

SISTEMA DE MONITOREO DE LA DINÁMICA DE USO DE SUELO (MoDUS) EN LA REGIÓN BINACIONAL MÉXICO-ESTADOS UNIDOS

ERICK SÁNCHEZ FLORES^{1*}, ROLANDO E. DÍAZ CARAVANTES^{2*}, LUIS CARLOS BRAVO
PEÑA^{3*} y BRENDA L. ZÚÑIGA PATRICIO^{4**}

*Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Henry Dunant 4016, Pronaf, Ciudad Juárez, Chihuahua, 32310, México

**Universidad Autónoma del Estado de México

Cerro de Coatepec S/N, Toluca, Estado de México, 50110, México

esanchez@uacj.mx rolando.diaz@uacj.mx luis.bravo@uacj.mx [cielo luna nube@hotmail.com](mailto:cielo_luna_nube@hotmail.com)

RESUMEN

Las tendencias actuales de crecimiento y concentración de la población colocan a las ciudades en el centro del debate ambiental y de desarrollo. Su expansión ha propiciado una mayor demanda de espacios productivos primarios, con los que sin embargo, paradójicamente compete y a los que termina desplazando. Por sus condiciones geopolíticas y económicas, la dinámica de uso del suelo en la frontera norte de México ha constituido un fenómeno de gran interés en las últimas décadas. Las herramientas *geotecnológicas* representan una alternativa óptima para su monitoreo y análisis. En este trabajo se exploran las bases para la integración de un Sistema de Monitoreo de la Dinámica Uso de Suelo (MoDUS) en la frontera norte de México, como herramienta de apoyo a la planificación regional. El sistema MoDUS busca caracterizar los cambios de uso de suelo alrededor de las principales conurbaciones binacionales a lo largo de la frontera, en el periodo 1975-2010, con base en la clasificación de imágenes *Landsat*. Los modelos generados dan cuenta de las principales tendencias, como la creciente urbanización y fragmentación asociada, así como la disminución de la superficie agrícola y natural, y son críticos para evaluar los impactos de las actividades humanas en un amplio rango de sistemas y procesos naturales de la región.

Palabras clave: Uso de suelo, MoDUS, Frontera norte de México, urbanización

LAND USE DYNAMIC MONITORING SYSTEM (MoDUS) IN THE MEXICO-U.S. BI-NATIONAL REGION

ABSTRACT

Current population growth and concentration trends bring the cities to the center of the environmental and development debate. Urban expansion has increased the demand of primary

productive spaces, to which paradoxically compete and displace. Due to its geopolitical and economic conditions, land use dynamics in the northern border of Mexico has become a very interesting phenomenon in the last decades. Geotechnology has become a suitable tool for land monitoring and analysis. In this work, we explored the basis for the integration of a land use dynamic monitoring system (MoDUS) in the northern border of Mexico to support regional planning. The MoDUS system seeks to characterize the land use changes around the main urban areas in the US-Mexico border, between 1975 and 2010, based on the classification of multispectral Landsat imagery. Results show the main land use trends, including a steady increase in urban fragmentation, and a decrease in agriculture and natural land cover. Land use dynamic models are critical to assess the pervasive impacts of human activities on a broad range of natural systems and processes in the region.

Keywords: land use, MoDUS, Northern border of Mexico, urbanization

1. Introducción

Las tendencias actuales de crecimiento y concentración de la población en el mundo revelan patrones de distribución que colocan a las ciudades, como fenómeno de expresión física en el territorio, en el centro del debate ambiental y de desarrollo. A partir del 2007 más del 50% de población mundial habita en ciudades (Lee, 2007). Este hecho plantea nuevos retos por la alta demanda de recursos que implican los modelos de consumo propios de las áreas urbanas. En términos territoriales, esta demanda se expresa en el aumento del uso de suelo dedicado a la infraestructura, a las actividades productivas secundarias y terciarias y, principalmente, a la vivienda. De forma indirecta el crecimiento de las ciudades ha propiciado una mayor demanda de espacios productivos primarios, con los que sin embargo, paradójicamente, compete y a los que termina desplazando. Esta dinámica de utilización del suelo, en combinación con los efectos de una transición demográfica que inclina la balanza del incremento poblacional hacia las áreas urbanas, plantea la necesidad de monitorear y analizar los impactos del cambio en el uso de suelo producto de la urbanización (Wu *et al.*, 2011), sobre un amplio rango de sistemas y procesos naturales esenciales.

Los cambios en la cobertura del suelo son resultado de la combinación, a distintas escalas espacio-temporales, de una serie de factores, entre los que se encuentran: los cambios naturales a largo plazo debidos a variaciones en las condiciones climáticas; los procesos ecológicos y geomorfológicos, como la erosión y la sucesión vegetal; la variabilidad climática interanual que afecta, principalmente, a áreas naturales y agrícolas; las alteraciones antropogénicas de la cobertura vegetal y del paisaje, como la deforestación y la degradación de suelos; y el efecto invernadero, causado por las actividades humanas (Lambin y Strahler, 1994). De entre estas causas, las que tienen un mayor significado por su incidencia y origen son aquellas en las que el hombre tiene un papel preponderante como agente de cambio, ya que generalmente se presentan fuera de los ritmos y plazos de recuperación de los sistemas naturales, por lo que su efecto es mayor. De hecho, se asegura que este tipo de cambios constituye una de las fuerzas de mayor impacto a nivel planetario (Watson *et al.*, 2000), lo que hace primordial su monitoreo y análisis para el diseño de políticas sustentables de gestión territorial.

Los patrones de utilización del suelo constituyen un reflejo del estilo de desarrollo de una sociedad y de la forma de aprovechamiento de sus recursos territoriales (Gómez Orea, 2004). Sin embargo, a pesar de constituir la expresión misma de las actividades económicas sobre el territorio, los cambios en los patrones de uso y cobertura del suelo derivados de la influencia de las actividades humanas (Vitousek, 1994) constituyen a su vez la causa de una serie de amenazas a los sistemas naturales y productivos, por la degradación ambiental que los acompaña. Los cambios en el uso de suelo se consideran un sistema dinámico compuesto por diferentes subsistemas de orden social, económico y ambiental, cuyas interconexiones es necesario entender para apoyar el diseño racional de las políticas de planificación del suelo y la interpretación de los efectos de origen social sobre los procesos de transformación territorial (Wu *et al.*, 2011). La complejidad y consecuencias de este proceso son de tal magnitud que incluso han motivado el surgimiento de nuevas subdisciplinas encargadas de su estudio (Rindfuss *et al.*, 2004).

2. Monitoreo de la cobertura y uso del suelo

El monitoreo de los cambios en la cobertura y uso del suelo, como requerimiento esencial en el manejo sustentable de los recursos naturales, se ha visto ampliamente beneficiado en las últimas décadas por la incorporación de formas de observación terrestre que proveen una visión sinóptica de los patrones espacio-temporales en el territorio. Gracias a los avances en las tecnologías de observación satelital, que ha propiciado el incremento de los bancos de imágenes disponibles en los distintos sistemas de monitoreo terrestre privados y gubernamentales, como el Programa *Landsat* (Wulder *et al.*, 2008), hoy es posible contar con casi cuatro décadas de archivos de observación que permiten la modelación temporal de las tendencias en la cobertura y uso del suelo.

Iniciativas globales encaminadas al monitoreo de la dinámica de uso y cobertura del suelo incluyen la *Global Land Cover Network* (GLCN) de la FAO, creada en 2004 con base en el sistema jerárquico de clasificación estandarizado de cobertura del suelo (LCCS) que facilita la integración regional y global de los datos de cambio de cobertura del suelo (Linke y Sessa, 2006). Otro ejemplo es la *Global Land Cover Facility* (GLF) que posibilita el acceso a imágenes y otros productos para estudiar la cobertura del suelo, de la escala local a la global. Estas iniciativas se han apoyado en bases de datos como la *EarthSat Geocover* (Tucker *et al.*, 2004) y la más reciente *Global Land Survey* (GLS) creada a partir de imágenes *Landsat* del 2005 (Gutman *et al.*, 2008). A escala regional, el *North American Landscape Characterization Project* (NALC) en la década de 1990 (U.S. Environmental Protection Agency, 1993; Yuan y Elvidge, 1998) y el *North American Land Change Monitoring System* (NALCMS) constituyen esfuerzos multinacionales que se concentran en la caracterización y monitoreo de cambios en la cobertura del suelo en América del Norte.

A escala regional, estudios específicamente enfocados al monitoreo del cambio en la cobertura y uso de suelo relacionado con la expansión urbana han recogido datos valiosos que permiten la caracterización de las tendencias regionales y globales de la urbanización. Angel *et al.* (2005) iniciaron el análisis y comparación de la extensión física y el crecimiento de la población de 120 ciudades entre 1990 y 2000. Este estudio reveló una disminución en la densidad de los

asentamientos urbanos, que podría triplicar a 600.000 km² la superficie de suelo ocupada por las ciudades en tan sólo 30 años. Las implicaciones de esta transformación se verían reflejadas en grandes impactos económicos y ambientales, sobre todo en las zonas de expansión urbana de las regiones del mundo en desarrollo (Torres, 2011). Frente a la dinámica de expansión urbana de las últimas décadas en estas regiones, Angel *et al.* (2011) han propuesto un nuevo paradigma que confronta las políticas tradicionales que intentan contener o alentar la expansión urbana sin la planificación adecuada para, en su lugar, generar políticas realistas que acomoden racionalmente el inevitablemente crecimiento de las ciudades.

En este trabajo se busca explorar las bases para la integración de un Sistema de Monitoreo de la Dinámica Uso de Suelo (MoDUS) en la frontera norte de México que sirva como herramienta de apoyo a la planificación urbana regional de la frontera. El sistema MoDUS intenta caracterizar los cambios de uso de suelo alrededor de las principales conurbaciones binacionales en el periodo 1975-2010 basándose en el análisis y clasificación de imágenes multiespectrales *Landsat* a intervalos de 5 años. Una vez generados los modelos e identificadas las tendencias en la dinámica de uso del suelo, se buscará identificar líneas de evidencia que permitan mejorar la comprensión sobre la influencia de los factores biofísicos y humanos que provocan los cambios en el uso y cobertura del suelo en esta región, para informar y apoyar la toma de decisiones en las tareas de planeación urbana y regional en la frontera México-Estados Unidos.

3. Materiales, datos y métodos

Este trabajo se apoyó en una metodología de análisis basada en sistemas de percepción remota. La generación de modelos de uso del suelo se llevó a cabo utilizando un enfoque de clasificación supervisada a partir de *Algoritmos de Soporte Vectorial*. Las estadísticas de los modelos generados se compararon para determinar las tendencias de cambios de uso del suelo.

3.1. Delimitación espacial

En las últimas cuatro décadas, la dinámica territorial de la región fronteriza entre México y Estados Unidos ha estado marcada en buena medida por la actividad económica relacionada con la industria maquiladora, que ha propiciado la concentración de la población y el ingreso en sus principales centros urbanos (Currit y Easterling 2009). Esta dinámica se ha visto acrecentada por rachas de inmigración proveniente de los Estados del sur de México, atraídas por las fuentes de empleo y por la posibilidad de cruzar la frontera hacia los Estados Unidos. Este crecimiento de la población ha aumentado también las necesidades de nuevos espacios para la vivienda, lo que aunado a prácticas especulativas con el suelo ha ocasionado una mayor presión sobre las áreas naturales y agrícolas periurbanas, que terminan cediendo al crecimiento de las ciudades y dando lugar a importantes cambios en la cobertura del suelo (Currit, 2005).

La primera fase de este proyecto se concentró en el análisis de cambio en el uso y cobertura del suelo en ocho pares de ciudades, todas ellas conurbaciones binacionales a ambos lados de la frontera México-Estados Unidos ([figura 1](#)). Los polígonos que se delimitaron para incluir el

crecimiento de estas 16 ciudades vecinas abarcan un total de 13,710 km², en 11 condados y 14 municipios. Estas áreas se localizan a lo largo de 5 provincias fisiográficas ([tabla 1](#)), la mayoría de ellas en la porción occidental, dominadas por matorral xerófilo, a excepción del área de ambos Nogales que se encuentra ocupada principalmente por pastizal y por matorral espinoso en la porción oriental. Los rangos de elevación de estas áreas van desde el nivel medio del mar en el área Tijuana-San Diego, hasta los 1.130 m de altitud promedio en el área de Ciudad Juárez-El Paso.

3.2. Datos de estudio

Para la primera fase de este proyecto se utilizaron 81 escenas *Landsat*, capturadas entre 1975 y 2010. Del total de imágenes, 21 provinieron del sensor *Multispectral Scanner* (MSS) y 60 del sensor *Thematic Mapper* (TM). Estas imágenes se capturaron con una calidad promedio de 8.1 y un promedio de 2% de cobertura de nubes. La distribución temporal de las escenas utilizadas se centró principalmente alrededor de los equinoccios de primavera y otoño y del solsticio de verano, tal como se muestra en la [figura 2](#). Esta amplia distribución de las escenas a lo largo del año resultó en una gran variación de las condiciones de iluminación y fenológicas de la vegetación. Sin embargo, debido a que se utilizó un enfoque de comparación post clasificatoria, se redujeron los posibles efectos de esas diferencias en la detección de los cambios en el uso y cobertura del suelo.

3.3. Técnicas de análisis

El monitoreo de los cambios en el uso y cobertura del suelo en las áreas de estudio se llevó a cabo mediante un enfoque de comparación post clasificatoria. La generación de los modelos de uso y cobertura del suelo para cada conurbación binacional se realizó a través de clasificación supervisada utilizando *Algoritmos de Soporte Vectorial* (ASV) para la separación de clases (Vapnik, 1995). Una vez generados los modelos se construyeron matrices de cambio y se obtuvieron gráficas y estadísticas de los principales cambios detectados en cada área clasificada.

Para la generación de los modelos de uso y cobertura del suelo, primero, se agruparon las imágenes en conjuntos de múltiples bandas, 1-4 para las imágenes MSS y 1-6-7 para las imágenes TM, y se cortaron utilizando los polígonos de cada área de estudio. Con los conjuntos multiespectrales de cada área se establecieron sitios de entrenamiento, con el apoyo de imágenes de alta resolución y mapas de vegetación y uso de suelo, para identificar de forma general las siguientes clases de uso y cobertura: Urbano, Agrícola, Matorral, Suelo expuesto y Agua.

Este esquema de clasificación se aplicó con un *Algoritmo de Soporte Vectorial* (ASV), disponible en ENVI©, para definir los límites entre clases. Este tipo de algoritmo, basado en teoría de aprendizaje estadístico, induce superficies de separación apoyadas en vectores en los espacios multiespectrales de las imágenes, lo que permite determinar reglas en la separación entre clases ([figura 3](#)). A estas superficies se les conoce como *híper planos óptimos* y pueden adaptarse más allá de su forma lineal a través de funciones núcleo no lineales, para aumentar su eficiencia en la

clasificación de imágenes de satélite (Huang *et al.*, 2002). Para la aplicación del ASV en este ejercicio se utilizó una función núcleo con base radial sin establecer límites al umbral de probabilidad de clasificación de todos los píxeles en las imágenes (Sánchez Flores y Mendoza Terrazas, 2009).

En esta primera fase del estudio, la verificación de los modelos de uso de suelo anteriores a 1995 se apoyó en el uso de fotografía aérea y cartografía histórica disponible. La evaluación de los modelos más recientes se hizo con base en imágenes de satélite y fotografía aérea de alta resolución disponibles en *Google Earth* (Fritz *et al.*, 2009). La evaluación de exactitud de los modelos se llevó a cabo mediante matrices de error y el cálculo del coeficiente *Kappa* (van Vliet *et al.*, 2011) con una muestra de 100 puntos de campos distribuidos aleatoriamente en cada polígono. Una vez evaluados los modelos, se calcularon matrices de cambio para estimar el área de cada una de las clases que experimentaron transición hacia otras categorías y observar así las tendencias en la dinámica de uso y cobertura del suelo en las áreas de estudios a lo largo de la frontera México-Estados Unidos. Para facilitar este análisis, las matrices de cambio se representaron en gráficas de ganancias y pérdidas netas por categoría de uso, derivadas de *Land Change Modeler* (Eastman, 2009), lo que permitió identificar las principales transiciones entre usos de suelo en cada una de las áreas de estudio.

4. Descripción y análisis de resultados

Como resultado del análisis de los modelos de uso y cobertura del suelo de las conurbaciones binacionales a lo largo de 35 años, se puede observar una tendencia general al aumento de la superficie urbana y una disminución de las superficies naturales y agrícolas. Un caso representativo de estos procesos se puede observar en los modelos de uso y cobertura del suelo de la conurbación binacional Mexicali-Caléxico ([figura 4](#)). En esta secuencia temporal se destaca un crecimiento asimétrico de la superficie urbana a ambos lados de frontera, con una notable predominancia de este uso en el lado mexicano. Otro rasgo destacable lo constituyen las áreas de matorral xerófilo, visibles durante los dos primeros periodos de análisis y prácticamente erradicadas a partir de 1985. Este tipo de cobertura natural se redujo en total de 7.354,4 ha en 1975 a 1.087,2 ha en 2010.

Los cambios que se observan en la cobertura y uso del suelo de 1975 a 2010 en la conurbación binacional Mexicali-Caléxico muestran un aumento predominante del uso urbano, que ocurrió principalmente entre 1980 y 2005 ([figura 4](#)). Durante este periodo, el aumento en el uso urbano de 4.794 a 25.536 ha -que representa un 532,6%- ocurrió a expensas de una disminución, primero en la superficie de matorral, de 5.046 a 1.639 ha entre 1980 y 1990, y luego en la superficie agrícola, de 39.912 a 23.341 ha entre 1980 y 2010, lo que representa una reducción de 32,5 y 58,5% en la superficie natural y superficie productiva, respectivamente ([figura 5](#)).

En 7 de los 8 periodos de análisis, el uso urbano presentó un porcentaje de cambio positivo. En estos mismos periodos, de 1980 a 2010, el uso agrícola presentó porcentajes de cambio negativos ([tabla 2](#)). La transición de las áreas ocupadas por matorral a uso urbano refleja en primer

término una de las dinámicas propias del primer periodo de crecimiento de estas ciudades, entre 1980 y 1990, en el que se desarrollaron las áreas aledañas a la superficie urbana construida. El segundo periodo, entre 1980 y 2005 principalmente, en el que el crecimiento ocurrió sobre las áreas agrícolas de la franja periurbana, pone en evidencia un proceso distinto, enmarcado por la aparición de áreas urbanas no adyacentes a la ciudad y en un patrón de crecimiento disperso. Los cambios reales en las otras coberturas naturales fueron más difíciles de detectar, lo que se refleja en la variabilidad que muestran de un periodo a otro, así como en mayores errores de clasificación ([tabla 3](#)).

El valor de la exactitud de los modelos varió entre 0,78 para los modelos de las conurbaciones en la parte oriental de la frontera y 0,91 para las de la porción poniente. Para el ejemplo de la conurbación Mexicali-Caléxico, la exactitud total fue de 0,84, con un coeficiente *Kappa* de 0,757 ([tabla 3](#)). En este caso, debido a la abundancia relativa de las clases agrícola y urbano, éstas concentraron el 82% de la distribución aleatoria de los puntos de control, con los porcentajes más bajos de errores de omisión y comisión. La clase de matorral fue una de las que presentó mayores errores de comisión. Esta evaluación de exactitud se considera un ejemplo promedio del desempeño de las clasificaciones de otros periodos y conurbaciones binacionales.

5. Discusión y valoración de hallazgos

Aunque las tendencias de cambio de uso de suelo observadas en los modelos se han dado a velocidades distintas y obedecen de manera particular a mecanismos de influencia propios de cada conurbación binacional, es posible asociar de forma general la dinámica de utilización del suelo a determinados fenómenos que se han presentado a lo largo de frontera, principalmente la instalación de la industria maquiladora (Currit y Easterling, 2009; Hernández, 2004) y la migración que ésta ha atraído desde los Estados del sur de México. Este fenómeno tuvo una mayor influencia en las ciudades fronterizas del lado mexicano y se manifiesta de forma más evidente en los patrones de utilización del suelo a partir de la década de 1980.

Los cambios detectados en las diferentes conurbaciones binacionales coinciden con las observaciones de Currit (2005) que indican una disminución de las áreas ocupadas por pastizal y matorral desértico en el norte de México en la última década. El patrón de crecimiento urbano detectado en prácticamente todos los casos de ciudades pequeñas se acentúa de manera notoria en el territorio mexicano, generando ciudades siamesas -y no sólo gemelas como lo han discutido en su momento otros autores (Alegría, 2000; Pick *et al.*, 2001)-, con una desproporcionada extensión de suelo ocupado por usos urbanos. Esto pone en evidencia las diferencias en la efectividad de los mecanismos de administración de uso del suelo que, aunque intentan contener el crecimiento de las ciudades, más bien facilitan procesos de especulación del mercado del suelo que terminan acentuando las desigualdades sociales (Cho *et al.*, 2012) y el impacto ambiental a los sistemas periurbanos (Díaz-Caravantes y Sánchez-Flores, 2011).

Es importante considerar que, además del crecimiento detectable por la respuesta espectral en las imágenes de satélite, gran parte la superficie construida es difícil de detectar debido a las diferencias en los procesos de consolidación urbana, que producen respuestas espectrales distintas por la falta de pavimentación y materiales utilizados en la construcción en las ciudades de la frontera norte de México (Biggs *et al.*, 2010). Esto ocurre sobre todo en las periferias que muestran un estancamiento en su grado de consolidación urbana durante los periodos de transición de las décadas de 1970 y 1980. Otro patrón que se observa en los modelos es el de la apertura de grandes desarrollos de vivienda alejados de las áreas consolidadas de la ciudad, sobre todo en la década del 2000. Este crecimiento ocurre, sin embargo, como grandes bloques desconectados, con una ocupación uniforme y unifuncional del suelo, principalmente de tipo habitacional (Sánchez-Flores *et al.*, 2009), que dificulta el acceso a la infraestructura y servicios urbanos asociados con las centralidades, aunque cuenten con pavimentación y una estructura ordenada a su interior.

6. Conclusiones

A partir de los resultados del análisis de los modelos de cambios en el uso y cobertura del suelo de las ocho conurbaciones binacionales del Sistema de MoDUS a lo largo de la frontera México-Estados Unidos se confirman una tendencia general en el crecimiento de las áreas urbanas y una correspondiente disminución de las superficies ocupadas por coberturas naturales, principalmente matorral desértico, matorral espinoso y pastizal. Estas tendencias se muestran de forma amplificadas en el lado mexicano de la frontera y se observan con mayor detalle en las ciudades con mayor presencia de industria maquiladora como factor de atracción de migrantes. En este sentido, uno de los fenómenos claramente observados y que requiere un análisis detallado a nivel local, es el patrón de crecimiento de las ciudades que muestra un aumento de la franja de expansión periurbana, sobre todo en los últimos 10 años. Este proceso tiene profundas implicaciones en los costos y posibilidades de acceso a servicios, infraestructura y equipamiento urbano para las nuevas áreas de crecimiento. Estas condiciones de expansión urbana han sido señaladas ya como causa y efecto del incremento de los índices de pobreza en las zonas periurbanas en ciudades del suroeste de los Estados Unidos (Cho *et al.*, 2012) y como factor de impacto de los sistemas ambientales periurbanos de ciudades del norte de México (Díaz-Caravantes y Sánchez-Flores, 2011).

El patrón de crecimiento urbano asimétrico de las ciudades de la frontera que se observa mediante este sistema de monitoreo es una clara evidencia de la necesidad de planificar para acomodar un crecimiento que, aunque en desaceleración reciente, aún está en curso, sobre todo en las ciudades mexicanas. Esta idea de planificar no para contener el crecimiento sino para acomodar su inevitable ocurrencia (Angel *et al.*, 2011) permitiría, además, reducir los impactos negativos de los procesos de especulación del suelo que colocan en estado de vulnerabilidad a los segmentos de población que sólo pueden tener acceso al suelo de la franja periurbana. Es importante señalar, sin embargo, que la expresión de los patrones observados puede servir como guía para orientar las políticas de ocupación periurbana, en favor de la producción de proyectos de menor escala con

Sánchez Flores, E., Díaz Caravantes, R. E., Bravo Peña, L. C. y Zúñiga Patricio, B. L. (2012): "Sistema de monitoreo de la dinámica de uso de suelo (MODUS) en la región binacional México-Estados Unidos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 12, p. 1-15. ISSN: 1578-5157

localizaciones urbanas centrales más adecuadas que propicien un equilibrio territorial (Torres, 2011).

El potencial de la información provista por este sistema de monitoreo permitirá el desarrollo de nuevas fases en las que sea posible establecer correlaciones con los factores potenciales que guían estas tendencias de cambios en el uso y cobertura del suelo. La utilidad de este proceso es que permite aislar los agentes que provocan, aceleran o desaceleran estos cambios, con el fin de proponer su adecuada inserción en las políticas de planificación urbana regional en la frontera.

Agradecimientos

Agradecemos a Mónica Velo Olivas y César Mandujano Hernández su valioso apoyo en el procesamiento y clasificación de imágenes en el Laboratorio de Análisis Urbanos Territoriales de la UACJ. Las imágenes *Landsat* usadas en este trabajo se obtuvieron del U.S. Geological Survey (disponible en <http://glovis.usgs.gov>).

Referencias bibliográficas

- Alegría Olazábal, T. (2000): "Juntos pero no revueltos: Ciudades en la frontera México-Estados Unidos", *Revista Mexicana de Sociología*, 62, 2, pp. 89- 107.
- Angel, S.; Sheppard, S. C. y Civco, D. L. (2005): "The dynamics of global urban expansion". Washington, DC: Transport and Urban Development Department, World Bank.
- Angel, S.; Parent, J.; Civco, D. L. y Blei, A. M. (2011): "Making room for a planet of cities", *Policy Focus Report PF027*, Lincoln Institute of Land Policy.
- Biggs, T.W.; Atkinson E.; Rebecca, P. y Ojeda-Revah L. (2010): "Land cover following rapid urbanization on the US-Mexico border: Implications for conceptual models of urban watershed processes", *Landscape and Urban Planning*, 96, 2, pp.78-87.
- Cho, S.-H.; Jung, S.; Roberts, R. K. y Kim, S. G. (2012): "Interrelationship between poverty and the wildland-urban interface in metropolitan areas of the Southern US.", *Applied Economics*, 44, 11, pp. 1405-1416.
- Currit, N. (2005): "Development of a remotely sensed, historical land -cover change database for rural Chihuahua, Mexico", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7, 3, pp. 232-247.
- Currit, N. y Easterling, E. W. (2009): "Globalization and population drivers of rural-urban land-use change in Chihuahua, Mexico", *Land Use Policy*, 26, 3, pp. 535-544.
- Díaz-Caravantes, R. y Sánchez-Flores, E. (2011): "Water transfer effects on peri-urban land use/land cover: A case study in a semi-arid region of Mexico", *Applied Geography*, 31, pp. 413-425.

Sánchez Flores, E., Díaz Caravantes, R. E., Bravo Peña, L. C. y Zúñiga Patricio, B. L. (2012): "Sistema de monitoreo de la dinámica de uso de suelo (MODUS) en la región binacional México-Estados Unidos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 12, p. 1-15. ISSN: 1578-5157

Eastman, R. (2009): "The Land Change Modeler for ecological sustainability", IDRISI Focus Paper, Clark Labs.

Fritz, S.; McCallum, I.; Schil, C.; Perger, C.; Grillmayer, R.; Achard, F. y otros. (2009): "Geo-Wiki.Org: The Use of Crowdsourcing to Improve Global Land Cover", *Remote Sensing*, 1, pp. 345-354.

Gómez Orea, D. (2004): *Ordenación del territorio*. Madrid, Mundiprensa.

Gutman, G.; Byrnes, R.; Masek, J. y Covington, S. (2008): "Towards monitoring land-cover and land-use changes at a global scale: The global land survey 2005", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, pp. 6-10.

Hernandez, P. (2004): "Mexico's Maquiladora expansion during the 1990s: an environmental assessment", *Ecological Economics*, 49, 2, pp. 163-185.

Huang, C.; Davis, L. S. y Townshed, J. R. (2002): "An assessment of support vector machines for land cover classification", *International Journal of Remote Sensing*, pp. 725-749.

INEGI (s.f.): Mapa de provincias fisiográficas, Aguascalientes, INEGI, [19-11-2010]. Disponible en www.inegi.org

Lambin, E. F. y Strahler A. H. (1994): "Indicators of land-cover change for change vector analysis in multitemporal space at coarse spatial scales", *International Journal of Remote Sensing*, 15, pp. 2099-2119.

Lee, K. N. (2007), *State of the World our urban future 2007*. World Watch Institute.

Noble, W. (2006): "What is a support vector machine?", *Nature Biotechnology*, 24, pp. 1565-1567.

Linke, S. y Sessa, R. (2006): "Land cover classification system", en: Geist, H. J. (ed.): *Our Earth's changing land: An encyclopedia of land-use and land-cover change*, vol. 2 (L-Z) Greenwood Press, Westport, London, pp. 335 - 339

Pick, J. B.; Viswanathan, N. y Hettrick J. (2001): "The U.S.-Mexican borderlands region: a binational spatial analysis", *The Social Science Journal*, 34, 4, pp. 567 - 595.

Rindfuss, R. R.; Walsh S. J.; Turner II B. L.; Fox J. y Mishra V. (2004): "Developing a science of land change: Challenges and methodological issues", *Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America*, 101, 39, pp. 13976-13981.

Sánchez-Flores, E. y Mendoza Terrazas, C. (2009): "Modelos de uso de suelo urbano derivados de la clasificación con algoritmos de máxima probabilidad y soporte vectorial", *Memorias de la Reunión Nacional SELPER Capítulo México 2009*. Mexicali, BC: SELPER.

Sánchez-Flores, E.; Maycotte-Pansza E.; Chávez, J. y Argomedo-Casas M. A. (2009): "Análisis espacial de la ocupación unifuncional del suelo urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua". *Memorias del 3er Congreso Nacional de Suelo Urbano. Impacto de la vivienda en el desarrollo urbano, una mirada a la política habitacional en México*, 28-30 octubre de 2009, Mérida, Yucatán, pp. 733-752.

Sánchez Flores, E., Díaz Caravantes, R. E., Bravo Peña, L. C. y Zúñiga Patricio, B. L. (2012): “Sistema de monitoreo de la dinámica de uso de suelo (MODUS) en la región binacional México-Estados Unidos”, *GeoFocus (Artículos)*, n° 12, p. 1-15. ISSN: 1578-5157

Torres, H. G. (2011): “Environmental implications of periurban sprawl and the urbanization of secondary cities in Latin America”. Inter-American Development Bank Environmental Safeguards Unit, TECHNICAL NOTES, No. IDB-TN-237, 14 págs.

Tucker, C. D.; Grant, D. y Dykstra, J. (2004): “NASA’s global orthorectified Landsat Data set, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70, pp. 313-322.

US Environmental Protection Agency (1993): “North American Landscape Characterization (NALC)”. Washington: Office of Research and Development.

van Vliet, J.; A. K. Bregtb; A. y Hagen-Zanker (2011): “Revisiting Kappa to account for change in the accuracy assessment of land-usechange models”, *Ecological Modelling*, 222, pp. 1367-1375

Vapnik, V. N. (1995): *The Nature of Statistical Learning Theory*. New York, Springer-Verlag.

Vitousek, P. M. (1994): “Beyond Global Warming: Ecology and Global Change”, *Ecology*, 75, pp. 1861–1876.

Watson, R. T.; Noble, I. R.; Ravindranath, N. H.; Verardo, D. J. y Dokken, D. J. (2000): “Special report on land use, land-use change and forestry”. *Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Wu, Y.; Zhang, X. y Shen, L. (2011): “The impact of urbanization policy on land use change: A scenario analysis”. *Cities*, 28, 2, pp. 147-159.

Wulder, M. A.; White, J. C.; Gowa, S. N.; Masek, J. N.; Irons, J. R. y Herold, M. (2008): “Landsat continuity: Issues and opportunities for land cover monitoring”, *Remote Sensing of Environment*, 112, 3, pp. 955-969.

Yuan, D. y Elvidge, C. (1998): “NALC Land Cover Change Detection Pilot Study: Washington D.C. Area Experiments”, *Remote Sensing of Environment*, 66, 2, pp.106-117.

TABLAS

Tabla 1. Provincias fisiográficas de las conurbaciones binacionales analizadas en la primera fase del Sistema MODUS

Conurbación binacional	Provincia fisiográfica	Tipo de vegetación
Tijuana BC-San Diego, CA	Península de Baja California	Matorral rosetófilo costero
Mexicali BC-Caléxico, CA	Llanura Sonorense	Vegetación de desierto arenosos
Nogales, Son.-Nogales, AZ	Sierras y llanuras del norte	Pastizal
Ciudad Juárez, Chih.-El Paso, TX		Vegetación de desierto arenosos / Matorral desértico micrófilo
Piedras Negras, Coah.-Eagle Pass, TX	Grandes llanuras de Norte América	Matorral espinoso Tamaulipeco
Nuevo Laredo, Tamps.-Laredo, TX		
Reynosa, Tamps-McAllen, TX	Llanura costera del Golfo	Mezquital
Matamoros, Tamps-Brownsville, TX		

Fuente: Elaboración propia sobre datos del Mapa de provincias fisiográficas (INEGI, s.f)

Tabla 2. Cambios de uso y cobertura del suelo en la conurbación binacional Mexicali-Caléxico entre 1975 y 2010

Periodo		Urbano	Agrícola	Matorral	Suelo	Agua
1975-1980	Ha	28 ,8	1.725 ,84	-2.308 ,32	646 ,92	-93 ,24
	%	0 ,6	4 ,5	-31 ,4	176 ,9	-75 ,3
1980-1985	Ha	4.261 ,68	-1.236 ,24	-2.182 ,32	-903 ,24	60 ,12
	%	88 ,9	-3 ,1	-43 ,2	-89 ,2	196 ,5
1985-1990	Ha	2.040 ,84	-745 ,65	-1.211 ,4	-87 ,48	3 ,69
	%	22 ,5	-1 ,9	-42 ,5	-81 ,3	4 ,1
1990-1995	Ha	2.033 ,82	-2.265 ,12	257 ,76	-18 ,72	-7 ,74
	%	18 ,3	-6 ,0	15 ,7	-92 ,9	-8 ,2
1995-2000	Ha	4.890 ,78	-5.091 ,3	155 ,07	82 ,62	-37 ,17
	%	37 ,2	-14 ,3	8 ,2	5737 ,5	-42 ,9
2000-2005	Ha	6.656 ,49	-5.614 ,47	-964 ,89	-69 ,48	-7 ,65
	%	36 ,9	-18 ,4	-47 ,0	-82 ,7	-15 ,5
2005-2010	Ha	844 ,83	-1.567 ,08	676 ,8	-14 ,58	60 ,03
	%	3 ,4	-6 ,3	62 ,3	-100 ,0	143 ,4

Sánchez Flores, E., Díaz Caravantes, R. E., Bravo Peña, L. C. y Zúñiga Patricio, B. L. (2012): "Sistema de monitoreo de la dinámica de uso de suelo (MODUS) en la región binacional México-Estados Unidos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 12, p. 1-15. ISSN: 1578-5157

Tabla 3 Matriz de error de la clasificación de uso y cobertura del suelo 2010 de la conurbación binacional Mexicali-Caléxico. Exactitud total = 0.84 y $K = 0.757$

Clasificación		Referencia					Total	E. U.*	Error comisión
		Urbano	Agrícola	Matorral	Suelo	Agua			
Clasificación	Urbano	31	1	0	3	0	35	0.89	0.11
	Agrícola	2	41	4	0	0	47	0.87	0.13
	Matorral	0	2	6	2	0	10	0.60	0.40
	Suelo	1	0	0	4	0	5	0.80	0.20
	Agua	0	1	0	0	2	3	0.67	0.33
	Total	34	45	10	9	2			
	E. P. **	0.91	0.91	0.60	0.44	1.00			
	Error omisión	0.09	0.09	0.40	0.56	0.00			

*Exactitud de usuario

** Exactitud de productor

FIGURAS



Figura 1. Localización de las áreas de monitoreo de cambios en el uso y cobertura del suelo (MoDUS) a lo largo de la frontera México-Estados Unidos.

Fuente: Elaboración propia

Sánchez Flores, E., Díaz Caravantes, R. E., Bravo Peña, L. C. y Zúñiga Patricio, B. L. (2012): "Sistema de monitoreo de la dinámica de uso de suelo (MODUS) en la región binacional México-Estados Unidos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 12, p. 1-15. ISSN: 1578-5157

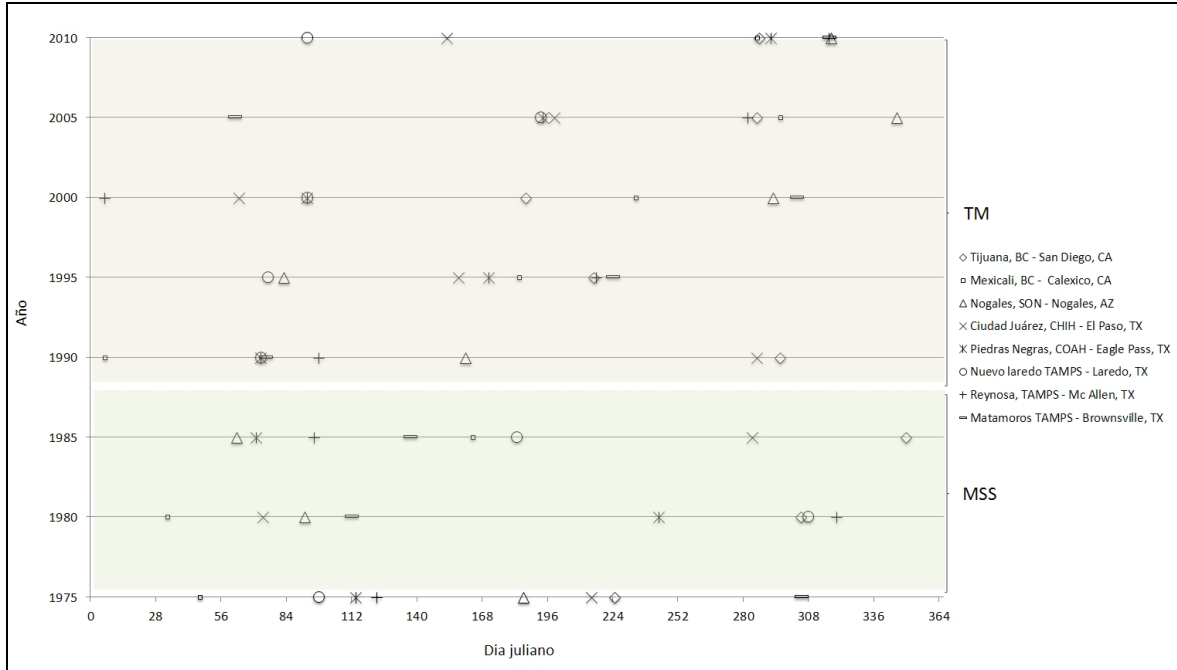


Figura 2. Distribución temporal de las escenas Landsat MSS y TM utilizadas en el estudio para cada conurbación binacional.

Fuente: Elaboración por César Mandujano, UAEM

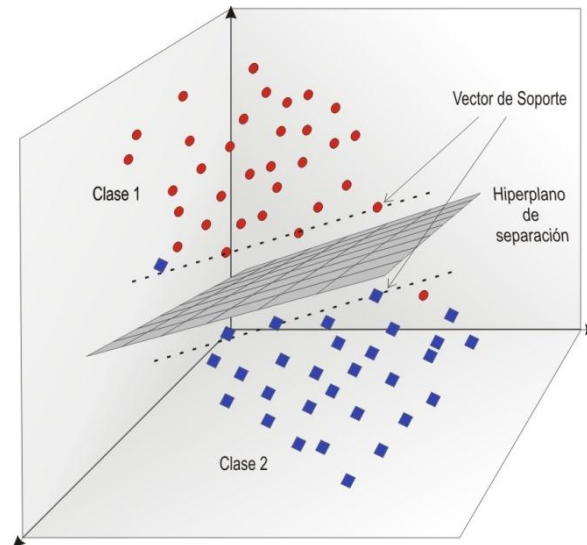


Figura 3. Representación del funcionamiento de un ASV binario con hiperplano lineal.

Fuente: Modificado de Noble (2006)

Sánchez Flores, E., Díaz Caravantes, R. E., Bravo Peña, L. C. y Zúñiga Patricio, B. L. (2012): "Sistema de monitoreo de la dinámica de uso de suelo (MODUS) en la región binacional México-Estados Unidos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 12, p. 1-15. ISSN: 1578-5157

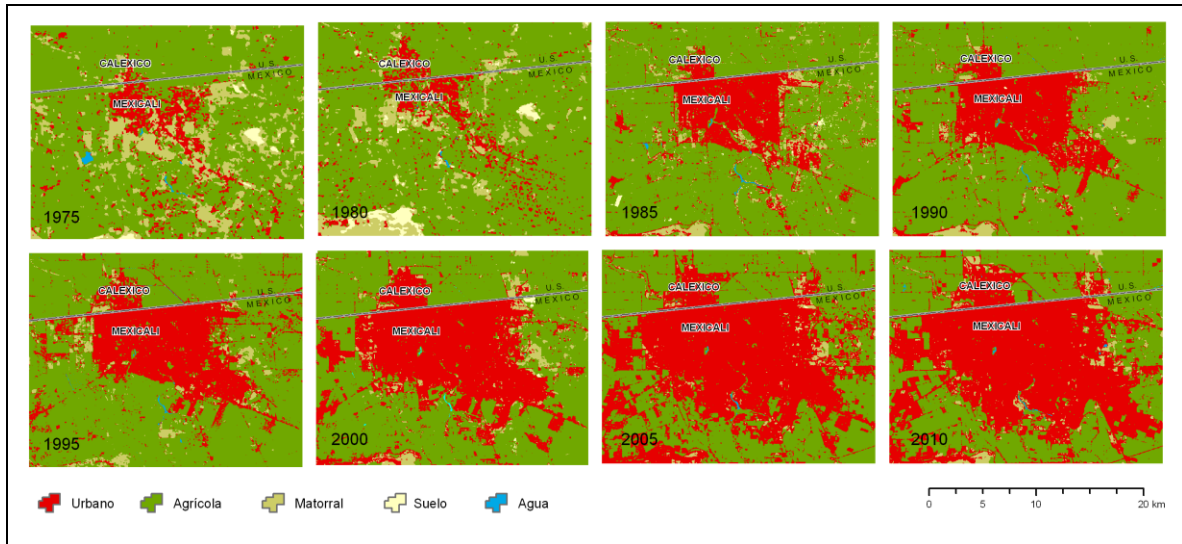


Figura 4. Modelos de uso y cobertura del suelo de la conurbación binacional Mexicali-Caléxico.

Fuente: Elaboración propia

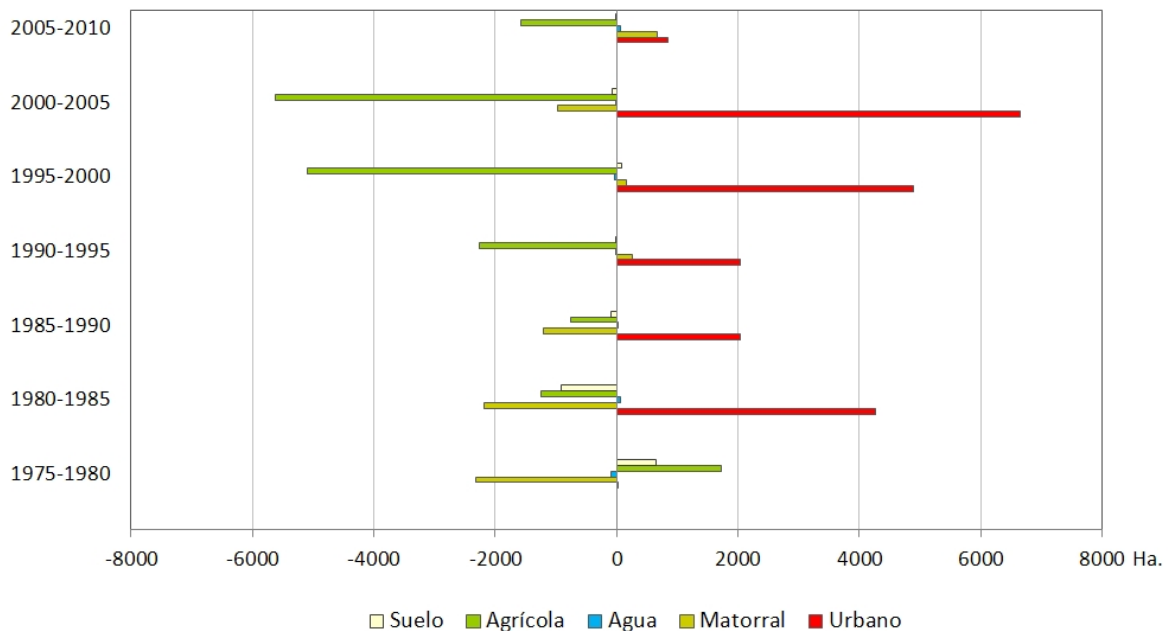


Figura 5. Ganancias y pérdidas netas por categoría de uso y cobertura del suelo de la conurbación binacional Mexicali-Caléxico.

Fuente: Elaboración propia