



ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO METZTITLÁN (MÉXICO) USANDO IMÁGENES DE SATÉLITE: 1985-2007

ANALYSIS OF LAND USE CHANGES IN THE WATERSHED OF METZTITLÁN RIVER (MEXICO) USING SATELLITE IMAGERY: 1985-2007

José René Valdez-Lazalde¹; Carlos Arturo Aguirre-Salado^{2†}; Gregorio Ángeles-Pérez¹

¹Postgrado Forestal. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. km 36.5 Carretera México-Texcoco. Montecillo Estado de México. C. P. 56230. Correos-e: valdez@colpos.mx, gangeles@colpos.mx.

²Ingeniería Geomática. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. C. P. 78290. San Luis Potosí, S.L.P. MÉXICO. Correo-e: carlos.aguirre@uaslp.mx. (†Autor para correspondencia).

RESUMEN

Este trabajo evaluó la pérdida de cobertura vegetal y el crecimiento urbano registrado en los últimos 22 años en la cuenca del río Metztitlán, Hidalgo, México, con el fin de monitorear los cambios y planear un mejor uso del suelo a futuro. Para ello se emplearon imágenes multiespectrales de dos fechas: Landsat 5 Thematic Mapper (TM) 1985 y Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) 2007, que sirvieron de base para la elaboración de mapas temáticos con el algoritmo de máxima verosimilitud. Estos mapas fueron comparados mediante una matriz de cambio donde se encontraron dos procesos evidentes: 1) deforestación (0.5 % anual), donde las coberturas más activas fueron el matorral y el bosque de coníferas y latifoliadas con un cambio a agricultura de temporal; y 2) un crecimiento de la mancha urbana de 4.3 % anual durante los 22 años analizados, ocupando espacios anteriormente destinados a agricultura de temporal y en menor grado a bosques, agricultura de riego y pastizales.

Recibido: 24 junio de 2010
Aprobado: 2 de junio de 2011
doi:10.5154/r.rchscfa.2010.06.041

PALABRAS CLAVE:
Deforestación, crecimiento urbano, Landsat, Hidalgo.

ABSTRACT

This work evaluated both loss of vegetal cover and urban growth over the last 22 years in the watershed of Metztitlán River, Hidalgo, Mexico, with the purpose of monitoring land use change and planning better the future land use of the study area. Both Landsat images of 1985 (Thematic Mapper, TM) and 2007 (Enhanced Thematic Mapper, ETM+) were used to made thematic maps using the maximum likelihood algorithm. These maps were validated and spatially compared using a change matrix. Two processes of change were detected: (1) annual deforestation (0.5 %), where the most active changes were from scrubland and forest to seasonal agriculture; and (2) urban growth (4.3 % annual rate) displacing agriculture, forests, and grasslands.

KEY WORDS: Deforestation, urban growth, Landsat, Hidalgo.

INTRODUCCIÓN

En la cuenca del río Metztitlán, localizada en la parte oriente del estado de Hidalgo, México, ha ocurrido un fuerte deterioro en sus recursos naturales ocasionado principalmente por el crecimiento poblacional (INEGI, 2008). De 1970 a 1990, el estado de Hidalgo registró una alza considerable en la tasa anual de crecimiento poblacional, llegando a un máximo de 2.4 %. Tal crecimiento se ha visto reflejado en ciudades enmarcadas dentro de la cuenca, como Tulancingo de Bravo, Zacualtipán de Ángeles y Atotonilco el Grande. Una causa posible de este crecimiento ha sido la localización estratégica de la cuenca como corredor entre la zona metropolitana del Valle de México y la zona portuaria del Golfo, lo que hace posible el tránsito de un gran número

INTRODUCTION

In the watershed of Metztitlán River, located in the eastern part of the state of Hidalgo, México, a sharp deterioration of natural resources has occurred, mainly provoked by population growth (INEGI, 2008). From 1970 to 1990, the state of Hidalgo registered a considerable increase in the annual population growth rate, reaching a maximum of 2.4 %. This has been reflected in cities that are adjacent to the watershed, such as Tulancingo de Bravo, Zacualtipán de Ángeles and Atotonilco el Grande. A possible cause for this growth has been the strategic location of the watershed as a connection between the Valley of Mexico and the port area of the Gulf, allowing the movement of a great amount of persons and brin-

de personas y crea derrama económica, fomentando el desarrollo de la región.

Infortunadamente, esta cuenca no cuenta con una evaluación de la situación actual, ni de los cambios en la cobertura vegetal y en el uso del suelo ocurridos en el pasado reciente. Esto es importante porque dicha información resulta fundamental para la conceptualización y el desarrollo e implementación de modelos de monitoreo ambiental que expliquen las implicaciones de tales cambios en la hidrología, la biodiversidad, la erosión del suelo y la producción agrícola y forestal, entre otras (Linke *et al.*, 2007).

Existen varios trabajos reportados en México que estudian el cambio en el uso del suelo mediante el análisis de mapas obtenidos de fotografías aéreas de diferentes fechas (Franco *et al.* 2006; Castelán *et al.* 2007; Dupuy *et al.*, 2007) u obtenidos del procesamiento de imágenes de satélite (Márquez *et al.*, 2005; Reyes *et al.* 2006; Pinedo *et al.* 2007). En este sentido, la existencia de archivos históricos de imágenes satelitales ha sido preponderante para contar con información que permita conocer los cambios espaciotemporales de la cobertura y uso del suelo (Treitz y Rogan, 2004).

El propósito fundamental de este trabajo fue analizar los cambios en cobertura vegetal y usos del suelo en la cuenca del río Metztlán durante el periodo 1985-2007, mediante técnicas de clasificación supervisada de imágenes Landsat.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La cuenca del río Metztlán (329,053.9 ha) se distribuye transversalmente en el estado de Hidalgo (89.9 %) con dirección sureste-noroeste, aunque pequeñas porciones pertenecen a los estados de Veracruz (6.4 %) y Puebla (3.7 %). Se enmarca dentro de los paralelos 19° 53' 41" y 20° 45' 05" N y los meridianos 98° 55' 04" y 98° 08' 39" O. La cuenca capta la precipitación que esculpió una gran barranca de 75 km de longitud, 9 km de ancho en su parte más amplia y una profundidad media de 500 m, cuya ejemplar biodiversidad en sus laderas motivó a proponer un Área Natural Protegida federal que fue decretada oficialmente el 27 de noviembre de 2000, tomando por nombre Reserva de la Biosfera Barranca de Metztlán (CONANP, 2003) (Figura 1). El rango de altitudes de la cuenca se encuentra entre los 3,100 m en la Sierra de Singuilucan y 1,250 m en el lecho de la Laguna de Metztlán (20° 40' N y 98° 51' W), la cual posee una gran importancia ambiental (ecológica y climática), social y económica. Dada la amplitud de la cuenca, las altas precipitaciones que se registran en verano en las zonas boscosas y las modificaciones en los coeficientes de escurrimiento vía deforestación-urbanización han

ging economic benefits, generating development in the region.

Unfortunate, the actual situation of the watershed has not been evaluated; neither the changes occurred in the recent past in vegetation cover and land use. This information is essential to conceptualize, develop and implement environmental monitoring models that show the implications of such changes in hydrology, biodiversity, soil erosion and agricultural and forestry production, among others (Linke *et al.*, 2007).

Many studies on land use change have been conducted in Mexico by means of the analysis of maps obtained from aerial photographs took in different times (Franco *et al.* 2006; Castelán *et al.* 2007; Dupuy *et al.*, 2007) and obtained from satellite imagery processing (Márquez *et al.*, 2005; Reyes *et al.* 2006; Pinedo *et al.* 2007). Historical archives of satellite images have been important to have information about spatio-temporal changes of the cover and soil use (Treitz and Rogan, 2004).

The aim of the present study was to evaluate the changes in vegetative cover and soil use in the watershed of Metztlán River during the period of 1985-2007, by means of classification techniques monitored from Landsat images.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The watershed of Metztlán River (329,053.9 ha) is transversely distributed in the state of Hidalgo (89.9 %), it extends in a northwest to southeast direction; small proportions of this watershed belong to the state of Veracruz (6.4%) and Puebla (3.7%). The watershed is located between parallels 19° 53' 41" and 20° 45' 05" N and meridians 98° 55' 04" and 98° 08' 39" W. The watershed captures the precipitation that carved a great ravine of 75 km length, 9 km width in its widest point, and an average depth of 500 m, due to its biodiversity this area was proposed as Protected Natural Area, officially decreed on November 27 2000, receiving the name of Reserva de la Biosfera Barranca de Metztlán (Biosphere Reserve Barranca de Metztlán) (CONANP, 2003) (Figure 1). Watershed range altitudes oscillates between 3,100 m in Sierra de Singuilucan and 1,250 m in Laguna de Metztlán (Metztlán lake) (20° 40' N and 98° 51' W), of great environmental (ecological and climatic), social and economic importance. Because of the size of the watershed, high precipitations recorded during summer in forested areas and the modifications in runoff coefficients by means of deforestation-urbanization have caused that the fertile lowland of the Metztlán river shows major floods affecting agricultural crops, and even endanger the life of the inhabitants during extreme events.

propiciado que la fértil vega del río Metztitlán presente frecuentemente grandes inundaciones que afectan las cosechas agrícolas, e incluso ponen en peligro la vida de los pobladores durante los eventos extremos.

La cuenca de estudio puede caracterizarse comprendiendo las regiones naturales del estado de Hidalgo donde se distribuye: Sierra Baja, Comarca Minera y Valle de Tulancingo (Figura 1). La Sierra Baja cuenta con montañas y barrancas formadas por los ríos Metztitlán y Metzquititlán; el clima es seco (BS_0hw) y semiseco (BS_1hw) (≤ 400 mm de precipitación), determinando el crecimiento de matorral crassicaule, espinoso y rosetófilo. En los valles, junto al lecho del río, se cultiva maíz (*Zea mays*), chile (*Capsicum annum*) y tomate (*Lycopersicum esculentum*), entre otros. El cultivo de nogal (*Juglans regia*) para producción de nuez es una de las actividades distintivas de la región.

La Comarca Minera incluye un pequeño conjunto de montañas vecinas a la Sierra Madre Oriental que va desde Tulancingo hasta Actopan, y debe su nombre a la existencia de yacimientos de plomo, oro y plata que ocuparon por mucho tiempo el primer lugar nacional de producción de plata. El clima es templado subhúmedo (Cw_1 , Cw_2) con lluvias en verano (800-1,000 mm de precipitación anual). Las escasas corrientes de agua obligan a conservarla en presas como San Antonio, El Cedral, Jaramillo y La Estanzuela. En las partes más elevadas y húmedas crecen bosques de *Abies religiosa*, *Pinus* spp y *Quercus* spp, mientras que en las partes secas se desarrollan mezquite (*Prosopis laevigata*),

This watershed includes the natural regions of the state of Hidalgo: Sierra Baja, Comarca Minera and Valle de Tulancingo (Figure 1). The Sierra Baja has mountains and ravines formed by the Metztitlán and Metzquititlán rivers; with dry (BS_0hw) and semi-dry climate (BS_1hw) (precipitation ≤ 400 mm), establishing the growth of crassicaule, thorn and rosette scrubs. In valleys, along the river, maize (*Zea mays*), pepper (*Capsicum annum*) and tomato (*Lycopersicum esculentum*), among others crops, are cultivated. Walnut (*Juglans regia*) crop for production of walnuts is one of the distinctive activities of this region.

The Comarca Minera (Mining Region) includes a small group of mountains close to the Sierra Madre Oriental that covers from Tulancingo to Actopan. It owes its name to the existence of deposits of lead, gold and silver, which occupied the first place of national silver production for a long time. The climate is humid temperate (Cw_1 , Cw_2) with rains during summer (annual precipitation of 800-1,000 mm). Due to the reduced flows of water, it is kept in a dam such as the dam of San Antonio, el Cedral, Jaramillo and La Estanzuela. Forest of *Abies religiosa*, *Pinus* spp and *Quercus* spp grow in the highest and humid parts of this region. Whereas mesquite (*Prosopis laevigata*), maguey (*agave salmiana*) and prickly pear (*Opuntia* spp), among others, grow in the driest parts. In fields allocated for agriculture, fruit trees such as apple (*Malus* spp), plum (*Prunus domestica*) peach (*Hordeum vulgare*) and maize (*Z. mays*) are cultivated.

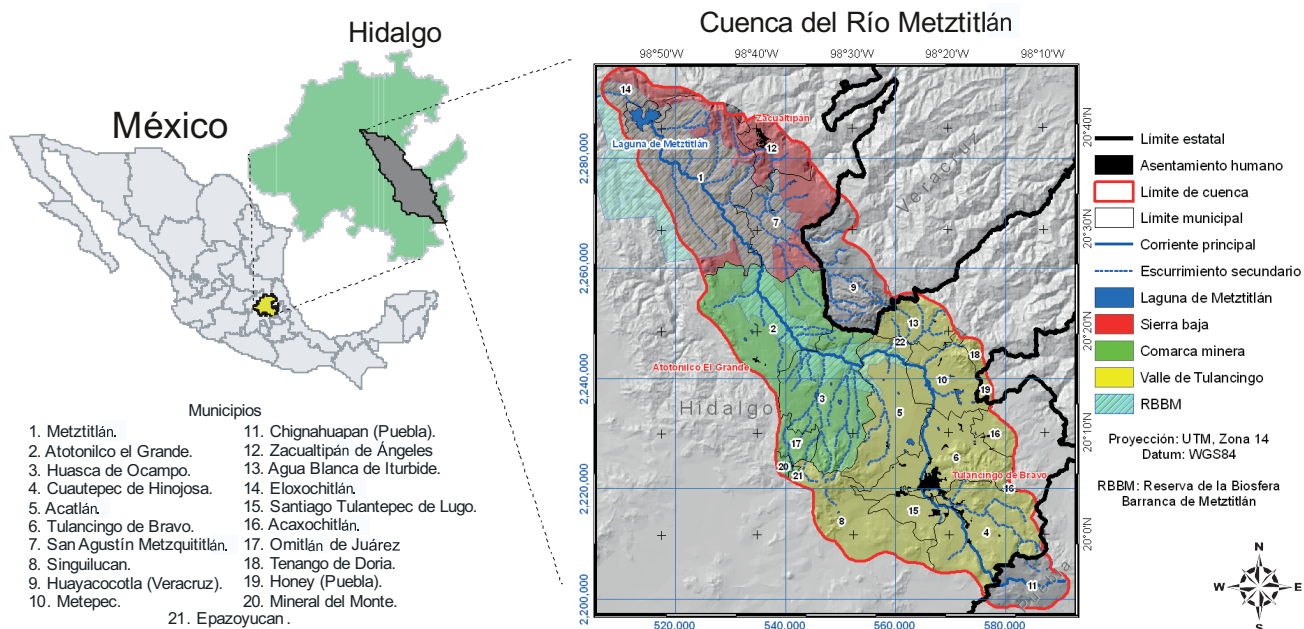


FIGURA 1. Localización de la cuenca del Río Metztitlán.
FIGURE 1. Location of the watershed of Metztitlán River.

maguey (*Agave salmiana*) y nopal (*Opuntia* spp), entre otras; en los terrenos destinados a la agricultura se producen frutales como manzana (*Malus* spp), ciruela (*Prunus domestica*) y durazno (*P. persica*), y cultivos como cebada (*Hordeum vulgare*) y maíz (*Z. mays*).

El Valle de Tulancingo posee un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (Cw_1 y Cw_2) y tierras fértiles donde el uso de sistemas de riego aumentó la producción agrícola en cultivos como maíz (*Z. mays*), alfalfa (*Medicago sativa*), frijol (*Phaseolus vulgaris*) y cebada (*H. vulgare*); y en frutales como tejocote (*Crataegus* spp), pera (*Pyrus* sp), membrillo (*Cydonia oblonga*), capulín (*P. serotina*) y manzana (*Malus* spp), entre otros.

Material empleado

Se emplearon dos imágenes de satélite: Landsat 5 TM 1985 y Landsat 7 ETM + 2007. La primera fue obtenida del Institute for Advanced Computer Studies de la Universidad de Maryland (<http://glcf.umiacs.umd.edu/>), mientras que la segunda se compró corregida de origen (SLC-OFF) a los archivos del United States Geological Survey (USGS) (<http://landsat.usgs.gov/>). Dicha corrección consistió en la aplicación de un algoritmo basado en la interpolación espectral de las líneas vecinas (Scaramuzza, 2004), para minimizar las anomalías presentes en la imagen debido a las fallas del sensor (Cuadro 1).

CUADRO 1. Características de las imágenes de satélite empleadas.

TABLE 1. Characteristics of the satellite images

Satélite, sensor, resolución espacial y formato	Bandas usadas	Columnas x renglones	Path/Row	Fecha de toma
Landsat 5 TM, 30 m, Geotiff	1-5 y 7	7,846 x 7,420	26/46	1985/01/31
Landsat 7 ETM+, 30 m, Geotiff	1-5 y 7	7,549 x 6,145	26/46	2007/04/10

La imagen de 1985 (Figura 2A) se obtuvo corregida geoméricamente y registrada en el sistema de coordenadas UTM-14n y datum WGS84, mientras que la imagen 2007 (Figura 2B) fue co-registrada a la de 1985 (registro de imagen a imagen – Jensen, 2005), utilizando 32 puntos de control terrestre, una función polinómica de segundo grado, y el vecino más cercano como método de remuestreo. El error fue de 13.5 m (0.45 píxeles). Dado que la detección y análisis de cambios se realizó mediante la comparación espacial de las clases temáticas obtenidas de manera independiente para cada fecha de análisis (1985 y 2007), no se necesitó estandarizar radiométricamente las imágenes Landsat (Jensen, 2005). En las Figuras 2C y 2D se muestra, a manera de ejemplo, un acercamiento a una zona boscosa donde se

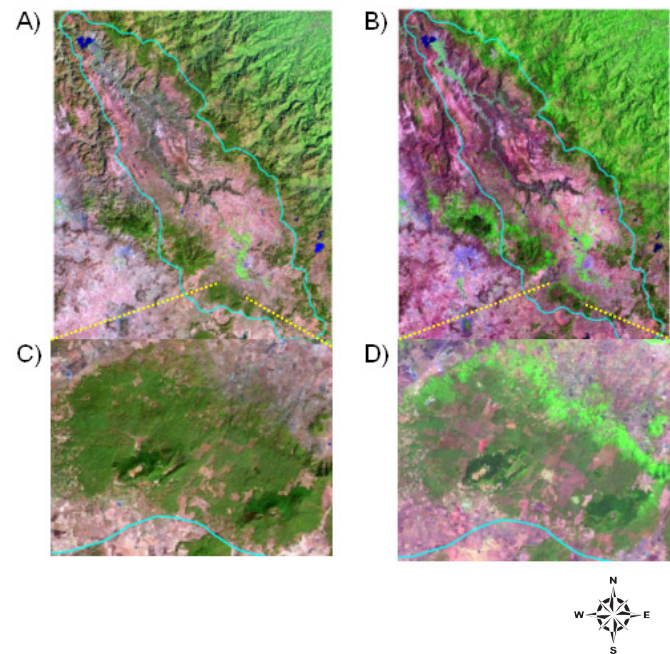


FIGURA 2. A) Imagen Landsat 5 TM (1985) y C) un acercamiento a una zona forestal al sur de la ciudad de Tulancingo. B) Imagen Landsat 7 ETM+ (2007) y D) el visible proceso de deforestación. Bandas usadas para la composición RGB (B_5 , B_4 , B_2).

FIGURE 2. A) Landsat image 5 TM (1985) and C) close up of a forest area to the south of the city of Tulancingo. B) Landsat image 7 EMT+ (2007) and D) the visible deforestation process. Bands used for RGB composition (B_5 , B_4 , B_2).

Tulancingo Valley has a subhumid temperate climate with precipitations during summer (Cw_1 and Cw_2) and fertile land where the use of irrigation systems increased the agricultural production in crops such as maize (*Z. mays*), alfalfa hay (*Medicago sativa*), beans (*Phaseolus vulgaris*) and barley (*H. vulgare*); and in fruit trees such as tejocote (Mexican hawthorne)(*Crataegus* spp), pear (*Pyrus* sp), quince (*cydonia oblonga*), capulin cherry (*P. serotina*) and apple (*Malus* spp), among others.

Material used

Two satellite images: Landsat 5 TM 1985 and Landsat 7 ETM+ 2007 were used. The first image were obtained from the Institute for Advanced Computer Studies of the University of Maryland (<http://glcf.umiacs.umd.edu/>), the second image (modified) was bought from files of the

evidencia el proceso de deforestación ocurrido durante el periodo de estudio.

Metodología

Generación de los mapas de cobertura vegetal y uso del suelo. Se crearon campos de entrenamiento para las siguientes coberturas detectadas mediante recorridos de campo: 1) agricultura de riego (AR); 2) agricultura de temporal (AT); 3) cuerpo de agua (AGUA); 4) bosque (B); 5) matorral (MT); 6) matorral erosionado (MTE); y 7) pastizal (PZ). Las firmas espectrales se evaluaron mediante una matriz de confusión generada con los datos de entrenamiento (LLC, 2006). Posteriormente se realizó una clasificación supervisada con el algoritmo de máxima verosimilitud implementado en el software ERDAS Imagine 8.4, utilizando las bandas 1-5 y 7 de las imágenes; los mapas obtenidos se filtraron con la función moda utilizando una ventana de 3 x 3 celdas para disminuir el efecto de “sal y pimienta” y recortados al área de estudio. Posteriormente los mapas se editaron para disminuir incoherencias en la clasificación, con el apoyo de la imagen de satélite para cada fecha de análisis y la información recabada durante los recorridos de campo realizados *ex profeso*. Dado que el uso del suelo denominado asentamiento humano (ASH) fue una condición localizada y con una firma espectral similar a la del suelo desnudo, se decidió no incluirla en la clasificación supervisada, digitalizándola manualmente y agregándola a los mapas clasificados finales para evitar sobreestimaciones de área para esta clase temática.

Validación. Para maximizar la validez del mapa generado con la imagen de 1985 se extremaron precauciones en la evaluación de la calidad de las firmas espectrales utilizadas para realizar la clasificación definitiva mediante la construcción de matrices de confusión. Mientras, el mapa temático de 2007 se validó satisfactoriamente utilizando la información recabada en los puntos de control terrestre y mediante la construcción de una matriz de confusión. Como indicadores de la congruencia entre los conjuntos de datos analizados se emplearon: 1) la precisión general, y 2) el estadístico Kappa (Lesschen *et al.*, 2005):

$$Exactitud\ general = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{N} \tag{1}$$

$$\hat{K} = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r \frac{x_{i+} * x_{+i}}{N}}{N - \sum_{i=1}^r \frac{x_{i+} * x_{+i}}{N}} \tag{2}$$

Donde, $\sum_{i=1}^r x_{i+} * x_{+i}$ = Suma de los valores ubicados en la diagonal de la matriz; N = Número total de observacio-

United States Geological Survey (USGS) (<http://landsat.usgs.gov/>). This modification consisted of the application of an algorithm based on spectral interpolation of nearby lines (Scaramuzza, 2004), to minimize the anomalies in the image provoked by sensor failures (Table 1).

The image of 1985 (Figure 2A) was geometrically adjusted and registered in the UTM-14n coordinate system and datum WGS84, whereas the image of 2007 (Figure 2) was co-registered to that of 1985 (image-to-image registration – Jensen, 2005), using 32 points of land control, a polynomial function of degree 2, and the closest neighbor used as resampling method. The error was 13.5 (0.45 pixels). Given that the detection and the analysis of changes was carried out by means of spatial comparison of the thematic classes independently obtained for each date (1985 and 2007), it was not needed to radiometrically standardize the Landsat images (Jensen, 2005). In Figures 2C and 2D, a close up of a forest area is shown, where the process of deforestation is observed, which occurred during the study period.

Methodology

Making of vegetative cover maps and soil use. Training fields for the following covers were established. These covers were detected by means of field visits: irrigation agriculture (AR); 2) seasonal agriculture (AT); 3) water body (AGUA); 4) forest (B); 5) scrubland (MT); 6) eroded scrubland (MTE); and 7) grassland (PZ). Spectral signatures were evaluated by means of a confusion matrix produced with the training data (LLC, 2006). Subsequently, a supervised classification with the maximum likelihood algorithm implemented in software ERDAS Imagine 8.4 was carried out, using bands 1-5 and 7 of the images; the maps obtained were filtered with the mode using a window of 3 x 3 cells in order to reduce the salt-pepper noise and cut out to the study area. Thereafter, maps were edited in order to reduce inconsistencies in the classification, with the support of the satellite image for each date of the analysis and information obtained during the field visits carried out *ex profeso*. Given that the use of soil called human settlement (ASH, due to its Spanish acronym) was a localized condition and with a spectral signature similar to bare soil, it was excluded from the supervised classification, manually digitizing and adding it to the final classified maps in order to avoid overestimates of the area for this thematic class.

Validation. In order to maximize the validity of the map made with the image of 1985, extreme precautions were taken in the evaluation of quality of the used spectral signatures in order to make the final classification by means of the construction of a confusion matrix. Meanwhile, the thematic map of 2007 was validated successfully using the information collected in the ground control points and by means of the construction of a confusion matrix.

nes; \hat{K} =Kappa; $\sum_{i=1}^r x_{i+} * x_{+i}$ = Suma de los productos de los subtotales por clase.

Análisis de cambio. Se estimó lo siguiente: 1) Matriz de cambio: indica la superficie que cambió de uso y/o cobertura vegetal y la superficie que se mantuvo sin cambio (diagonal) entre las dos fechas analizadas; 2) Tasa de deforestación: indica en porcentaje el cambio anual de una cobertura leñosa (B, MT, MTE) a una situación diferente (AR, AT, PZ, ASH), y se calculó con la fórmula referida por Palacio *et al.*, (2004): $Td = ((S_2/S_1)^{(1/n)} - 1) * 100$ donde Td= tasa de deforestación anual en porcentaje, S_2 = área arbolada del año final, S_1 = área arbolada del año inicial, n = número de años del periodo de análisis; y 3) Mapa de cambios: i) deforestación, consiste en la eliminación total del arbolado a condiciones de uso del suelo diferentes; ii) degradación, es la disminución en la densidad del arbolado sin un cambio visible en el uso del suelo; iii) recuperación, es el repoblamiento de árboles sobre un área deforestada o perturbada regresando a su condición original; iv) revegetación, incluye el desarrollo de la vegetación secundaria debido al abandono de las tierras agrícolas o ganaderas; y v) urbanización, consiste en el cambio de cualquier tipo de vegetación o uso del suelo a asentamiento humano.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación de firmas y validación del mapa actual

En los Cuadros 2A y 2B se presentan las matrices de confusión obtenidas con la clasificación de los píxeles para los campos de entrenamiento. En la diagonal se indican los píxeles correctamente clasificados. Los demás valores señalan las clases temáticas destino de los píxeles que fueron clasificados incorrectamente, siendo una forma alterna de analizar la separabilidad espectral de las clases temáticas. Los índices de exactitud general y Kappa para la evaluación de las firmas espectrales empleadas en la imagen Landsat 5 TM (1985) fueron de 94.3 y 92.6 % (Cuadro 2A) y para la imagen Landsat 7 ETM+ (2007) de 93.0 y 91.5 % (Cuadro 2B), respectivamente. Por otro lado el mapa de 2007 se validó satisfactoriamente mediante puntos de control obtenidos durante salidas a campo. La exactitud general y el índice de Kappa fueron aceptables en todos los casos (>80 %) (Mas *et al.*, 2003; Lesschen *et al.*, 2005) (Cuadro 3).

En la Figura 3 se puede apreciar que la distribución de la vegetación está regida por la presencia de algunos factores geoclimáticos, donde un factor importante para su distribución es la condición barlovento-sotavento (Barradas *et al.*, 2004). Las montañas que captan buena parte de la precipitación en los bordes de la cuenca (barlovento), al noreste (Zacualtipán, Agua Blanca), sureste (Acaxochitlán), sur (cercanía de Singuilucan) y

As indicators of consistency among the analyzed data sets, the following indicators were used: 1) overall accuracy, and 2) the Kappa statistic (Lesschen *et al.*, 2005):

$$Exactitud\ general = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{N} \quad (1)$$

$$\hat{K} = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r \frac{x_{i+} * x_{+i}}{N}}{N - \sum_{i=1}^r \frac{x_{i+} * x_{+i}}{N}} \quad (2)$$

Where, $\sum_{i=1}^r x_{i+} * x_{+i}$ = Sum of values located in the diagonal of the matrix; N = Total number of observations; \hat{K} =Kappa; $\sum_{i=1}^r x_{i+} * x_{+i}$ = Sum of the products of sub-totals per class.

Analysis of change. The following was estimated: 1) Change matrix: which indicates the surface that changed of use and/or vegetative cover and the surfaces without changes (diagonal) between the two dates analyzed; 2) Deforestation rate: which indicates in percentage the annual change of woody cover (B, MT, MTE) to a different situation (AR, AT, PZ, ASH), and it was obtained using the formula referred by Palacio *et al.*, (2004): $Td = ((S_2/S_1)^{(1/n)} - 1) * 100$ where Td= annual deforestation rate in percentage, S_2 = forested area of the final year, S_1 = forested area of the initial year, n = number of years of the period of analysis; and 3) Map of changes: i) deforestation, which involves the total removal of trees for different land use; ii) degradation, which is the decrease in density of trees without a visible change in soil use; iii) recovery, is to reforest on a deforested or disturbed area, returning this area to its original condition; iv) revegetation, includes the development of secondary vegetation due to the abandonment of agricultural lands; and v) urbanization, which consist in changing any type of vegetation of soil use into human settlement.

RESULTS AND DISCUSSION

Evaluation of signatures and validation of the current map

Confusion matrices obtained with the classification of the pixels for the training areas are shown in Table 2A and 2B. Pixels correctly classified are shown in the diagonal. The rest of the values indicated the thematic classes of the pixels that were incorrectly classified, being this an alternative way to analyze spectral separability of the thematic classes. Overall accuracy and Kappa index

CUADRO 2. Matrices de confusión para los campos de entrenamiento de las firmas espectrales: A) 1985 y B) 2007.
TABLE 2. Confusion matrices for spectral signatures training areas: A) 1985 and B) 2007.

	Píxeles clasificados								
	A) 1985	AR	AT	AGUA	B	MT	MTE	PZ	Total
Datos de referencia	AR	809	0	0	0	0	12	2	823
	AT	0	1,918	0	5	0	28	502	2,453
	AGUA	8	0	24,398	46	0	19	0	24,471
	B	2	196	88	11,782	0	944	882	13,894
	MT	0	0	0	0	223	0	0	223
	MTE	268	14	20	204	0	18,042	452	19,000
	PZ	28	560	0	162	0	344	26,456	27,550
	Total	1,115	2,688	24,506	12,199	223	19,389	28,294	88,414
Exact. por clase (%)		72.6	71.4	99.6	96.6	100.0	93.1	93.5	
Exact. general (%)		94.6		Kappa	92.6				

	Píxeles clasificados								
	B) 2007	AR	AT	AGUA	B	MT	MTE	PZ	Total
Datos de referencia	AR	23,914	62	32	426	226	91	164	24,915
	AT	153	42,211	0	108	2	1,913	5,260	49,647
	AGUA	11	1	22,041	3	0	0	0	22,056
	B	114	8	0	10,369	0	219	1,337	12,047
	MT	435	92	0	14	29,408	10	44	30,003
	MTE	599	1,438	0	348	3	62,536	321	65,245
	PZ	346	2,016	0	464	4	778	35,742	39,350
	Total	25,572	45,828	22,073	11,732	29,643	65,547	42,868	243,263
Exact. por clase (%)		93.5	92.1	99.9	88.4	99.2	95.4	83.4	
Exact. general (%)		93.0		Kappa	91.5				

CUADRO 3. Validación del mapa 2007 mediante puntos de verificación en campo.
TABLE 3. Validation of the map 2007 by means of verification points in the area.

Clase	AR	AT	AGUA	B	MT	MTE	PZ
Exact. productor (%)	83.8	94.0	91.7	94.7	86.3	77.6	72.9
Exact. general (%)	87.6	Kappa (%)		86.7			

suroeste (sierra de Pachuca), hacen posible que se desarrollen vegetaciones propias de clima templado como bosques de pino y pino encino. En tanto, en la parte interna de la cuenca (sotavento), donde el viento viaja con humedad reducida, el tipo de vegetación adaptado es el matorral xerófilo en sus diversas variantes: crassicaule, espinoso y rosetófilo. Por su parte, el uso agrícola es más intenso en condiciones como mayor cercanía a la mancha urbana, relieve plano y una mejor disponibilidad de agua, para el caso de la agricultura de riego.

for the evaluation of the spectral signatures used in the Landsat image 5 TM (1985) was 94.3 and 92.6 % (Table 2A) and for Landsat image 7 ETM+ (2007) was 93.0 and 91.5 % (Table 2B), respectively. The map of 2007 was successfully validated by means of control points obtained during the study visits. Overall accuracy and Kappa index were acceptable in all cases (>80 %) (Mas *et al.*, 2003; Lesschen *et al.*, 2005) (Table 3).

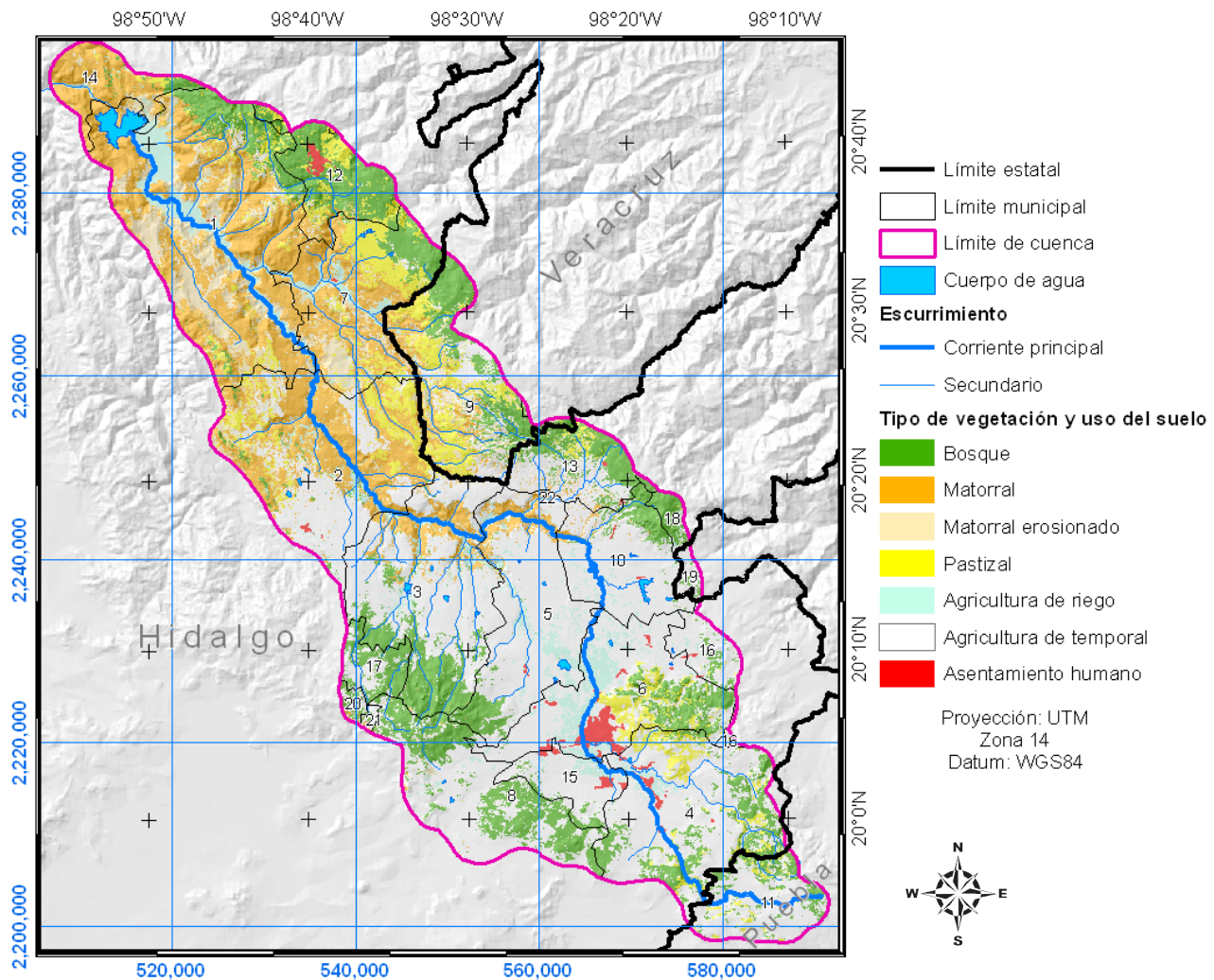


FIGURA 3. Mapa de vegetación y uso del suelo (2007).

FIGURE 3. Vegetation map and soil use (2007).

Dinámica de cambio de uso del suelo

En la Figura 4 se aprecian los tipos de vegetación y uso del suelo en términos de porcentaje, mientras que en la matriz de cambio (Cuadro 4) se aprecia el detalle de la dinámica de deforestación-urbanización. Las clases más importantes por el grado de presencia son la agricultura de temporal y el matorral, siguiéndole el bosque y el pastizal. En el Cuadro 4 se observan las diversas tendencias de cambio: 1) aumento en los diferentes usos del suelo (AR, AT y ASH) y vegetaciones consideradas degradadas (MTE), y 2) disminución en los tipos de vegetación conservada (B y MT) (Figura 5). Los resultados de este trabajo son consistentes con los reportados en la literatura, mostrando una tendencia general de degradación de los recursos naturales (Ramírez, 2001; Velázquez *et al.*, 2002; Gómez *et al.*, 2006; Reyes *et al.*, 2006; Pinedo *et al.*, 2007) y un aumento en los usos antrópicos del suelo (García *et al.*, 2002; Arriaga, 2009).

In Figure 3 it can be observed that the distribution of vegetation is rule by the presence of some geoclimatic factors, where the main factor for its distribution is the windward/leeward condition (Barradas *et al.*, 2004). The mountains that capture a great part of the precipitations on the edges of the watershed (windward), northeast (Zacualtipán, Agua Blanca), southeast (Sierra de Pachuca), makes possible the development of temperate vegetation such as pine forest and pine-oak forest. On the other hand, on the inside of the watershed (leeward), where the wind travels with low humidity, the adapted type of vegetation is the xeric shrub in its different variants: crassicaule, thorny and rosetifolous. Agricultural use becomes stronger in conditions closer to the urban sprawl, flat relief and with a better water availability, for the case of irrigation agriculture.

Dynamics of land use change

Type of vegetation and land uses in terms of percentages are shown in Figure 4, whereas in the change matrix

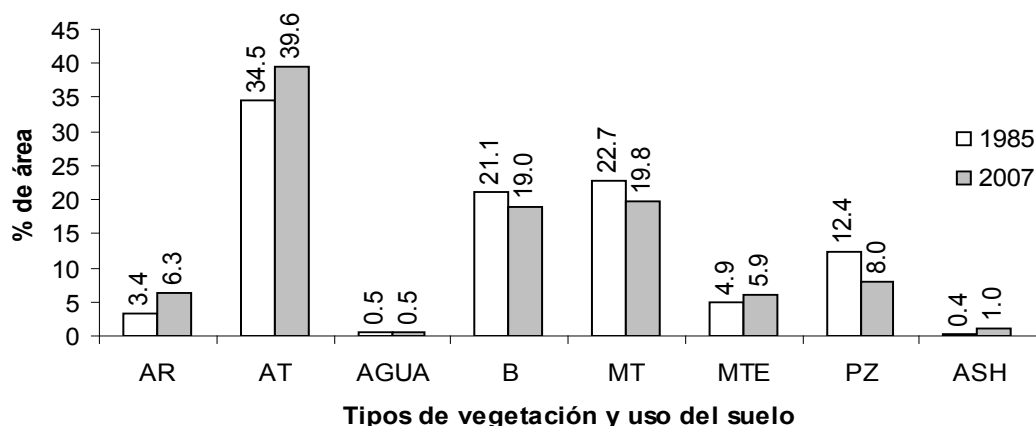


FIGURA 4. Comparación entre las superficies ocupadas por distintos tipos de vegetación y uso del suelo en los dos años analizados. Área total: 329,053.9 ha.

FIGURE 4. Comparison among the surfaces used by different types of vegetation and soil use in the two years studied. Total area: 329,053.9 ha.

CUADRO 4. Matriz de cambio de uso del suelo para el periodo 1985-2007 (ha).

TABLE 4. Matrix of change of soil use for the period of 1985-2007 (ha).

1985	2007								Total
	AR	AT	AGUA	B	MT	MTE	PZ	ASH	
AR	7,389.3	2,012.0	125.1	147.4	678.9	591	105.3	213.1	11,262.1
AT	5,585.8	95,955.6	118.3	5,529.5	1,528.7	718.7	3,043.6	1,185.7	113,665.9
AGUA	161.6	202.7	1,242.7	10.8	41.4	57.0	34.3	0.9	1,751.3
B	405.7	11,437.8	4.5	51,991.0	1,518.8	440.6	3,347.2	276.9	69,422.6
MT	6,450.2	8,980.6	37.0	1,546.2	47,303.7	6,323.5	3,971.5	17.5	74,630.3
MTE	481.2	828.9	4.1	852.5	4,043.8	8,779.5	1,227.6	49.0	16,266.7
PZ	213.1	10,947.0	14.1	2,358.2	10,020.1	2,531.7	14,477.6	204.5	40,766.3
ASH	1.1	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1,282.9	1,288.2
Total	20,688.0	130,368.8	1,545.8	62,435.6	65,135.4	19,442.1	26,207.2	3,230.5	329,053.9

La tasa de deforestación calculada para este periodo fue de -0.5 %. Este valor se considera bajo respecto a los reportados en otros estudios similares. Ochoa y González (2000) reportaron los siguientes resultados: 1) tasas anuales de deforestación de -1.6 % (1974-1984) y -2.1 % (1984-1990) en los altos de Chiapas, 2) en un área más densamente poblada (Huistán) encontraron tasas de deforestación menores: -1.8 % y -1.1 %, y 3) tasas de deforestación completamente variables en un área relativamente despoblada: -0.5 y -3.4 %. Estos autores indican que se debe tener cuidado en la interpretación, uso y análisis de datos sobre las causas de la deforestación en una región dada, ya que sus resultados contradicen al binomio presión social-deforestación. Márquez *et al.* (2005) estudiaron el cambio de uso del sue-

(Table 4) the detail of deforestation-urbanization dynamics are shown. The most import classes according to the degree of presence are seasonal agriculture and scrubland, followed by forest and grassland. The different trends of change are shown in Table 4: 1) a rise in the different land uses (AR, AT and ASH) and vegetations considered as degraded (MTE), and 2) a decrease in the types of vegetation preserved (B and MT) (Figure 5). The results of the present study are consistent with those reported in the literature, showing a general tendency of degradation of the natural resources (Ramírez, 2001; Velázquez *et al.*, 2002; Gómez *et al.*, 2006; Reyes *et al.*, 2006; Pinedo *et al.*, 2007) and a rise in the anthropogenic-land uses (García *et al.*, 2002; Arriaga, 2009).

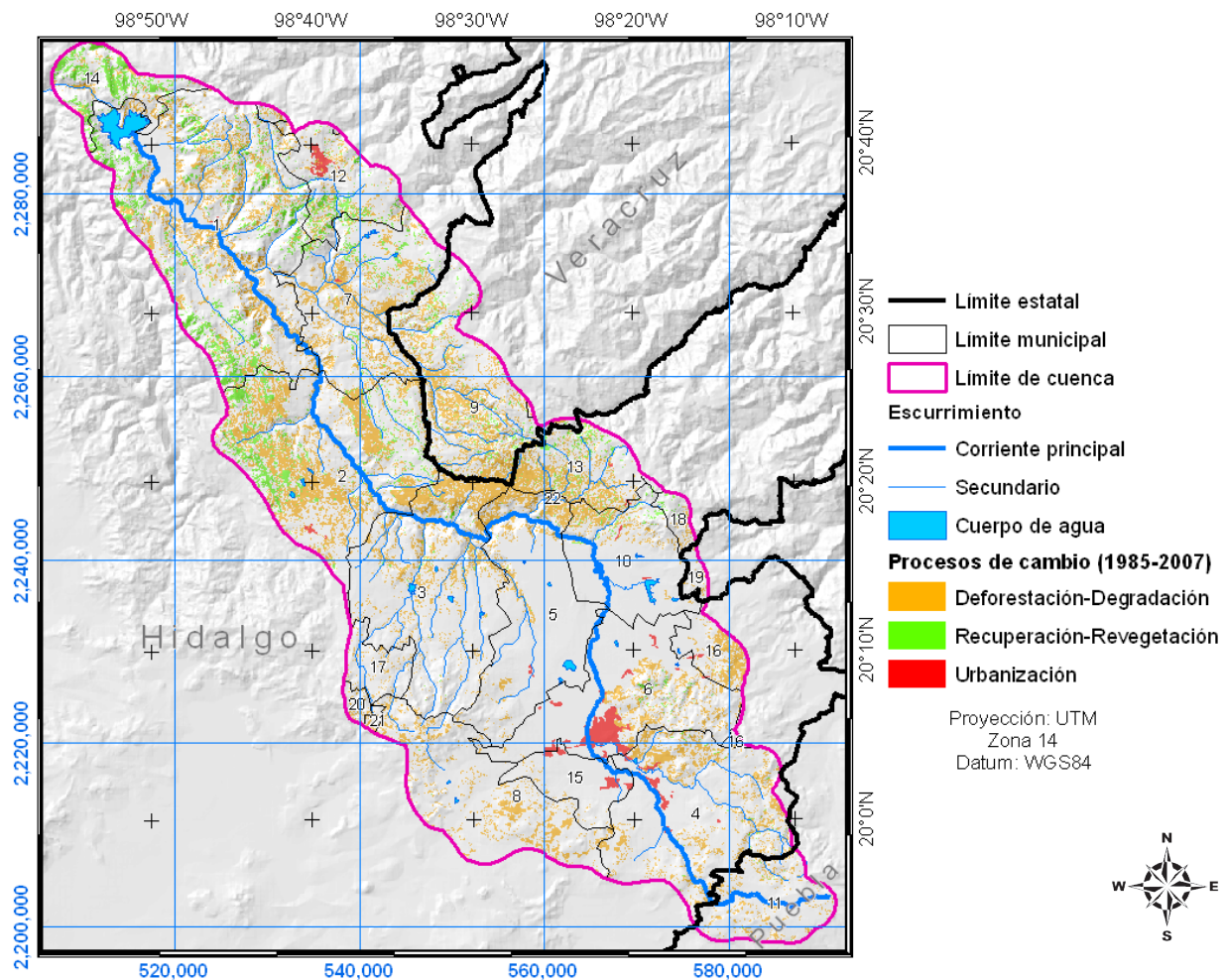


FIGURA 5. Procesos de cambio detectados (1985-2007).

FIGURE 5. Processes of change detected (1985-2007).

lo (1970-2000) en una microcuenca cercana a la ciudad de Durango, Dgo., encontrando un visible reemplazo de áreas arboladas por chaparrales y comunidades herbáceas a una tasa de deforestación anual de -2.4 %. Estos autores indican que las principales causas de cambio fueron la ganadería extensiva, la agricultura de temporal, la extracción de leña y la incidencia de incendios forestales. Por su parte Gómez *et al.* (2006) en su estudio de cambio de uso del suelo en la sierra norte de Oaxaca, encontraron altas tasas anuales de deforestación en el bosque de pino (3.0 %) y bosque de encino (2.0 %).

Si bien es cierto, que la mayoría de los estudios reportan tasas de deforestación medianas y altas en todos los casos, también existen investigaciones que documentan lo contrario. Dupuy *et al.* (2007) investigaron el cambio de cobertura y uso de suelo durante el periodo 1979-2000 en dos comunidades localizadas en el noreste de Quintana Roo. Ellos registraron un aumento en la cobertura de selvas, proveniente principalmente de la recuperación de áreas quemadas, resaltando el papel ecológico regenerativo que

The deforestation rate obtained for this period was -0.5 %. This value is considered as low with respect to those reported in other similar studies. Ochoa and González (2002) reported the following results: 1) deforestation annual rate was -1.6 % (1974-1984) and -2.1 % (1984-1990) in the highlands of Chiapas, 2) in more densely populated areas (Huistán) lower deforestation rates were found: -1.8 % and -1.1 %, and 3) variable deforestation rates in a relatively unpopulated area: -0.5 and 3.4 %. These authors indicated that care must be taken in the interruption, use and analysis of the data about the causes of deforestation in a determined area, because their results contradict the social pressure-deforestation binominal. Márquez *et al.* (2005) studied the land use change (1970-2000) in a micro-watershed nearby the city of Durango, Dgo., observing a notable replacement of forest areas by scrub and herbaceous with an annual deforestation rate of -2.4 %. The authors indicated that the main causes of change were: extensive livestock, seasonal agriculture, extraction of wood, and forest fires. Gómez *et al.* (2006) observed high annual deforestation rates in pine forest

tiene la presencia de incendios y la alta resiliencia de este ecosistema.

Por otro lado, el crecimiento urbano registrado en este estudio se consideró regular (2.5 veces en 22 años) en relación con otras investigaciones reportadas. La agricultura de temporal y en menor grado el bosque, la agricultura de riego y el pastizal cedieron área a los asentamientos humanos. López *et al.* (2001) reportan el crecimiento de la ciudad de Morelia (Michoacán, México) de seis veces en 37 años (1960-1997), considerándose muy alto. Mientras que Anderson *et al.* (2005) para Ciudad Victoria, (Tamaulipas, México) determinaron un crecimiento de 1.4 veces durante 30 años (1970-2000), el cual se considera bajo.

Los cambios de la cobertura vegetal ocasionados por la deforestación o urbanización, pueden desencadenar una alteración en las condiciones bioclimáticas de la zona. En este sentido, Barradas *et al.* (2004) realizaron mediciones de balance de energía para determinar la redistribución de dos tipos de vegetación contrastantes (bosque y pastizal) y sus efectos sobre el flujo de calor sensible. Concluyeron, por las tendencias encontradas, que existe la posibilidad de un cambio climático en esta región, principalmente en la época seca.

CONCLUSIONES

El análisis espacial-cuantitativo realizado de los cambios en la cobertura vegetal y el uso del suelo ocurridos de 1985 a 2007 en la cuenca de Metztlán, Hidalgo, generó información valiosa para el monitoreo de los recursos naturales de la cuenca. La tasa de deforestación calculada se considera baja (-0.5 % anual), y puede ser explicada mediante la apertura de terrenos agrícolas de temporal en áreas forestales, los cuales una vez improductivos dan paso a la mancha urbana que ha crecido un 250.8 % en 22 años, a un ritmo de 4.3 % anual. Los asentamientos humanos desplazaron a la agricultura de riego y temporal en Tulancingo, al bosque en Zacualtipán y al matorral en Atotonilco el Grande (Hidalgo, México). Sin duda, estos cambios ya tienen implicaciones en el ciclo hidrológico, la biodiversidad, la erosión del suelo y el clima local, entre otros aspectos relevantes. Pero éstos podrán ser monitoreados mediante el desarrollo de modelos que cuantifiquen, expliquen y predigan escenarios a futuro, y sirvan como herramienta de planeación a mediano-largo plazo para los tomadores de decisiones.

LITERATURA CITADA

Anderson, S.; Taylor, M.; Sutton, P; Steinberg, M. (2005). Assessment of urban land use cover changes. In. *3rd International Symposium Remote Sensing and Data Fusion Over Urban Areas (URBAN*

(3.0 %) and oak forest (2.0 %) in a study conducted about soil land change in the Sierra Norte de Oaxaca.

Most of the studies reported high and medium deforestation rates in all cases, but there is also research showing the opposite. Dupuy *et al.* (2007) evaluated cover change and soil use during 1979-2000 in two communities in the northeast of the state of Quintana Roo. They recorded a raise in rainforests cover, coming mainly from the recovery of burned areas, highlighting the regenerative ecological role that the presence of forest fires and high resilience of this ecosystem have.

On the other hand, urban growth recorded in this study was regular (2.5 times in 22 years) in relation with other studies reported. Seasonal agriculture, and to a lesser degree forest, irrigation agriculture and grassland gave room for human settlements. López *et al.* (2001) reported that the city of Morelia (Michoacán, Mexico) grew six times in 37 years (1960-1997), which was considered as very high growth. Whereas Anderson *et al.* (2005) for Ciudad Victoria (Tamaulipas, Mexico) reported a growth of 1.4 in 30 years (1970-2000), which was considered as a low growth.

Changes in vegetation cover provoked by deforestation and urbanization, can unleashed an alteration in bioclimatic conditions in the area. In this respect, Barradas *et al.* (2004) took measurements of energy balance in order to establish the redistribution of two contrasting types of vegetation (forest and grassland) and their effects on sensible heat flux. They concluded, according to the trends found, that there is a possibility of climate change in this region, mainly during the dry season.

CONCLUSIONS

The spatial-quantitative analysis on vegetative cover and soil use changes occurred from 1985 to 2007 in the watershed of Metztlán, Hidalgo, generated valuable information for monitoring the natural resources of the watershed. The deforestation rate obtained was considered as low (-0.5 % annual), where seasonal agricultural lands were used as forest areas, and when they became unproductive gave way to urban sprawl, which has growth 250.8 % in 22 years, at a rate of 4.3 %, annually. Human establishment displace the irrigation and seasonal agriculture in Tulancingo, the forest in Zacualtipán and the scrubland in Atotonilco el Grande (Hidalgo, México). These changes already have consequences for hydrologic cycle, biodiversity, soil erosion and local climate, among others aspects. However this will be monitored by means of the development of models that quantify, explain and predict future scenarios, and that can be used as planning tools (medium-long term) for decision makers.

2005). Tempe, AZ, USA.

Arriaga, L. (2009). Implicaciones del cambio de uso de suelo en la biodiversidad de los matorrales xerófilos: un enfoque multiescalar. *Investigación Ambiental*, 1(1), :6-16.

- Barradas V., L.; Cervantes P., J.; Puchet A., C. (2004). Evidencia de un cambio climático en la región de las grandes montañas del Estado de Veracruz, México. In: García Codron, J.C., C. Diego Liaño, P. Fernández de Arróyabe, C. Garmendia Pedraja y D. Rasilla Álvarez (Eds). *El Clima entre el Mar y la Montaña*. Serie A. No. 4. (pp. 213-220). Santander, España: Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria.
- Castelán, R.; Ruíz, J.; Linares, G.; Pérez, R.; Tamariz, V. (2007). Dinámica de cambio espacio-temporal de uso del suelo de la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM*, 64, 75-89.
- CONANP. (2003). *Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán México*. (1ª ed.) México, D.F. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
- Dupuy R., J. M.; González I., J. A.; Iriarte V., S.; Calvo I., L.M.; Espadas M., C.; Tun D, F.; Dorantes E., A. (2007). Cambios de cobertura y uso del suelo (1979-2000) en dos comunidades rurales en el noreste de Quintana Roo. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM*, 62, 104-124.
- Franco, S.; Regil, H.; Ordóñez, J. (2006). Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. *Madera y Bosques*, 12(1), 17-28.
- García N., H.; García D., R. R.; Moreno S., R.; González R., A. (2002). Uso de sensores remotos y SIG para delimitar los cambios en el uso del suelo agrícola de 1970 a 1997 en el estado de Guanajuato. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM*, 47, 92-112.
- Gómez M., L.; Vega P., E.; Ramírez, M.; Palacio P., J. L.; Galicia, L. (2006). Projecting land-use change processes in the Sierra Norte de Oaxaca, Mexico. *Applied Geography* 26, 276-290.
- INEGI. (2008). *Hidalgo. Perfil sociodemográfico*. México: II Censo de Población y Vivienda 2005.
- Jensen, J. R. (2005). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*. 3th ed. USA: Prentice Hall.
- Lesschen, J. P.; Verburg, P. H.; Staal, S. J. (2005). Statistical methods for analysing the spatial dimension of change: *Land use and farming systems. LUCC Report Series No. 7. Land-Use and Land-Cover Change (LUCC) Project*. Netherlands: The International Livestock Research Institute, Nairobi, Kenya & Wageningen University.
- Linke, J.; Betts, M. G.; Lavinge, M. B.; Franklin, S. E. (2007). Introduction: Structure, function, and change of forests landscapes. In Wulder M.A. and Franklin, S.E. (eds). *Understanding forest disturbance and spatial pattern: Remote sensing and GIS approaches*. (pp. 1-29). Boca Raton, FL, USA: Taylor and Francis.
- López G., E. M.; Bocco, G.; Mendoza C., M. E. (2001). Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo. El caso de la ciudad de Morelia. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM*, 45, 56-76.
- LLC. (2006). *Erda's Imagine Tour Guides*. Norcross, GA. USA: Leica Geosystems Geospatial Imaging.
- Márquez L., M. A.; Treviño G., E.J.; Jurado, E. (2005). Reemplazo de áreas arboladas por chaparrales y comunidades herbáceas en el periodo 1970-2000 en una microcuenca de Durango, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM*, 58, 54-65.
- Mas, J. F.; Díaz G., J.R.; Pérez V., A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto De Geografía UNAM*, 51, 53-72.
- Ochoa G., S.; González E., M. (2000). Land use and deforestation in the highlands of Chiapas, México. *Applied Geography*, 20, 17-42.
- Palacio P., J. L.; Sánchez S., M. T.; Casado I., J. M.; Propin F., E.; Delgado C., J.; Velázquez M., A.; Chias B., L.; Ortiz A., M. I.; González S., J.; Negrete F., G.; Gabriel M., J.; Márquez H., R. (2004). *Indicadores para la Caracterización y Ordenamiento del Territorio. México*. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT, Instituto de Geografía de la UNAM y Secretaría de Desarrollo Social. Convenio SEDESOL-Instituto de Geografía, UNAM.
- Pinedo, C.; Pinedo, A.; Quintana, A.; Martínez, M. (2007). Análisis de áreas deforestadas en la región centro-norte de la Sierra Madre Occidental, Chihuahua, México. *Tecnociencia*, 1(1), 36-43.
- Ramírez R. I. (2001). Cambios en las cubiertas del suelo en la Sierra de Angangueo, Michoacán, y Estado de México, 1971-1994-2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM*, 45, 39-55.
- Reyes, H.; Aguilar, M.; Aguirre, J.; Trejo, I. (2006). Cambios en la cubierta vegetal y uso del suelo en el área del proyecto Pujal-Coy, San Luis Potosí, México, 1973-2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM*, 59, 26-42.
- Scaramuzza, P.; Micijevic, E.; Chander, G. (2004). *SLC Gap-filled products Phase One Methodology*. http://landsat.usgs.gov/documents/SLC_Gap_Fill_Methodology.pdf
- Treitz, P.; Rogan, J. (2004). Remote sensing for mapping and monitoring land-cover and land-use change. *Progress in Planning*, 61: 269-279.
- Velázquez, A.; Mas, J. F.; Díaz G., J. R.; Mayorga S., R.; Alcántara, P. C.; Castro, R.; Fernández, T.; Bocco, G.; Ezcurra, E.; Palacio, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica, Instituto Nacional de Ecología*, 62, 21-37.