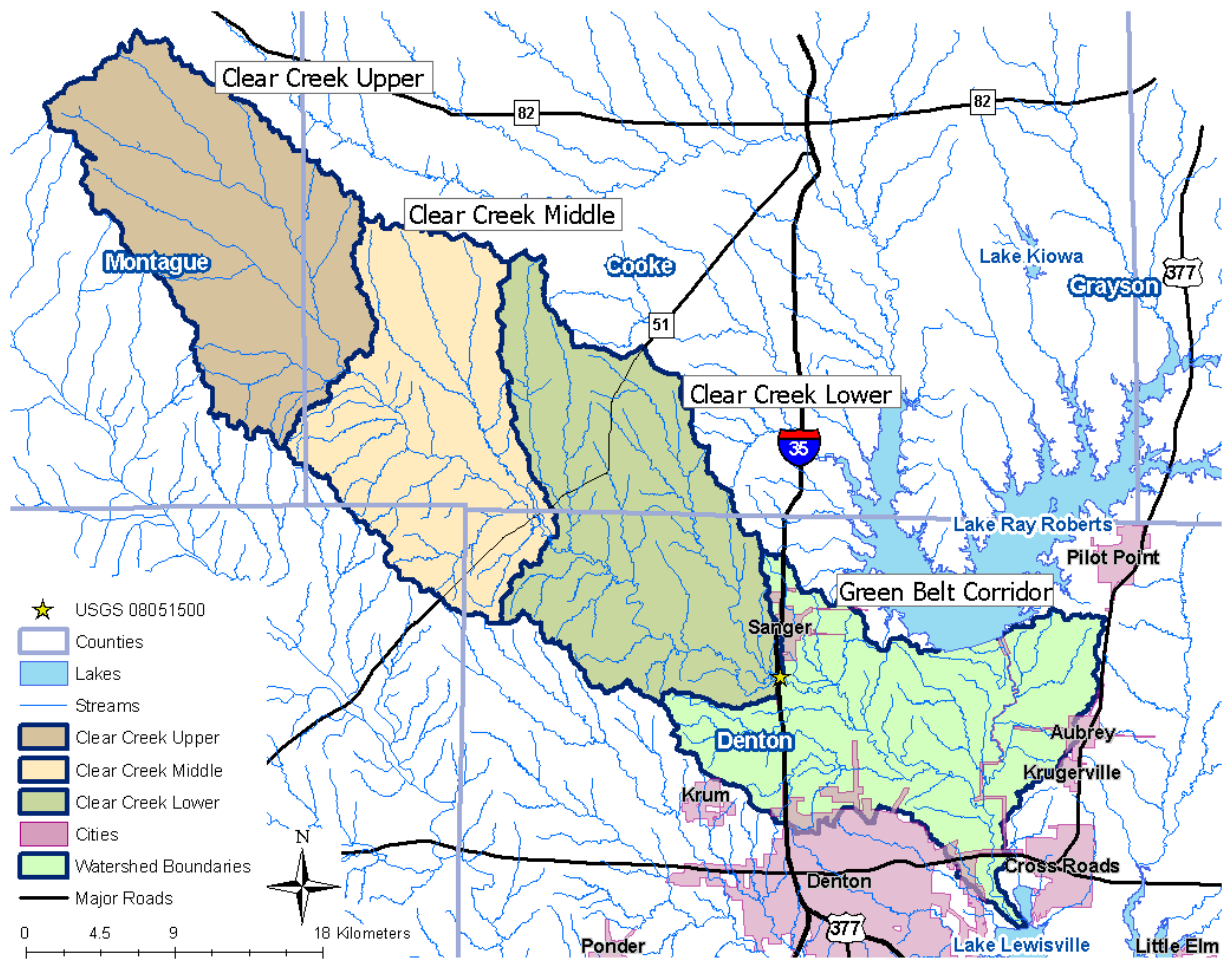


Figura 1 Área de estudio: Cuenca de Clear Creek y el Greenbelt Corridor (Redfearn 2005)

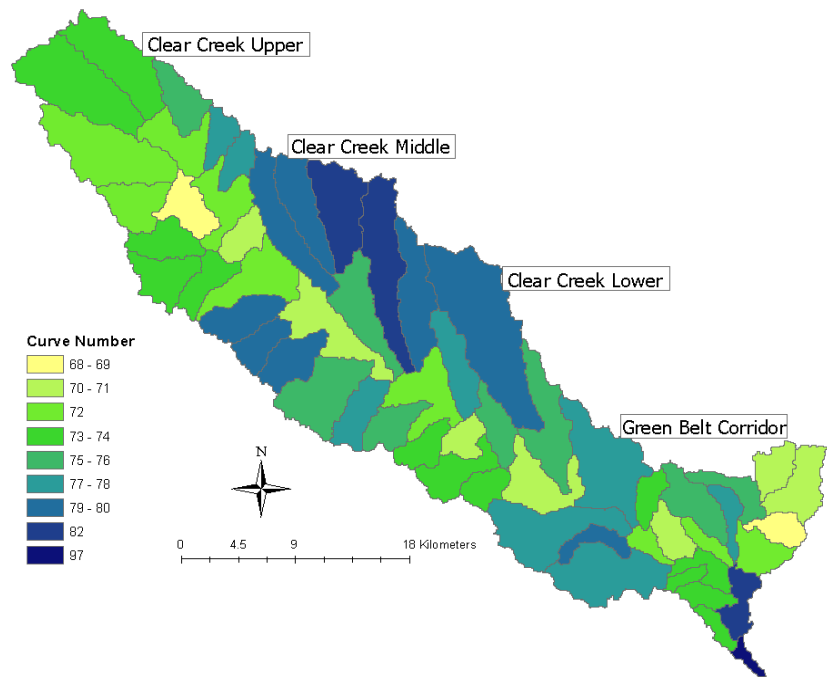


Figura 2 Cuenca de Clear Creek y el Greenbelt Corridor dividido en 59 sub-cuencas con color asignado de acuerdo con el NC de cada una de ellas (Redfearn 2005).

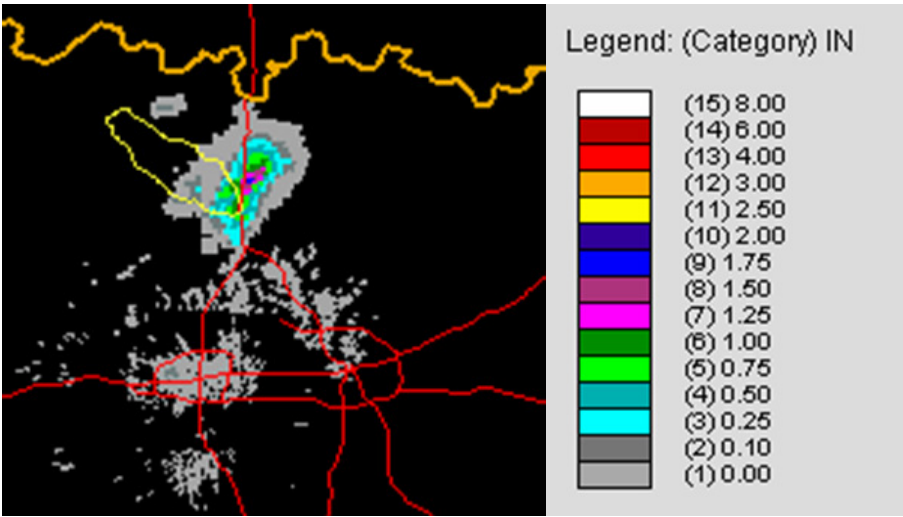


Figura 3 Un ejemplo de datos de radar sobre la cuenca del Clear Creek

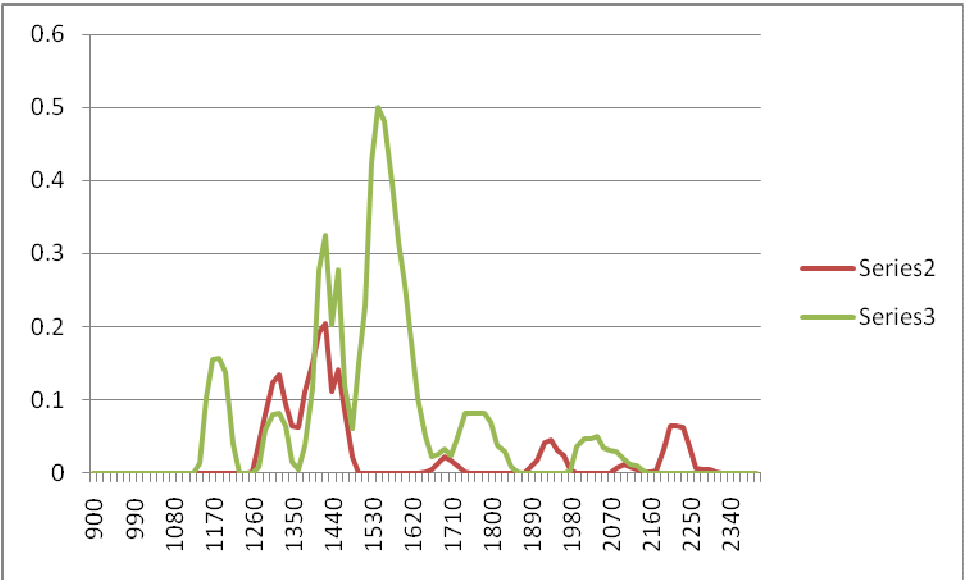


Figura 4 Series de tiempo de lluvia para dos subcuencas para un evento de junio

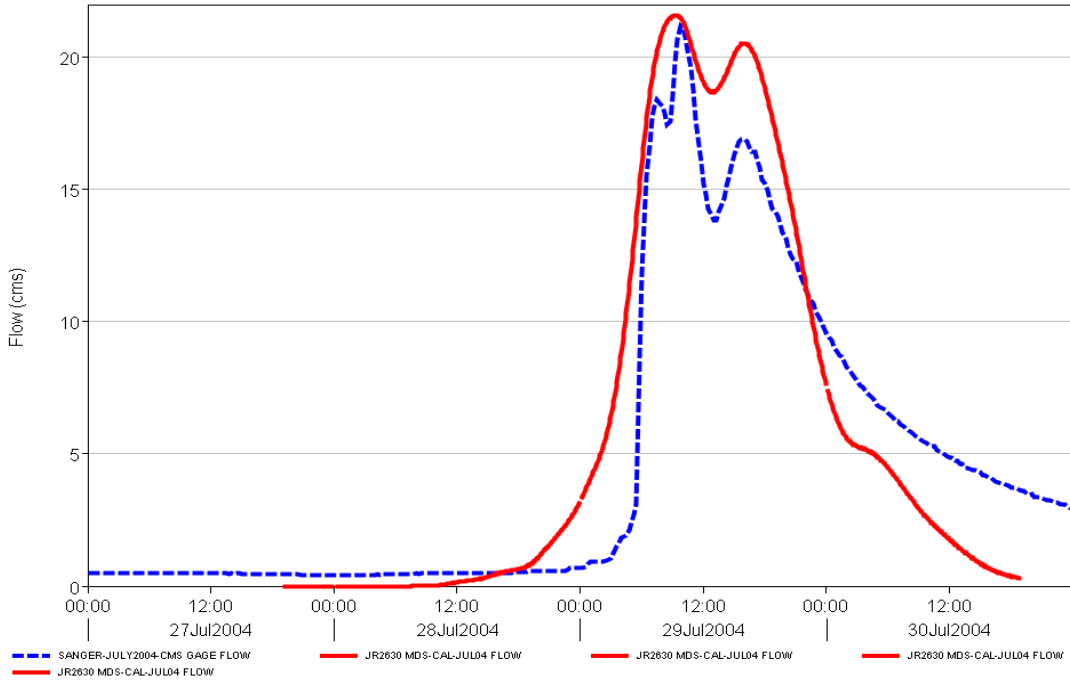


Figura 5 Ejemplo de comparación de Hidrógrafo simulado y medido (Redfearn 2005).

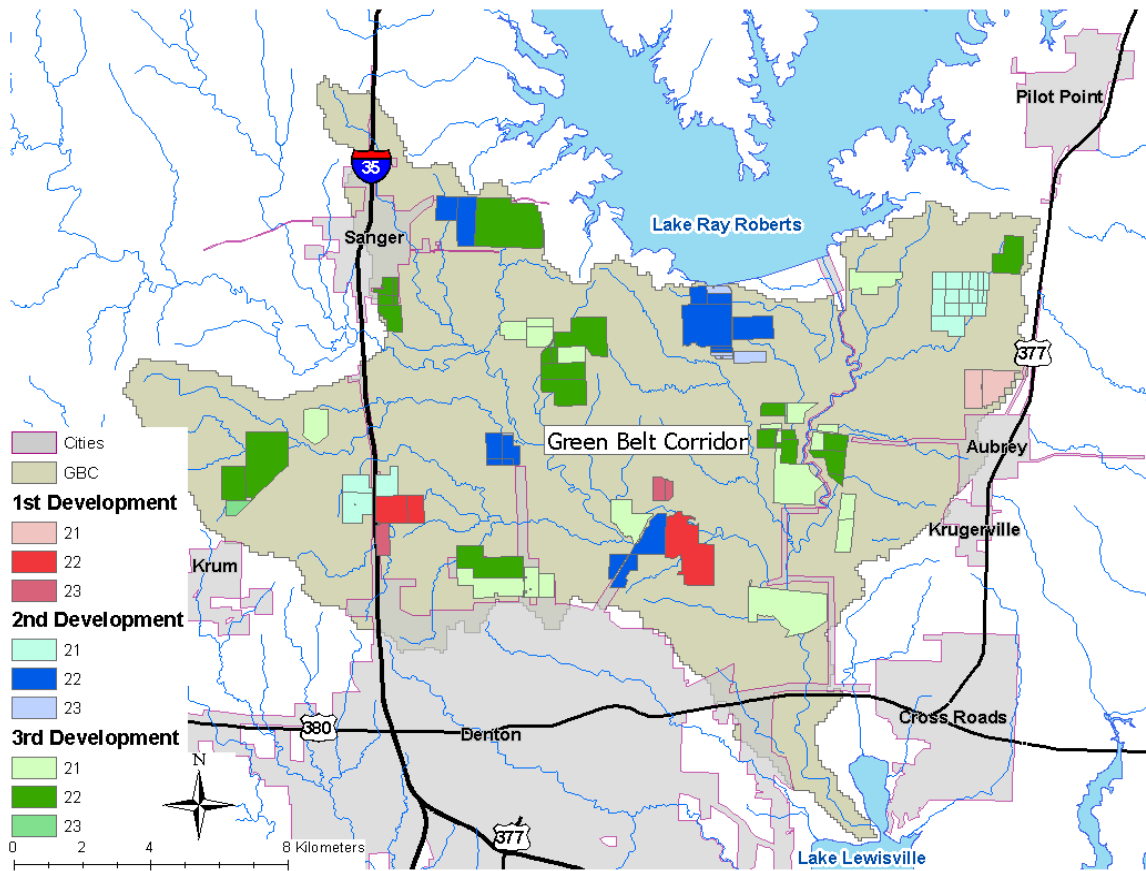


Figura 6 Cambios de cobertura predichos para el área de estudio (Redfearn 2005).

REFERENCES

- Acevedo M.F, J. Rosales, L. Delgado, M. Ablan, J. Davila, J. B. Callicott, M. Monticino. 2007 Modelos de interacción humano-ambiental: el enfoque de la Biocomplejidad *Ecosistemas*, 16(3): 55-67.
- Arima, E.Y., Walker, R.T., Perz, S.G., Caldas, M., 2005. Loggers and forest fragmentation: behavioral models of road building in the Amazon Basin. *Annals of the Association of American Geographers* 95(3), 525-541.
- Aspinall, R., 2004. Modelling land use change with generalized linear models—a multi-model analysis of change between 1860 and 2000 in Gallatin Valley Montana. *Journal of Environmental Management* 72(1-2), 94-103.
- Beven K. 2001. Rainfall-runoff modeling: The Primer. Wiley & Sons.
- Bhaduri, B., Harbor, J., Engel, B., Grove, M., 2000. Assessing watershed-scale, long-term hydrologic impacts of land-use change using a GIS-NPS model. *Environmental Management* 26(6), 643-658.
- Bousquet, F., Le Page, C., 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling* 176, 313-332.
- Brown, D.G., Pijanowski, B.C., Duh, J.D., 2000. Modelling relationships between land use and land cover on private lands in the Upper Midwest, USA. *Journal of Environmental Management* 59(4), 247-263.
- Brown, D.G., Page, S.E., Riolo, R., Rand, W., 2004. Agent-based and analytical modelling to evaluate the effectiveness of greenbelts. *Environmental Modelling & Software*, 19(12): 1097-1109.
- Cheng, S. y Wang, R., 2002. An approach for evaluating the hydrological effects of urbanization and its application. *Hydrological Processes*, 16:1403-1418.
- Duncan P. B. 2003. *Modeling of land use change effects on storm water quantity and quality in the City of Carrollton and the North Texas area*. Dissertation (PhD) in Biological Sciences. University of North Texas.
- Garen, D., y Moore, D. 2005. Curve number hydrology in water quality modeling: uses, abuses, and future directions. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(2):377-388, 2005.
- Hare, M., Deadman, P., 2004. Further towards a taxonomy of agent-based simulation models in environmental management. *Mathematics and Computers in Simulation* 64, 25-40.
- Hoffman, M., Kelly, H., Evans, T., 2002. Simulating land-cover change in Indiana: an agent-based model of de/reforestation. In: Janssen, M.A. (Ed.), *Complexity and Ecosystem Management: The Theory and Practice of Multi-agent Systems*. Edward Elgar Publisher, Northampton, pp. 218-247.
- Huigen, M.G.A., 2002. Spatially explicit Modelling of land-use change in the Sierra Madre, Philippines, The MameLuke Project. In: Parker, D.C., Berger, T., Manson, S.M. (Eds), *Agent-based models of land-use and land-cover change*. Report and Review of an International Workshop Irvine, California October 4–7, 2001. Bloomington, Indiana: LUCC International Project Office.
- Jha, M., Gassaman, P., Secchi, S., Gu, R., and Arnold, J. 2004. Effect of watershed subdivision on SWAT flow, sediment, and nutrient predictions. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(3):811-825.

- Keeney, R.L., Raiffa, H., 1993. *Decisions with Multiple Objectives*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Lepers, E., Lambin, E.F., Janetos, A.C., DeFries, R., Achard, F., Ramankutty, N., Scholes, R.J., 2005. A Synthesis of Information on Rapid Land-cover Change for the Period 1981-2000. *Bioscience* 55, 115-124.
- Ligtenberg, A., Bregt, A.K., v. Lammeren, R., 2001. Multi-actor-based land use modelling: spatial planning using agents. *Landscape and Urban Planning* 56, 21-33.
- Lim, K., Deadman, P., Moran, E., Brondizio, E., McCracken, S., 2002. Agent based simulations of household decision making and land use change near Altamira, Brazil. In: Gimblett, H.R. (Ed.), *Integrating geographic information systems and agent-based Modelling techniques for simulating social and ecological processes*. Oxford University Press, Oxford, pp. 277-309.
- Loibl, W., Toetzer, T., 2003. Modelling growth and densification processes in suburban regions – simulation of landscape transition with spatial agents. *Environmental Modelling and Software* 18, 553-563.
- Mas, J.F., Puig, H., Palacio, J.L., Sosa-Lopez, A., 2004. Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks. *Environmental Modelling and Software* 19, 461-471.
- Monticino M., Acevedo M.F., Callicott J.B., Cogdill T., Lindquist C. 2007. Coupled Human and Natural Systems: A Multi-Agent Based Approach. *Environmental Modeling and Software*. 22:656-663.
- Moreno N., Quintero R., Ablan M., Barros R., Dávila J., Ramírez H., Tonella G., Acevedo M.F. 2007. Biocomplexity of deforestation in the Caparo tropical forest reserve in Venezuela: an integrated multi-agent and cellular automata model. *Environmental Modeling and Software*. 22:664-673.
- NTCOG, 2005. North Central Texas Council of Governments. Demographic Estimates. Retrieved 10/12/2005. Available from: <<http://www.nctcog.org/>>.
- Pahl-Wostl, C., 2004. The implication of complexity of integrated resources management. In Pahl-Wostl, C., Schmidt, S., Rizzoli, A.E., Jakeman, A.J., (Eds), *Complexity and Integrated Resources Management: Transactions of the 2nd Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society (IEMSS)*, volume 1. IEMSS, Manno, Switzerland, pp. 25-33.
- Pahl-Wostl, C., 2005. Information, public empowerment, and the management of urban watersheds. *Environmental Modelling and Software* 20, 457-467.
- Parker, D.C., Manson, S. M., Janssen, M.A, Hoffman, M.J., Deadman, P., 2003. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review. *Annals of the Association of American Geographers* 93, 313-337.
- Post, D., Jakeman, A., Littlewood, I., Whitehead, P., Jayasuriya M., 1996. Modelling land-cover-induced variations in hydrologic response: Picaninny Creek, Victoria. *Ecological Modelling*, 86: 177-182.
- Redfearn, H. 2005. *Rainfall-Runoff Changes due to Urbanization: A Comparison of Different Spatial Resolutions For Lumped Surface Water Hydrology Models Using HEC-HMS*, Master of Science (Environmental Science), University of North Texas, August 2005.
- Rose, S. y Peters, N. 2001. Effects of urbanization on streamflow in the Atlanta area (Georgia, USA): a comparative hydrological approach. *Hydrological Processes*, 15:1441-1457.

Acevedo, Modelación de los cambios de cobertura del territorio y sus consecuencias hidrológicas.

Upton, A.C. 2004. *Simulation of local watershed nutrient and sediment delivery to Lake Texoma*. Master's of Science (Environmental Science). University of North Texas.