

I. Hoja resumen

Título del proyecto: **Comprensión de los procesos de cambio de uso del suelo y el crecimiento urbano mediante su modelación basada en agentes espacialmente explícita.**

Grado del responsable del proyecto: **Doctorado**

Responsable del Proyecto: **Gustavo Manuel Cruz Bello**

Colaboradores: **Laura Elisa Quiroz Rosas, Samantha Camacho Guadarrama**

Cuerpo académico:

Línea (s) General (es) de Aplicación del Conocimiento: (si aplica)

Disciplina: **Análisis Regional**

Especialidad: **Geomática**

Otras instituciones participantes: No

Fecha de inicio: **Noviembre 2015**

Fecha de terminación: **Abril 2017**

II. Planteamiento, justificación y descripción general del proyecto (resumen)

En diversas partes del mundo se han generado modelos de cambio de uso y cobertura del suelo, sin embargo, su ajuste depende del contexto espacial donde se apliquen. Considerando que las condiciones en México difieren de otros países (sobre todo de aquellos del primer mundo donde han sido desarrollados), es pertinente probar diferentes modelos para determinar cuál de ellos tiene un mejor ajuste para predecir el cambio de uso y cobertura del suelo en condiciones disímiles como las que corresponden a áreas peri-urbanas y rurales. Más apropiado aún es generar modelos ad hoc que capturen la complejidad de las interacciones entre los elementos y factores que detonan y determinan los procesos de cambio en el uso y cobertura del terreno. Una opción que ha mostrado éxito para capturar y representar esta complejidad es la modelación basada en agentes. En ésta las entidades o agentes son capaces de adaptarse al interactuar y aprender de otros agentes y del ambiente en el que se encuentran (Manson 2005). Con esto se facilita entender los procesos de cambio y generar escenarios futuros más exactos con base en reglas emanadas de su propia caracterización. Por tanto estas reglas deben capturar la interacción de los agentes desde el nivel local hasta el nivel regional en relación a como las necesidades sociales determinan los cambios de uso del suelo. La predicción de los patrones de uso del suelo es particularmente útil en México dada la debilidad regulatoria y de planeación de las instituciones encargadas de ordenar el territorio. Los resultados de este proyecto permitirán una mejor comprensión de los procesos de cambio de uso del suelo y crecimiento urbano en zonas rurales y peri-urbanas del poniente de la Cuenca de México y podrán servir de sustento para el desarrollo de escenarios tendenciales y programáticos que den soporte a la toma de decisiones territoriales.

III. Proyecto de investigación

1. Introducción, antecedentes y justificación

Si bien es cierto que se han generado diversos modelos de cambio de uso y cobertura del suelo desde diferentes perspectivas y objetivos diversos, cada uno tiene requerimientos específicos de datos (Brown et al. 2004), por lo que algunas veces son difíciles de aplicar debido a la escasa o nula información disponible. En particular, para México son pocos los intentos de modelar el cambio de uso y cobertura del suelo (por ejemplo Manson 2005; Rosete 2008; Mas y Flamenco 2011; Ramírez-Mejía et al. 2011), y su aplicación se hace sobre un área en particular sin comparar el desempeño del modelo en diferentes condiciones como las que podrían representar las áreas peri-urbanas y rurales. Más aún en la literatura internacional son escasos los estudios que comparan los modelos, y pocas veces lo hacen para diferentes ambientes de desarrollo, por ejemplo Robinson et al. 2007, quienes no hacen propiamente una comparación de los modelos sino de los enfoques de modelación basada en agentes para investigar los temas de cambio de uso del suelo; por su parte Mas et al. 2014 hacen una comparación de cuatro modelos, pero no lo prueban en condiciones reales sino que emplean una base de datos virtual hipotética.

Bajo este contexto es pertinente comparar el desempeño de diferentes modelos para predecir el cambio de uso y cobertura del suelo en dos condiciones reales con características disímiles como las que corresponden a áreas peri-urbanas y rurales. Más aun, es importante generar modelos *ad hoc* que capturen la complejidad de las relaciones entre los elementos y factores que determinan los procesos de cambio del uso y cobertura del terreno. Una opción que ha mostrado éxito para capturar y representar esta complejidad son los *modelos basados en agentes*, donde las entidades o agentes son capaces de adaptarse al interactuar y aprender de otros agentes y del ambiente en el que se encuentran (Manson 2005).

Estos modelos, además de facilitar la comprensión de los procesos de cambio, permiten generar escenarios futuros con base en reglas emanadas de su caracterización. Estas reglas deben capturar la interacción de los agentes desde el nivel local hasta el nivel regional en relación a como las necesidades sociales determinan los cambios de uso del suelo. Contar con modelos que hagan una predicción más exacta de los patrones de uso del suelo es particularmente útil en México dada la debilidad que actualmente presentan las instituciones encargadas de ordenar el territorio. Los resultados de este proyecto

servirán de soporte para la elección y diseño de modelos que permitan desarrollar, con mayor exactitud, escenarios tendenciales y programáticos que son la base de la planeación territorial.

2. Objetivos

General:

Entender las dinámicas de cambio de uso del suelo mediante la generación de modelos espacialmente explícitos basados en agentes en dos diferentes ambientes de desarrollo en la Cuenca de México: áreas peri-urbanas y rurales.

Específicos:

- ✓ Caracterizar el cambio de uso del suelo en los dos ambientes de desarrollo
- ✓ Comparar el desempeño de modelos ampliamente reportados en literatura especializada, para reproducir los cambios de uso de suelo ocurridos en los dos ambientes de estudio.
- ✓ Desarrollar nuevos modelos de cambio de uso del suelo espacialmente explícitos empleando Modelación Basada en Agentes para: áreas peri-urbanas y rurales.

3. Preguntas de investigación

¿Es posible predecir el cambio de uso del suelo mediante la modelación basada en agentes de forma más exacta que con otros métodos?

4. Hipótesis general (si aplica):

La modelación basada en agentes permitirá modelar con mayor exactitud el crecimiento urbano en regiones peri-urbanas y rurales de la región poniente de la Cuenca de México al capturar las dinámicas socioeconómicas de los agentes.

5. Marco teórico

Los modelos de cambio de uso o cobertura del suelo son empleados como herramientas de aprendizaje para formalizar el conocimiento sobre estas dinámicas. Debido a que experimentos reales no son viables, los modelos computacionales son el laboratorio donde se pueden probar hipótesis acerca de los procesos de cambio de uso del suelo. Así mismo los modelos son un mecanismo de comunicación entre científicos y pueden ser

usados para expresar fenómenos e ideas en forma que logren ser entendidos por investigadores de diferentes disciplinas así como por tomadores de decisiones (van der Leeuw 2004; Verburg et al. 2006). El modelado involucra representar las interacciones de los sistemas terrestres con la finalidad de entender las dinámicas y predecir su desarrollo a futuro (Verburg et al.2006).

6. Metodología

El proyecto consiste en tres etapas: 1) La caracterización del cambio de uso del suelo, 2) la comparación de modelos y 3) el desarrollo de modelos basados en agentes, las cuales se llevarán a cabo en dos áreas de estudio con diferentes características: áreas peri-urbanas y rurales. Estas dos condiciones se estudiarán en delegaciones y municipios de la región poniente de la Cuenca de México.

Caracterización de la dinámica y generación de insumos

La primera etapa servirá para sentar las bases para entender las dinámicas de cambio de uso del suelo, así como para generar los insumos requeridos tanto por los modelos a comparar como para el desarrollo e implementación de los modelos basados en agentes. En esta etapa se analizarán las causas estructurales y tendencias del cambio de cobertura y uso del suelo. Así, se estudiará la dinámica de transformación para zonas peri-urbanas y rurales. Se aplicará un análisis geoespacial para describir y entender las transformaciones espacio-temporales del territorio así como sus causas. Para esto se usará información catastral, demográfica, de los límites históricos de las clases de cobertura y un análisis matricial para analizar el cambio. Este diagnóstico incorporará un análisis de métricas de ecología del paisaje para evaluar los procesos de fragmentación de las diversas coberturas del terreno en el tiempo.

En particular en esta etapa:

- 1) Se caracterizará el proceso de cambio de uso del suelo y en particular el de crecimiento urbano mediante la clasificación supervisada de imágenes de satélite SPOT de 1994, 2000, 2006 y 2014. Para las dos primeras fechas se comprarán imágenes SPOT 4. Las imágenes de las dos fechas más recientes se adquirirán de la Estación ERMEX. A todas las imágenes se les realizará una corrección atmosférica y geométrica.

- 2) Se identificarán mediante un análisis de regresión geográficamente ponderado los factores socioeconómicos, demográficos y ambientales que determinan el cambio de uso de suelo.
- 3) A partir de la clasificación de las imágenes SPOT se identifican los tipos generales de crecimiento urbano: crecimiento de relleno (donde una zona aislada o unidad de observación dentro de áreas construidas está cambiando a una superficie impermeable); crecimiento de expansión (donde áreas no desarrolladas, vecinas a un área urbana están siendo convertidas a zonas urbanizadas); crecimiento en la periferia (caracterizado por un área no desarrollada que es cambiada a una zona urbanizada, con la característica de que se encuentra a cierta distancia de otras áreas urbanas) (Civco et al., 2002 y Hurd et al. 2003).

Comparación de modelos

Esta comparación estará centrada en modelos espacialmente explícitos que han sido aplicados en diferentes países:

1) GEOMOD

GEOMOD es un modelo empírico que emplea diversas capas de información para extrapolar los patrones de uso del suelo de un tiempo a otro en el futuro. En particular los insumos del modelo son: elevación del terreno, rutas de transporte (carreteras, tren, barco, etc.), hidrología superficial, mapas de uso del suelo de dos fechas, datos de la población del mismo periodo y datos de temperatura y precipitación (Hall et al. 1995; Pontius et al., 2001).

2) SLEUTH

Este modelo ha sido ampliamente usado a nivel mundial (Sangawongse et al. 2005; Rafiee et al. 2009; KantaKumar et al. 2011) y está basado en técnicas de autómatas celulares, que usan una red de celdas de datos geográfico-espaciales históricos. Este modelo requiere información sobre la pendiente, exposición y cobertura del terreno, áreas de exclusión para crecimiento urbano (por ejemplo áreas naturales protegidas). Así mismo, emplea coberturas del área urbana y las rutas de transporte (carreteras, tercerías, caminos, etc.), para cuatro diferentes épocas (Clarke et al., 1997; Clarke y Gaydos 1998).

3) LCM (Land Change Modeler)

El Modelo de evaluación del cambio del suelo (LCM por sus siglas en inglés) analiza el cambio en las cubiertas del suelo, proyectando resultados para el futuro, al tiempo que analiza las implicaciones que estos cambios en la cubierta terrestre, supondrán en la alteración de hábitats y de la biodiversidad. Integrado en el Sistema de Información Geográfica Idrisi a partir de su desarrollo por el Center for Biodiversity Conservation of Conservation Internacional, el LCM está orientado a ofrecer soluciones específicas a los análisis efectuados para conservación de la biodiversidad frente a la creciente presión de transformación de las cubiertas y usos del suelo.

La validación de las predicciones generadas mediante los tres modelos (GEOMOD, SLEUTH y LCM) se realizará evaluando: 1) la concordancia entre la predicción y el mapa de referencia de la misma fecha; 2) la correlación entre la predicción final con el modelo nulo que asume la persistencia de la distribución y superficie ocupada por las diferentes clases de cobertura y uso del suelo, y 3) la similitud entre la predicción final y un modelo al azar que predice crecimiento uniforme en el paisaje (Pontius et al., 2004).

Adicionalmente se empleará el Índice Lee-Sallee, el cual mide la concordancia entre dos polígonos (Bojórquez-Tapia et al. 2009). En este caso, el índice medirá el grado de coincidencia entre dos polígonos de la misma categoría de cobertura/uso del suelo entre la predicción y el mapa de referencia.

Los mapas de referencia más recientes se generarán mediante clasificación supervisada de imágenes de satélite SPOT. Se realizarán salidas a cada una de las áreas de estudio (peri-urbana y rural) donde se probarán los modelos, esto con la finalidad de coleccionar campos de entrenamiento para alimentar los algoritmos de clasificación de las imágenes de satélite y visitar los sitios de validación de los mapas de referencia del tiempo final.

En particular en esta etapa:

Se integrarán las bases de datos insumo de los tres modelos a comparar y se instrumentarán dichos modelos. Para GEOMOD se emplearán capas rasterizadas de uso del suelo y otras características biológicas y físicas del terreno.

Para SLEUTH se emplearán capas de cuatro fechas históricas de uso del suelo, la capa de caminos, el modelo de elevación digital del terreno.

Instrumentación de los modelos basados en agentes

Considerando que el proceso de cambio de cobertura o uso del suelo es complejo y que en él intervienen diferentes factores interdependientes no relacionados de forma lineal, para su modelación se requiere instrumentar una aproximación que considere dicha complejidad. Para esto se empleará la Modelación Basada en Agentes, donde cada entidad o “agente” tiene sus propios objetivos y comportamientos basados en reglas, y es capaz de adaptarse modificando su comportamiento de forma autónoma (Crooks y Heppenstall 2012; Railsback y Grimm 2012). Como se ha mencionado, esta técnica ha sido ampliamente usada para modelar el cambio de uso y cobertura del suelo debido a que permite tomar en cuenta -de manera formal y espacialmente explícita- las decisiones humanas sobre el uso del suelo (Matthews et al. 2007). Dicha técnica se aplicará para los dos tipos de ambientes definidos con anterioridad.

El modelo que se generará para la predicción del cambio de uso y cobertura del terreno estará compuesto de sub-modelos. El primero consiste en una representación del terreno basado en autómatas celulares, y el segundo es un sub-modelo basado en agentes, donde se representan las decisiones humanas sobre el territorio y las interacciones entre los diferentes agentes con otros agentes o con su ambiente, y el cual contiene tanto las reglas que rigen estas interacciones como la secuencia en que se presentan (Berger et al. 2002).

Con el objeto de mejorar los modelos generados y definir nuevas líneas de investigación referentes al modelado del cambio de cobertura y uso del suelo, se efectuará la validación de los modelos empleando la metodología descrita en el apartado de comparación de modelos (ver Pontius et al., 2004 y Bojórquez-Tapia et al. 2009).

En particular en esta etapa:

Se instrumentará la modelación basada en agentes del cambio de uso del suelo y el crecimiento urbano mediante el lenguaje de programación Netlogo, el cual ha sido ampliamente usado para modelar este tipo de procesos. Se empleará la extensión GIS para hacerlo espacialmente explícito utilizando para esto las capas geo-referidas. Las reglas que determinan el comportamiento de los agentes en relación con otros agentes y con su ambiente provendrán tanto de la caracterización realizada en la primera etapa

como del análisis de los resultados e insumos utilizados en la comparación de los modelos.

Bibliografía

Berger, T., H. Couclelis, S.M. Manson, D.C. Parker. 2002. Introduction and Conceptual Overview. En Parker, D.C., T. Berger, M. Manson (eds.). Agent-Based models of land-use and land-cover change. Report and Review of an International Workshop, October 4-7, 2001. LUCC International Project Office, Indiana University.

Bojórquez-Tapia, L.A., G.M. Cruz-Bello, L. Luna-González, L. Juárez, M.A. Ortiz-Pérez. 2009. V-DRASTIC: Using Visualization to Engage Policymakers in Groundwater Vulnerability Mapping. *Journal of Hydrology* 373: 242-255.

Brown D.G., R. Walker, S. Manson, K. Seto. 2004. Modeling land use and land cover change. En: Gutman, G., A.C. Janetos, Ch. Justice, E.F. Moran, J.F. Mustard, R.R.Rindfuss, D. Skole, B. L. Turner II, M.A. Cochrane (eds.) *Land Change Science. Observing, Monitoring and Understanding Trajectories of Change on the Earth's Surface*. Kluwer Academic Publisher. Holanda. 395-409 pp.

Clarke, K.C., S. Hoppen, L. Gaydos. 1997. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environmental and Planning B: Planning and Design* 24: 247-261.

Clarke, K.C., L. Gaydos. 1998. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *Int. J. Geographical Information Science* 12(7):699-714.

Crooks, A.T., A.J. Heppenstall. 2012. Introduction to Agent-Based Modelling. En Heppenstall, A.J., A.T. Crooks, M. Batty (Editores). *Agent-Based Models of Geographical Systems*. Springer, EUA. 85-105 pp.

Cruz, M.S. 2002. Procesos urbanos y "ruralidad" en la periferia de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbano*, enero-abril, número 049, El Colegio de México, México, pp. 39-76.

Hall, C.A.S., H. Tian, Y. Qi, G. Pontius, J. Cornell, J. Uhlig. 1995. Modeling spatial and temporal patterns of tropical land use change. *J. of Biogeography* 22: 753-757.

KantaKumar, L., N. G. Sawant, S. Kumar. 2011. Forecasting urban growth based on GIS, RS and SLEUTH model in Pune metropolitan area. *Int. J. Geomatics Geoscience*. 2: 568 – 579.

Manson, S.M. 2005. Agent-based modeling and genetic programming for modeling land change in Southern Yucatán Peninsular Region of Mexico. *Agriculture Ecosystems & Environment* 111: 47-62.

- Mas, J.F., A. Flamenco. 2011. Modelación de los cambio de cobertura/uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTropico*5(1): 1-24.
- Mas, J.F., M. Kolb, M Paegelow, M. Camacho, T. Houet. 2014. Modelling Land use/cover changes: a comparison of conceptual approaches and softwares. *Environmental Modelling and Software* 51:94-111.
- Matthews, R.B., N.G. Gilbert, A. Roach, J.G. Polhill, N.M. Gotts. 2007. Agent-based land-use models: a review of applications. *Landscape Ecology* 22: 1447-1459.
- Polhill, J.G. 2009. Agent-based modeling of socio-economic processes related to the environment: Example of land-use change. En Baveye, P., J. Myslak, M. Laba (eds.). *Uncertainties in environmental Modelling and Consequences for Policy Making*. Springer, Holanda. 61-76 pp.
- Pontius Jr, R.G., J. Cornell, C. Hall. 2001. Modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: application and validation for Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 85: 191-203.
- Pontius Jr., R.G., D. Huffaker, K Denman. 2004. Useful techniques for spatially explicit land-change models. *Ecological Modelling* 179:445-461.
- Rafiee, R., A.S. Mahiny, N. Khorasani, A.A. Darvishsefat, A. Danekar. 2009. Simulating urban growth in Mashad City, Iran through the SLEUTH model (UGM). *Cities* 26: 19–26.
- Railsback, S.F., v. Grimm. 2012. *Agent-Based and Individual-Based Modeling*. Princeton University Press. EUA. 352 p.
- Ramírez-Mejía, D., G. Cuevas, E. Mendoza. 2012. Escenarios de cambio de cobertura del suelo en el Corredor Biológico Mesoamericano-México. *Memorias XIX Reunión Nacional SELPER, Morelia, Michoacán, Octubre 2011*. 114-121 pp.
- Robinson, D.T., D.G. Brown, D. Parker, P. Schreinemachers, M.A. Janssen, M. Huigens, H. Wittmer, N. Gotts, P. Promburom, E. Irwin , T. Berger, F. Gatzweiler, C. Bernaud. 2007. Comparison of empirical methods for building agent-based models in land use science. *Journal of Land Use Science* 2: 31-55.
- Rosete, F.A. 2008. Modelos predictivos de cambio del uso del suelo en la Península de Baja California, México. Tesis de Doctorado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras- Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Sangawongse, S., C.H. Sun, B.W. Tsai. 2005. Urban growth and land cover change in Chiang Mai and Taipei: results from the SLEUTH model. *Proceedings of MODSIM 2005, the International Congress on Modeling and Simulation on Australia and New Zealand, Melbourne, Australia*.

8. Fuentes de financiamiento

Financiamiento Externo (solicitado): Programa para el Desarrollo Profesional Docente para el Tipo Superior de la SEP.

Rubro	Descripción	Monto	Justificación
Equipo	2 equipos navegadores GPS 3 cámaras fotográficas	\$31,000.00	Colecta de datos en campo para documentar los tipos de uso de suelo y las condiciones socioeconómicas de las áreas de estudio.
Materiales y Consumibles	Material cartográfico y estadístico, fotografías aéreas e imágenes de satélite de alta resolución. Memorias para las cámaras, discos duros externos	\$75,000.00	Caracterización y verificación de resultados. Colecta y almacenaje de la información del proyecto.
Beca para Estudiante	Apoyo económico a estudiante de la Licenciatura en Estudios Socioterritoriales.	\$25,587.00	El estudiante generará las bases de datos espaciales y las corridas de los modelos SLEUTH y Geomod. Se espera de aquí se derive su proyecto terminal.

Estancias Cortas	Boletos de avión Hospedaje Alimentación Transportación terrestre	\$25,000.00	Estancia en la Humboldt State University, California, EUA, dónde se afinarán las técnicas de modelado basado en agentes mediante el software Netlogo para modelar el cambio de uso del suelo. Se espera que la experiencia adquirida sirva de base para instrumentar un curso en la Unidad Cuajimalpa de la UAM.
Asistencia a Reuniones Académicas	Inscripción a evento científico Boletos de avión Hospedaje Alimentación Transportación terrestre	\$25,000.00	Presentación de resultados del proyecto en: The Eighth International Conference on Advanced Geographic Information Systems, Applications, and Services. GEOProcessing 2016. Abril 24 - 28, 2016. Venecia, Italia

Financiamiento Interno (solicitado): UAM Cuajimalpa, Convocatoria 2014 del Programa de Investigación Interdisciplinaria como parte del Proyecto Inteligencia Territorial en Santa Fe: Tecnologías y procesos colaborativos en la gestión del conocimiento territorial en la Zona Poniente de la Ciudad de México.

Rubro	Descripción	Monto	Justificación
Viáticos	Viáticos para dos salidas al campo (dos salidas de cuatro días cada una cuatro personas)	\$38,400.00	Recorridos de caracterización y verificación.
Trabajo de Campo	Renta de vehículo, combustible y peajes	\$25,000.00	Recorridos de caracterización y verificación.