



Artículo / Article

Influencia de la urbanización en el cambio de la vegetación colindante del corredor Pachuca-Tizayuca (2000-2014)

Influence of urbanization on the change in the vegetation adjoining the *Pachuca-Tizayuca* corridor (2000-2014)

María de la Luz Hernández Flores¹, Abraham Palacios Romero², Elena María Otazo Sánchez¹, César Abelardo González Ramírez¹, Alberto José Gordillo Martínez¹ y Karen Andrea Mendoza Herrera¹

Resumen

Las áreas urbanas ejercen presión sobre la vegetación colindante a estas. Se ha demostrado que la diferencia en los índices de vegetación (ΔIV) es un buen indicador de su deterioro; aunque se relaciona con la presión urbana, no se ha establecido una metodología que cuantifique su impacto. Esta estrategia se aplicó en los principales municipios del Valle de Pachuca-Tizayuca, en donde la urbanización registra mayores crecimientos. Se obtuvo la clasificación supervisada en los años 2000 y 2014, mediante sistemas de información geográfica e imágenes *Landsat* (confiabilidad > 80 %). Se determinó el cambio de uso de suelo (NU) a urbano (U) con los cocientes U/NU y se compararon con ΔIV entre ambos años; se usaron los índices NDVI, MSAVI, SAVI y TSAVI; además de los AGEB rurales, como unidades geográficas de análisis. Posteriormente, se generó un archivo raster de distancias de cada pixel al borde de las zonas urbanas más cercanas (DU). La correlación lineal de DU se determina con el ΔIV a partir de la regresión espacial bivariada en IDRISI-Taiga. Las AGEB con creciente urbanización se identifican por los valores mayores del cociente U/NU y se observa que los ΔIV presentan mayores valores. Se demuestra que DU tiene más correlación con ΔIV en las AGEB con asentamientos humanos intermedios en expansión (R^2 de 0.1 a 0.33). Se demuestra que la correlación espacial ΔIV vs. DU es una buena estrategia metodológica para estimar el impacto de presión urbana sobre la vegetación colindante a los asentamientos humanos.

Palabras clave: Área geográfica básica, asentamientos humanos, cambio en vegetación, correlación espacial, índice de vegetación, presión urbana.

Abstract

Urban areas exert pressure over the adjoining vegetation. It has been demonstrated that the difference between vegetation indices (ΔVI) is a good indicator of its deterioration; however, no methodology quantifying its impact has been established. This strategy was applied in the main municipalities of the *Pachuca-Tizayuca* Valley, where urbanization experiences greater growths. The supervised classification was obtained in the years 2000 and 2014 through geographical information systems (GIS) and *Landsat* images (> 80 % reliability). The change of use of the soil (NU) to urban (U) was determined using the U/NU ratios and comparing them with the ΔVI between the two years. The NDVI, MSAVI, SAVI and TSAVI indices and the rural AGEBs were utilized as geographical analysis units. A distance raster file was generated for every pixel at the edge of the nearest urban areas (DU). The linear correlation of DU was determined using the ΔVI based on the bivariate spatial regression in IDRISI-Taiga software. The AGEBs with growing urbanization were identified by the higher values of the U/NU ratio; the ΔVIs were also observed to have higher values. DU was shown to have more correlation with ΔVI in the AGEBs with human settlements of intermediate expanse (R^2 of 0.1 to 0.33). And the spatial correlation of ΔVI vs. DU has been equally proven to be a good methodological strategy for estimating the impact of urban pressure on the vegetation adjoining human settlements.

Key words: Basic geographic area, human settlements, change in land use, spatial correlation, vegetation index, urban pressure.

Fecha de recepción/Date of receipt: 2 de octubre de 2015; Fecha de aceptación/Date of acceptance: 24 de noviembre de 2015.

¹ Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. Correo-e: lwz.flores@gmail.com

² Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.

Introducción

Los procesos de cambio de uso del suelo se han agudizado en el país a partir de la segunda mitad del siglo XX, lo cual ha impactado directamente en la cobertura vegetal. Entre los factores de mayor impacto están los asentamientos humanos y las zonas urbanas (Cuevas *et al.*, 2010). El daño a los ecosistemas forestales por la presión humana es creciente, por ello se debe prestar especial atención al estudio de los efectos ecológicos de la urbanización (Jenerette *et al.*, 2007). En algunas áreas de México, el cambio de uso del suelo al de tipo urbano tiene tasas de cambio muy altas en periodos cortos (Pineda-Jaimes *et al.*, 2009).

La investigación de la interacción entre la urbanización y su incidencia sobre la dinámica de la vegetación es importante para evitar su deterioro (Cuevas *et al.*, 2010). En contraste, los asentamientos cercanos a dichos ecosistemas se benefician de los servicios de regulación, suministro y entretenimiento que estos proveen. Por ello, es necesario conocer cuáles áreas son más susceptibles a la influencia o bien cuáles tienen mayor interacción en la dinámica de la vegetación, con el fin de proporcionar información a los responsables de generar políticas públicas para su protección. Los índices de vegetación (IV) pueden ser descriptores útiles para estos análisis.

Los IV son valores basados en medidas de reflectividad en diferentes longitudes de onda (comúnmente en la región infrarroja y roja), que brindan parámetros numéricos para la biomasa y cuantifican la cantidad o vigor de la vegetación con mínimos disturbios para el suelo y la atmósfera (Bannari *et al.*, 1995; Torres *et al.*, 2014). Lo anterior es posible debido a que las bandas de reflexión de la hoja en el espectro infrarrojo cercano dependen de la estructura de la misma y por ello, las modificaciones en la madurez, estrés, escasez de humedad, vigor y distribución son medibles.

Los IV se clasifican con base en la forma en que se calculan: a) mediante la combinación aritmética de las bandas roja e infrarroja de la pendiente del suelo, como el índice normalizado (NDVI); b) con la línea base del suelo como el parámetro de referencia para la distancia de la vegetación, el índice con corrección del suelo (SAVI), o el índice mejorado con corrección del suelo (MSAVI); c) los conjuntos de bandas no correlacionadas ortogonales, como el índice de componentes principales (PVI).

En México, el deterioro de la vegetación se ha analizado a través del cambio multitemporal de los IV, principalmente en ecosistemas boscosos en Nuevo León (Pérez-Morales, 2014); y a nivel nacional (Meneses-Tovar, 2011; Galicia *et al.*, 2014). Trabajos realizados en bosques de *Pinus* y *Pinus-Quercus*; el análisis nacional incluye selva alta, selva baja, bosque mesófilo, manglar, matorral, pastizal y desierto. En todos, el índice NDVI es el más utilizado.

Introduction

Change in land use processes have become more acute in Mexico since the second half of the XXth century, and this has had a direct impact on the vegetal coverage. Two of the factors with greatest impact are human settlements and urban areas (Cuevas *et al.*, 2010). Forest ecosystems are being increasingly damaged by anthropic pressure; for this reason special attention must be paid to the study of the effects of urbanization on the environment (Jenerette *et al.* 2007). In certain areas of Mexico, there has been a high rate of change to an urban land use within short periods (Pineda-Jaimes *et al.*, 2009).

It is important to carry out research on the interaction between urbanization and its impact on the dynamics of vegetation in order to avoid the deterioration of the vegetal cover (Cuevas *et al.*, 2010). In contrast, settlements adjoining these ecosystems benefit from the regulations, supplies and entertainment services that they afford. Therefore, the areas that are most susceptible to influence or which have most interaction within the dynamics of the vegetation must be identified in order to provide information to public policy makers for its protection. Vegetation indices (VI) can be useful descriptors for these analyses.

Vegetation indices are values based on reflectivity measures at different wavelengths (usually in the red and infrared regions) that provide numerical parameters for the biomass and quantify the amount or vigor of the vegetation with minimal disturbances for the soil and the atmosphere (Bannari *et al.*, 1995; Torres *et al.*, 2014). This is possible because the reflection bands of the leaf in the near infrared spectrum depend upon the structure of the leaf; therefore, the modifications due to ripeness, stress, lack of moisture, strength and distribution are measurable.

The VIs are classified based on the way in which they are estimated: a) through the arithmetic combination of the red and infrared bands of the soil slope as the normalized index (NDVI); b) using the land base line as the reference parameter for the distance of the vegetation to the urbanized area, the ordinary soil-adjusted index (SAVI), or the modified soil-adjusted index (MSAVI); c) the sets of unadjusted orthogonal bands, including the main components index (PVI).

In Mexico, the deterioration of the vegetation has been analyzed through the multitemporal change of the VIs, particularly in forest ecosystems in Nuevo León (Pérez-Morales, 2014), and at a national level (Meneses-Tovar, 2011; Galicia *et al.*, 2014); researches carried out in *Pinus* and *Pinus-Quercus* forests; the national analysis includes high rain forest, low rain forest, mesophytic forest, mangrove, shrubland, grassland and desert. In all of them, the NDVI is the most widely used index.

Un aspecto innovador ha sido evaluar el efecto de la urbanización en la vegetación a partir del cambio en los índices de vegetación y su correlación con la densidad de la población (Jenerette, 2007; Li *et al.*, 2014; Levin, 2015), el ingreso de la población (Martin *et al.*, 2004), la distancia a las vías de comunicación (Li *et al.*, 2014); y el área urbanizada (Sun *et al.*, 2011). Dicha estrategia se basa en la medición sistemática de los IV para monitorear la dinámica de la vegetación, como resultado de la transición de distintos usos del suelo, específicamente, la urbanización.

Sin embargo, se carece de metodologías documentadas que permitan medir, si el cambio en los IV se relaciona espacialmente con la cercanía de las áreas urbanas.

Es necesario comprobar, si esta correlación sirve como un método para conocer, a través de técnicas de análisis espacial la existencia de una relación entre la susceptibilidad de la vegetación, debida a la cercanía de áreas urbanas y el rápido crecimiento de estas. Por tal motivo se seleccionó el corredor Pachuca-Tizayuca como un estudio de caso para probar esta propuesta metodológica, ya que sus municipios presentan altas tasas de crecimiento urbano.

Materiales y Métodos

a) Localización y características físicas del área de estudio

La zona de estudio se ubica al sur del estado de Hidalgo y comprende a los municipios Pachuca, Mineral de la Reforma, Zapotlán de Juárez, Villa de Tezontepec, Tolcayuca, Tizayuca y parte de San Agustín Tlaxiaca y Zempoala (Figura 1); con un área total de 964.45 km² (Figura 1).

Fisiográficamente, la región forma parte de la provincia del Eje Neovolcánico Transversal, con topoformas que incluyen sierras, llanuras y lomeríos (Inegi, 2014). La zona de sierra se localiza, en su mayoría, hacia el norte y una pequeña parte al sur de la zona (Inegi, 2014). Dicho sistema está formado por rocas volcánicas de tipo andesítico y dacítico que corresponden al periodo Terciario (SGM, 2007). Los lomeríos se localizan en el noreste (Inegi, 2014), en Mineral de la Reforma; se conforman por andesita, dacita y toba dacítica. La llanura se localiza en la porción centro y sur, que coincide con la mayoría de los asentamientos humanos, tiene una orientación NNE-SSW y está constituida por material vulcano-sedimentario procedente de la sierra y lomeríos que la rodean (SGM, 2007). Forma parte de la región hidrográfica del Pánuco (RH26) y pertenece a la cuenca del río Moctezuma. El clima predominantemente corresponde al semiseco templado y al templado subhúmedo (Inegi, 2008).

An innovative aspect has been the evaluation of the effect of urbanization on the vegetation based on the change in the vegetation indices and their correlation to the population density (Jenerette, 2007; Li *et al.*, 2014; Levin, 2015), the income of the population (Martin *et al.*, 2004), the distance to the routes of communication (Li *et al.*, 2014), and the urbanized area (Sun *et al.*, 2011). This strategy is based on the systematic measurement of the VIs in order to monitor the dynamics of the vegetation as a result of the transition between different uses of the soil, specifically urbanization.

However, there are no documented methodologies that allow measuring whether the change in the VIs is especially related to the nearness of the urban areas.

Whether or not this correlation serves as a method to learn, through spatial analysis techniques, that there is an association between the susceptibility of the vegetation due to the vicinity of urban areas and to their rapid growth needs to be verified. For this reason, the Pachuca-Tizayuca corridor was selected for a case study to test this methodological proposition, since its municipalities have high rates of urban growth.

Materials and Methods

a) Physical location and characteristics of the study area

The study area is located in the south of the state of Hidalgo and comprises the municipalities of Pachuca, Mineral de la Reforma, Zapotlán de Juárez, Villa de Tezontepec, Tolcayuca, Tizayuca and part of San Agustín Tlaxiaca and Zempoala (Figure 1), with a total surface area of 964.45 km² (Figure 1).

In physiographical terms, the region is part of the Transversal Neovolcanic Axis province, with topoforms that include mountain chains, plains and rolling hills (Inegi, 2014). Most of the mountain chain area is located to the north, and a small part of it is south of the area (Inegi, 2014). That system is formed by andesitic and dacitic volcanic rocks corresponding to the Tertiary period (SGM, 2007). The rolling hills are situated in the northeast (Inegi, 2014), in Mineral de la Reforma; they are made up of andesite, dacite and dacitic tuff. The plains are located in the central and southern portion, coinciding with the majority of the human settlements; they have a NNE-SSW orientation and are constituted by volcano-sedimentary material from the surrounding sierra and rolling hills (SGM, 2007). They are part of the hydrographic area of the Pánuco river (EH26) and belong to the basin of the Moctezuma river. The predominant climate is semi-dry temperate and sub-humid temperate (Inegi, 2008).

La vegetación está representada, por matorral xerófilo y pastizal inducido. El primero se distribuye en la periferia del valle, principalmente en el Cerro de Cubitos, e incluye especies consideradas dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010. Algunas de ellas son: *Coryphantha werdemannii* Boed., *Turbinicarpus pseudomacroechele* (Backeb.) Buxb. & Backeb., consideradas en la categoría de Peligro de Extinción; *Astrophytum ornatum* (DC) Britton & Rose, *Cephalocereus senilis* (Haw.) Pfeiff., *Ferocactus stainesii* (Salm-Dyck) Britton & Rose var. *pilosus* (Galeotti ex Salm-Dyck) Backeb., *Mammillaria klissingiana* Boed., *Mammillaria longimamma* DC., *Mammillaria zephyranthoides* Scheidw., como Amenazadas; *Coryphantha durangensis* (Runge ex Schum.) Britton & Rose, *Coryphantha radians* Britton & Rose, *Coryphantha retusa* Britton & Rose, *Echinocactus platyacanthus* Link & Otto, *Echinocereus pulchellus* (Mart.) K. Schum., *Ferocactus histrix* (DC.) G.E. Linds., *Stenocactus coptonogonus* (Lem.) A. Berger ex A. W. Hill, *Thelocactus leucacanthus* (Zucc. ex Pfeiff.) Britton & Rose, en Protección Especial (Zuria y Rendón, 2010).

La vegetación boscosa se ubica al norte del área de estudio, en una parte del Parque Nacional El Chico y corresponde al bosque de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.), bosque de tlaxcal (*Juniperus monticola* Martínez), y en menor grado bosque de encino (*Quercus* spp.). De acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010 *Pseudotsuga macrolepis* Flous, *Taxus globosa* Schltdl. y *Litsea glaucescens* Kunth están señaladas como en Peligro de Extinción; y *Fucrea bendinghaussii*, como Amenazada (Conanp, 2005).

The vegetation is represented by xerophyllic shrubs and induced grasslands. The former are distributed in the periphery of the valley, mainly on the Cubitos mountain, and include species in the NOM-059-SEMARNAT-2010 norm, such as *Coryphantha werdemannii* Boed., *Turbinicarpus pseudomacroechele* (Backeb.) Buxb. & Backeb., considered in the Endangered Species category; *Astrophytum ornatum* (DC) Britton & Rose, *Cephalocereus senilis* (Haw.) Pfeiff., *Ferocactus stainesii* (Salm-Dyck) Britton & Rose var. *pilosus* (Galeotti ex Salm-Dyck) Backeb., *Mammillaria klissingiana* Boed., *Mammillaria longimamma* DC., *Mammillaria zephyranthoides* Scheidw., classified as Threatened, and *Coryphantha durangensis* (Runge ex Schum.) Britton & Rose, *Coryphantha radians* Britton & Rose, *Coryphantha retusa* Britton & Rose, *Echinocactus platyacanthus* Link & Otto, *Echinocereus pulchellus* (Mart.) K. Schum., *Ferocactus histrix* (DC.) G.E. Linds., *Stenocactus coptonogonus* (Lem.) A. Berger ex A. W. Hill, *Thelocactus leucacanthus* (Zucc. Ex Pfeiff.) Britton & Rose, under Special Protection (Zuria and Rendón, 2010).

The forest vegetation is distributed in the north of the study area, within the *El Chico* National Park, and consists of Sacred fir (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.), Mexican juniper (*Juniperus monticola* Martínez) and, to a lesser extent, oak (*Quercus* spp.) forests. According to the NOM-059-SEMARNAT-2010 norm, *Pseudotsuga macrolepis*, *Taxus globosa* and *Litsea glaucescens* are classified as Endangered, and *Fucrea bendinghaussii*, as Threatened (Conanp, 2005).

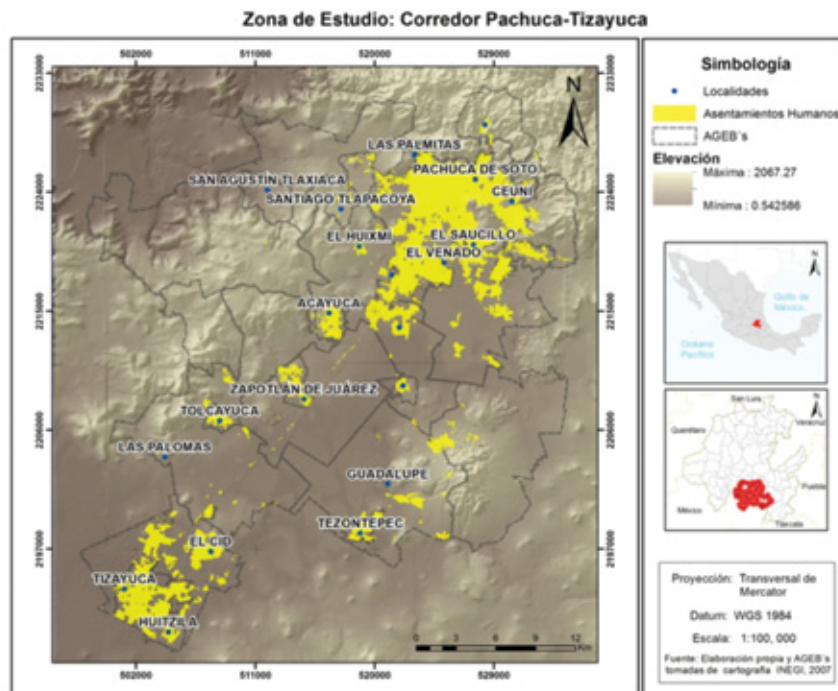


Figura 1. Ubicación del corredor Pachuca-Tizayuca.
Figure 1. Location of the Pachuca-Tizayuca corridor.

Con el objetivo de conocer la relación entre el impacto de la rápida urbanización sobre el ecosistema natural adyacente al corredor Pachuca-Tizayuca, se definieron unidades territoriales a partir del Área Geográfica Básica Rural (AGEB), definida por el Inegi (2007). Esta división se eligió porque refleja características socioeconómicas homogéneas, considera límites municipales y el tamaño de las áreas permite analizar el territorio en una escala más detallada que el nivel municipal.

Dentro de cada unidad de análisis se comparó la proporción del crecimiento urbano con respecto a la diferencia de los índices de vegetación (DIV), y con la distancia a los asentamientos humanos (DU), para ello se llevaron a cabo las siguientes actividades: a) se obtuvo el área urbanizada para los años 2000 y 2014; b) se analizó el contexto climático de la zona, para evaluar la comparabilidad de los años considerados; c) se calcularon los IV, las diferencias entre ambos años ΔIV_{00-14} y se comparó el crecimiento urbano por cada AGEb; y d) se determinaron las correlaciones entre los ΔIV y el DU.

b) Obtención de la diferencia de área urbana entre 2000 y 2014

Se utilizaron tres imágenes *Landsat* ETM y OLI multispectrales, Path-Row 26/46, del mes de febrero de 2000 y 2014 del portal del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), cuya resolución de pixel es de 30 m de lado. Se corrigieron geométricamente, mediante puntos de control que se obtuvieron de ortofotos de Inegi, escala 1:75 000. Posteriormente, se hizo la calibración radiométrica (Chander *et al.*, 2009) y atmosférica, con el programa ENVI 5.1, y la corrección FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) desarrollada por Kruse (2004), de acuerdo a lo propuesto por Arias *et al.* (2015) con el fin de convertir los niveles digitales en valores de radiancia y en seguida a valores normalizados de reflectancia, que puedan ser comparados entre diferentes periodos (Hantson *et al.*, 2011).

La clasificación supervisada se efectuó con base en 80 áreas de entrenamiento que se conocían o habían sido verificadas en campo. Esto es un método muy usado para clasificar cubierta y uso del suelo en México (García-Mora y Mas, 2008; Figueroa-Jáuregui *et al.*, 2011), que se basa en el establecimiento de valores de reflectancia para agruparlos mediante la clasificación por máxima verosimilitud, con el programa IDRISI (versión Taiga), que tiene muy buen desempeño en detección y modelado de cambio de uso de suelo, comparado con otros (Mas *et al.*, 2014).

In order to determine the impact of rapid urbanization on the natural ecosystem adjoining the Pachuca-Tizayuca corridor, territorial units were established upon the basis of the Rural Basic Statistical Geographical Area (AGEB) defined by Inegi (2007). This division was selected because it reflects homogenous socioeconomic characteristics, it takes into account municipal boundaries, and the size of the areas allows a more detailed analysis of the territory than the municipal level.

The ratio of the urban sprawl to the difference between the vegetation indices (ΔVI) and was compared to the distance to human settlements (DU); for this purpose, the following actions were carried out: a) the urbanized area was determined for the years 2000 and 2014; b) the climatic context of the area was analyzed to evaluate the comparability between those years; c) the VIs and the differences between the two years ΔVI_{00-14} were estimated, and the urban sprawl for was compared between the AGEb's, and d) the correlations between the ΔVI and the DU were determined.

b) Estimation of the urban sprawl between 2000 and 2014

Three multispectral *Landsat* ETM and OLI images -Path-Row 26/46- of February 2000 and 2014 from the website of the United States Geographical Service (USGS), with a pixel resolution of 30 m on a side, were used. They were geometrically corrected using control points obtained from orthophotos (scale 1:75 000). Next, the radiometric (Chander *et al.*, 2009) and atmospheric calibrations were carried out using the ENVI 5.1 software and the FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) correction developed by Kruse (2004), as proposed by Arias *et al.* (2015), in order to convert the digital levels into radiance values and, subsequently, to normalized reflectance values, which can be contrasted between different periods (Hantson *et al.*, 2011).

The supervised classification was based on the 80 areas of training that were known or had been verified in the field. This is a widely used method to classify the cover and land use in Mexico (García-Mora and Mas, 2008; Figueroa-Jáuregui *et al.*, 2011), based on the establishment of reflectance values which the classification groups by maximum plausibility using the IDRISI Taiga software, whose performance in the detection and modeling of the change of land use is very good, unlike other techniques (Mas *et al.*, 2014).

Its effectiveness was evaluated using confusion matrices, based on random samples with 400 and 300 verification points for 2000 and 2014, respectively, since large populations (> 10 000) do not require a sample above 100 (Mas *et al.*, 2003).

The SAMPLE module of the IDRISI software was utilized, taking its ground truth as a basis for field visits as well as Google



Su efectividad se evaluó mediante matrices de confusión, a partir de muestras aleatorias de 400 y 300 puntos de verificación para 2000 y 2014, respectivamente, ya que poblaciones grandes (>10 000) no requieren una muestra superior a 100 (Mas *et al.*, 2003).

Se utilizó el módulo *SAMPLE* del programa IDRISI, cuya validación de campo se hizo con base en recorridos, imágenes de *Google Earth* y ortofotos (Inegi, 1999). Se obtuvieron los errores de omisión y comisión para 10 clases de cubierta del suelo: agua, bosque secundario, bosque de coníferas, agrícola en reposo, área erosionada/sin vegetación, urbana, agrícola cultivado, matorral abierto y alterado, matorral denso y sano, y pastizal natural e inducido. Por el tamaño de la muestra se calculó una desviación estándar (≤ 0.05) % y la confiabilidad, de acuerdo a lo recomendado por Mas *et al.* (2003). Las imágenes clasificadas se filtraron y convirtieron en polígonos, y de esta forma se estimaron las áreas urbanas de 2000, 2014, y sus diferencias.

c) Descripción del contexto climático de la zona

El trabajo se inscribe en aquellos que toman un mismo periodo, como un mes (Morawitz *et al.*, 2006) o más (Levin, 2015), evaluado en distintos años para medir las variaciones en la vegetación más allá de la estacionalidad (Benliay y Altuntaş, 2014). Por esta razón se investigan y describen las tendencias climáticas de los parámetros precipitación y temperatura promedio anuales de las estaciones climatológicas ubicadas en el área de estudio.

Se extraen datos de precipitación media anual y temperatura media anual de las estaciones que se encuentran dentro y en los límites del área de estudio (Cuadro 1).

Se utilizaron los datos de las estaciones desde 1980 hasta 2014. Con base en sus varianzas se determinó si las condiciones de precipitación y temperatura son comparables en los años 2000 y 2014, ya que se ha demostrado que son los factores que más influyen en los cambios de la vegetación (Mao *et al.*, 2012). De esta forma, se tiene en cuenta el efecto de los cambios en la vegetación causada por los factores climáticos en la correlación ΔIV_{00-14} y DU.



Earth images and orthophotos (Inegi, 1999). The omission and commission errors were estimated for 10 classes of land cover: water, secondary forest, conifer forest, fallow land, eroded areas/areas without vegetation, urban area, cultivated land, open and altered shrublands, dense and healthy shrublands, and natural and induced grasslands. The standard deviation (≤ 0.05) was estimated based on the sample size and on the percentage of confidence interval, as recommended by Mas *et al.* (2003). The classified images were filtered and converted into polygons in order to estimate the urban areas of 2000 and 2014 and their differences.

c) Description of the climatic context of the area

This work is part of a series of evaluations carried out during the same period –e.g. one month (Morawitz *et al.*, 2006) or more (Levin, 2015)– in different years in order to measure the variations in the vegetation beyond seasonality (Benliay and Altuntaş, 2014). For this reason, the climatic tendencies of average annual precipitation and temperature parameters of the climatological stations within and on the edges of the study area were found and their location is described in Table 1.

Table 1. Climatological stations utilized to describe the climatic context of the area.

Name	X	Y
<i>El Chico (SMN)</i>	527856.79	2235480.71
<i>Pachuca (DGE)</i>	526126.51	2228100.08
<i>Presa El Girón</i>	550935.44	2202333.75
<i>Omitlán</i>	538055.31	2229382.57
<i>Ajacuba (SMN)</i>	489548.31	2226238.86
<i>Real del Monte (DGE)</i>	534823.96	2233648.54
<i>El Zembo</i>	540924.13	2231479.55
<i>San Agustín Tlaxiaca (DGE)</i>	510453.91	2222550.51
<i>San Agustín Zapotlán</i>	529516.11	2197427.93
<i>Santiago Tlajomulco</i>	508630.77	2209792.55
<i>San Pedro Tlaquilpan</i>	525753.52	2205322.05
<i>Tornacuxtla</i>	513411.02	2228362.28
<i>El Tajo</i>	486771.32	2201373.11
<i>Huehuetoca</i>	477750.18	2194742.64
<i>Zumpango km 46+930 Gran Canal</i>	489526.33	2189352.65
<i>Maquixco</i>	517458.30	2187513.49
<i>San Jerónimo Xonocahuacán</i>	505297.11	2183909.33
<i>Pachuca*</i>	526748.70	2220659.21

Continue Table 1...

Cuadro 1. Estaciones climatológicas utilizadas para describir el contexto climático de la zona.

Nombre	X	Y
El Chico (SMN)	527856.79	2235480.71
Pachuca (DGE)	526126.51	2228100.08
Presa El Girón	550935.44	2202333.75
Omitlán	538055.31	2229382.57
Ajacuba (SMN)	489548.31	2226238.86
Real del Monte (DGE)	534823.96	2233648.54
El Zembo	540924.13	2231479.55
San Agustín Tlaxiaca (DGE)	510453.91	2222550.51
San Agustín Zapotlán	529516.11	2197427.93
Santiago Tlajomulco	508630.77	2209792.55
San Pedro Tlaquilpan	525753.52	2205322.05
Tornacuxtla	513411.02	2228362.28
El Tajó	486771.32	2201373.11
Huehuetoca	477750.18	2194742.64
Zumpango km 46+930 Gran Canal	489526.33	2189352.65
Maquixco	517458.30	2187513.49
San Jerónimo Xonocahuacán	505297.11	2183909.33
Pachuca*	526748.70	2220659.21
Zapotlán*	516517.26	2128898.69
Tolcayuca*	512144.98	2200855.97
Zempoala*	532674.84	2205173.03

SMN = Servicio meteorológico; DGE = Dirección General del Estado.

*Estaciones climatológicas del INIFAP.

d) Cálculo de diferencia de índices de vegetación entre 2000 y 2014 y comparación con la urbanización en cada AGEb

Se calcularon diferentes IV para toda el área de estudio mediante las ecuaciones descritas en el Cuadro 2, con el programa ENVI 5.1.

Continue Table 1...

Name	X	Y
Zapotlán*	516517.26	2128898.69
Tolcayuca*	512144.98	2200855.97
Zempoala*	532674.84	2205173.03

SMN= Servicio Meteorológico Nacional; DGE=Dirección General del Estado.

* Climate stations of INIFAP

The data from the stations between 1980 and 2014 were used. Based on their variances, it was determined whether or not the conditions of precipitation and temperature in the years 2000 and 2014 are comparable, since these have been shown to be the factors that most influence changes in the vegetation (Mao *et al.*, 2012). Thus, the effect of the changes in the vegetation caused by the climatic factors in the correlation between ΔVI_{00-14} and DU are considered.

d) Calculation of the difference between the vegetation indices in 2000 and 2014 and comparison between urbanization in each AGEb

Different VIs were calculated for the whole study area with the equations described in Table 2, using the ENVI 5.1 software.

For the TSAVI index, the soil line was defined according to Eastman (2009), who describes how to estimate the slope and the intercept of the values of the soil line based on a regression between the values of the pixels on the naked soil in relation to the values of the red or infrared band.

Once the indices were calculated, the main differences between the VIs were estimated, using the raster calculation for the evaluated years. The rasters resulting from the difference between the VIs (NDVI, SAVI, MSAVI, TSAVI) in the period 2000 and 2014 were denominated ΔVI_{00-14} .

The mean values of the ΔVI_{00-14} for each AGEb were estimated and compared to the proportion of urbanized surface area in each AGEb by means of charts in order to determine whether or not there is a relationship between the increase in urbanization and the ΔVI_{00-14} (Morawitz *et al.*, 2006; Dhorde *et al.*, 2012).



Cuadro 2. Índices de vegetación y su aplicación en el área de estudio.

Índice de vegetación* y Autor	Definición	Áreas de mayor eficiencia en la aplicación de los índices según las características del IV
NDVI (Rouse <i>et al.</i> , 1974)	$\frac{IRC - R}{IRC + R}$	Áreas con vegetación densa, norte de Pachuca, Matorral del NE de Tolcayuca, áreas protegidas.
SAVI (Huete, 1988)	$\frac{IRC - R}{IRC + R + L} (1 + L)$	Áreas con vegetación menos densa, matorral espaciado, matorral de la periferia de Pachuca y de los bordes del Valle además de pastizal.
TSAVI (Baret y Guyot, 1991)	$\frac{(A)(IRC - A \cdot R - B)}{R + A \cdot IRC - A \cdot B + X(1 + A^2)}$	Áreas con vegetación con poca densidad, áreas erosionadas, pastizales y matorrales muy fragmentados.
MSAVI (Qi <i>et al.</i> , 1994)	$\frac{2 \cdot IRC + 1 - \sqrt{(2 \cdot IRC + 1)^2 - 8(IRC - R)}}{2}$	Áreas con vegetación menos densa, matorral espaciado, matorral de la periferia de Pachuca y de los bordes del Valle además de pastizal.

*NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada; SAVI = Índice de vegetación ajustado al suelo; TSAVI = Índice de vegetación ajustado al suelo transformado, MSAVI = Índice de vegetación ajustado al suelo modificado; IRC = Banda en infrarrojo cercano; R = Banda en el rojo; L = Parámetro que consiste en una constante ajustada al suelo, y X que permite minimizar al máximo el efecto del suelo.

Table 2. Vegetation indices and their application in the study area.

Vegetation index* and Author	Definition	Areas of greater efficiency in the application of the indices according to the characteristics of the VI
NDVI (Rouse <i>et al.</i> , 1974)	$\frac{IRC - R}{IRC + R}$	Areas with dense vegetation, north of Pachuca, shrublands of NE Tolcayuca, protected areas.
SAVI (Huete, 1988)	$\frac{IRC - R}{IRC + R + L} (1 + L)$	Areas with less dense vegetation, spaced shrublands, shrublands of the periphery of Pachuca and the edges of the Valley, and grassland.
TSAVI (Baret and Guyot, 1991)	$\frac{(A)(IRC - A \cdot R - B)}{R + A \cdot IRC - A \cdot B + X(1 + A^2)}$	Areas with low density vegetation, eroded areas, grasslands and very fragmented shrublands.
MSAVI (Qi <i>et al.</i> , 1994)	$\frac{2 \cdot IRC + 1 - \sqrt{(2 \cdot IRC + 1)^2 - 8(IRC - R)}}{2}$	Areas with lower density vegetation, spaced shrublands, shrublands of the periphery of Pachuca and the edges of the Valley, and grassland.

*NDVI = Normalized Difference Vegetation Index; SAVI = Soil Adjusted Vegetation Index; TSAVI = Transformed Soil Adjusted Vegetation Index, MSAVI = Modified Soil Adjusted Vegetation Index; IRC = Near infrared band; R = Red band; L = Parameter consisting in a soil-adjusted constant, and X allowing to minimize the maximum soil effect.



Para el índice TSAVI, la línea del suelo se obtuvo de acuerdo a Eastman (2009), quien describe cómo obtener la pendiente y el intercepto de los valores de la línea del suelo a partir de una regresión entre los valores de los píxeles en suelo desnudo, con respecto a los valores de la banda roja o infrarroja.

Una vez calculados los índices, se determinaron las principales diferencias entre los IV, para ello se usó la calculadora *raster* para los años evaluados. Se denominaron ΔIV_{00-14} a los *raster* que resultan de la diferencia entre los IV (NDVI, SAVI, MSAVI, TSAVI) en el periodo 2000 a 2014.

Posteriormente, se estimaron los valores medios de las ΔIV_{00-14} para cada AGEb, los cuales se compararon con la proporción de área urbanizada en cada AGEb, a través de gráficas, con el fin de observar si existe relación del aumento de la urbanización con las ΔIV_{00-14} (Morawitz *et al.*, 2006; Dhorde *et al.*, 2012).

e) Correlaciones espaciales entre los IV y la distancia a las áreas urbanas

La correlación ΔIV vs. DU se calculó mediante regresión espacial bivariada, que se estima con el comando *REGRESS* del programa IDRISI, versión Taiga (Eastman, 2009). Para medirla, se generó un archivo *raster* booleano por cada unidad de análisis (AGEb) y se extrajo de cada uno de ellos 10 % de los píxeles, en forma aleatoria. Para descartar la existencia de autocorrelación, se aplicó el test de "I de Morán", con el comando *AUTOCORR* del mismo programa.

En seguida se comparó en cuáles AGEb la ΔIV tiene mayor correlación con DU, así como el signo de esta correlación, en la cual la variable dependiente es la DIV y la independiente es DU.

Resultados

a) Clasificación supervisada

Consiste en diferenciar el área urbana de otros tipos de cubiertas vegetales. En el caso de la clasificación del año 2000, los errores de omisión y comisión promedio resultaron de 0.17 y 0.15, respectivamente. Los datos de fiabilidad para toda la matriz de confusión se muestran en el Cuadro 3. El valor promedio fue de 0.83 y, por tanto, las áreas urbanas definidas son confiables.

e) Spatial correlations between the VIs and the distance to the urban areas

The ΔVI vs. DU correlation was estimated using a bivariate spatial regression, with the *REGRESS* command of the IDRISI Taiga software (Eastman, 2009). In order to measure it, a Boolean raster file was generated for each analysis unit (AGEb), and 10 % of the pixels were randomly extracted from each. In order to rule out the existence of a self-correlation, "Moran's I" test was applied, using the *SELF CHECK* command of the same software.

Next, the AGEbs in which the ΔVI has the highest correlation to DU were identified, determining the sign of this correlation, in which the dependent variable is the DIV and the independent variable is DU.

Results

a) Supervised classification

It consists in differentiating the urban area from other types of vegetal covers. In the case of the classification for the year 2000, the average omission and commission errors were of 0.17 and 0.15, respectively. Table 3 summarizes the reliability data for the entire confusion matrix. The average value was 0.83, and therefore the defined urban areas are reliable.

For the year 2014, the classification had an omission error of 0.13 and a commission error of 0.14. The average reliability of the classification was 80.3 % (Table 3). Based on these values, the urban area has grown by 51 % in the municipality of *Pachuca*, by 138 % in *Mineral de la Reforma*, and by 41 %, 13 % and 88 % in *Villa de Tezontepec*, *Tolcayuca* and *Tizayuca*, respectively.

Figure 2 shows the map of the growth of the urban sprawl in the study area between the years 2000 and 2014.

b) The years 2000 and 2014 within the climatic context of the area

The mean temperature was 14.82 ± 0.42 °C. A tendency ranging between 14.6 °C, in 1980, and 15.0 °C, in 2014, was observed; therefore, in the last 30 years there has been a warming of 0.4 °C (Figure 3).



Para el año 2014, la clasificación tuvo un error de omisión de 0.13 y de comisión de 0.14. La fiabilidad promedio de la clasificación fue de 80.3 %. (Cuadro 3). Con base en esos valores, el área urbana se ha incrementado 51 % en el municipio Pachuca, 138 % en Mineral de la Reforma, y 41 %, 13 % y 88 % en Villa de Tezontepec, Toluca y Tizayuca.

El mapa del aumento de la mancha urbana en la zona de estudio entre los años 2000 y 2014, se muestra en la Figura 2.

During the studied period, the mean temperature in the year 2000 was 14.8 °C for a variation of under 0.2 °C; it is therefore assumed that this variation did not affect the vegetation.

The mean precipitation value was 604 ± 95 mm, with a high standard deviation; this is indicative of the most disperse, unpredictable behavior of this parameter. For example, in the year 2007 there was an extreme event with high precipitations, a factor which may have influenced the results of the estimated $\Delta VI_{s_{00-14}}$.

Cuadro 3. Fiabilidad del usuario y productor para las categorías de cubierta del suelo clasificadas para 2000 y 2014.

Tipo de Cubierta	2000		2014	
Fiabilidad	Usuario	Productor	Usuario	Productor
Agua	1.0000	1.000	1.0000	1.000
Bosque Secundario	1.0000	1.000	0.9167	0.786
Bosque Coníferas	1.0000	1.000	1.0000	1.000
Agrícola Reposo	0.9607	0.831	0.7755	0.905
Erosión y sin vegetación	0.8571	0.8	0.8750	0.667
Urbano	0.8461	0.943	0.8667	0.813
Agrícola Cultivado	0.8333	0.769	0.5500	0.733
Matorral Alterado	0.6333	0.613	0.8649	0.889
Matorral sano, denso	0.9001	0.7500	0.8261	0.760
Pastizal	0.6236	0.892	0.7818	0.672
Fiabilidad de la matriz	0.830		0.803	

Table 3. User's and producer's reliability for the soil cover categories classified for 2000 and 2014.

Type of cover	2000		2014	
Reliability	User	Producer	User	Producer
Water	1.0000	1.000	1.0000	1.000
Secondary forest	1.0000	1.000	0.9167	0.786
Conifer forest	1.0000	1.000	1.0000	1.000
Fallow land	0.9607	0.831	0.7755	0.905
Erosion and absence of vegetation	0.8571	0.8	0.8750	0.667
Urban area	0.8461	0.943	0.8667	0.813
Cultivated agricultural land	0.8333	0.769	0.5500	0.733
Altered shrubland	0.6333	0.613	0.8649	0.889
Healthy, dense shrubland	0.9001	0.7500	0.8261	0.760
Grassland	0.6236	0.892	0.7818	0.672
Matrix reliability	0.830		0.803	

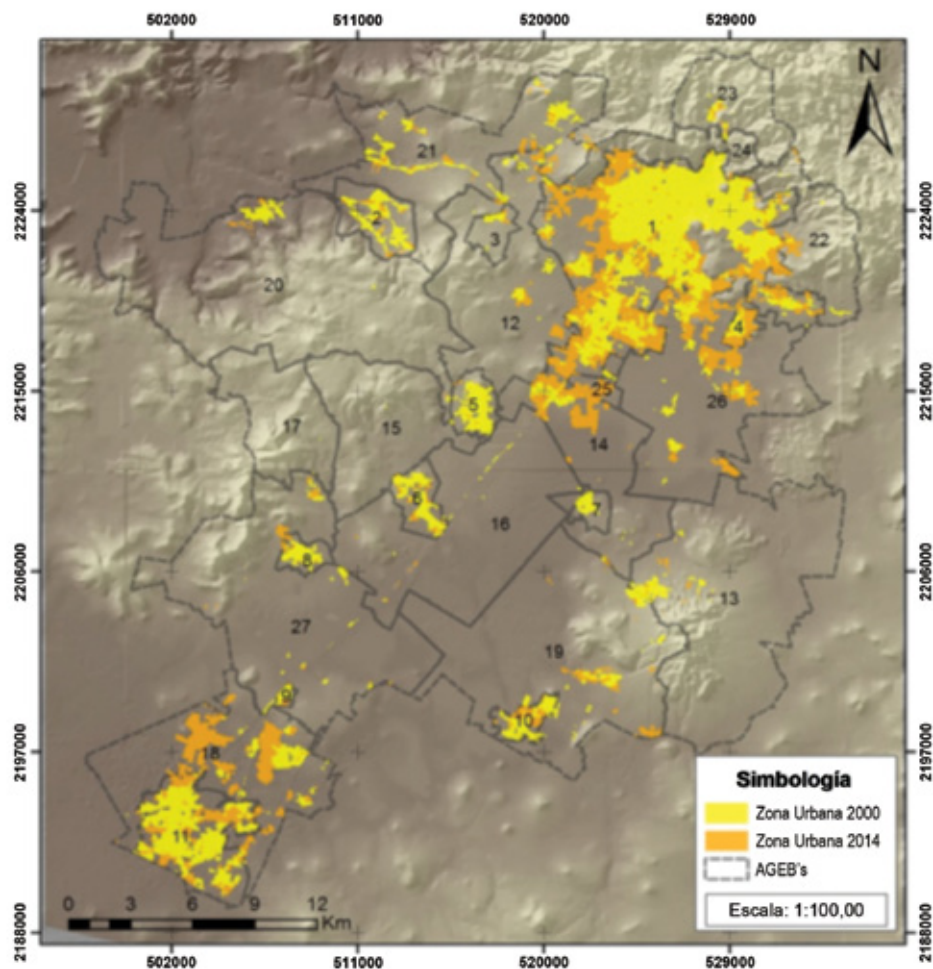


Figura 2. Diferencias de suelo urbano entre 2000 y 2014 calculadas mediante clasificación supervisada. Se muestra la división por AGEB Rural.

Figure 2. Differences in the urban soil between 2000 and 2014 estimated with supervised classification. The map shows the division by Rural AGEBS.

b) Los años 2000 y 2014 en el contexto climático de la zona

La temperatura media correspondió a 14.82 ± 0.42 °C. Se observa una línea de tendencia que inicia con 14.6 °C, en 1980, y termina con 15.0 °C en 2014, por lo que en los últimos 30 años ha existido un calentamiento de 0.4 °C (Figura 3).

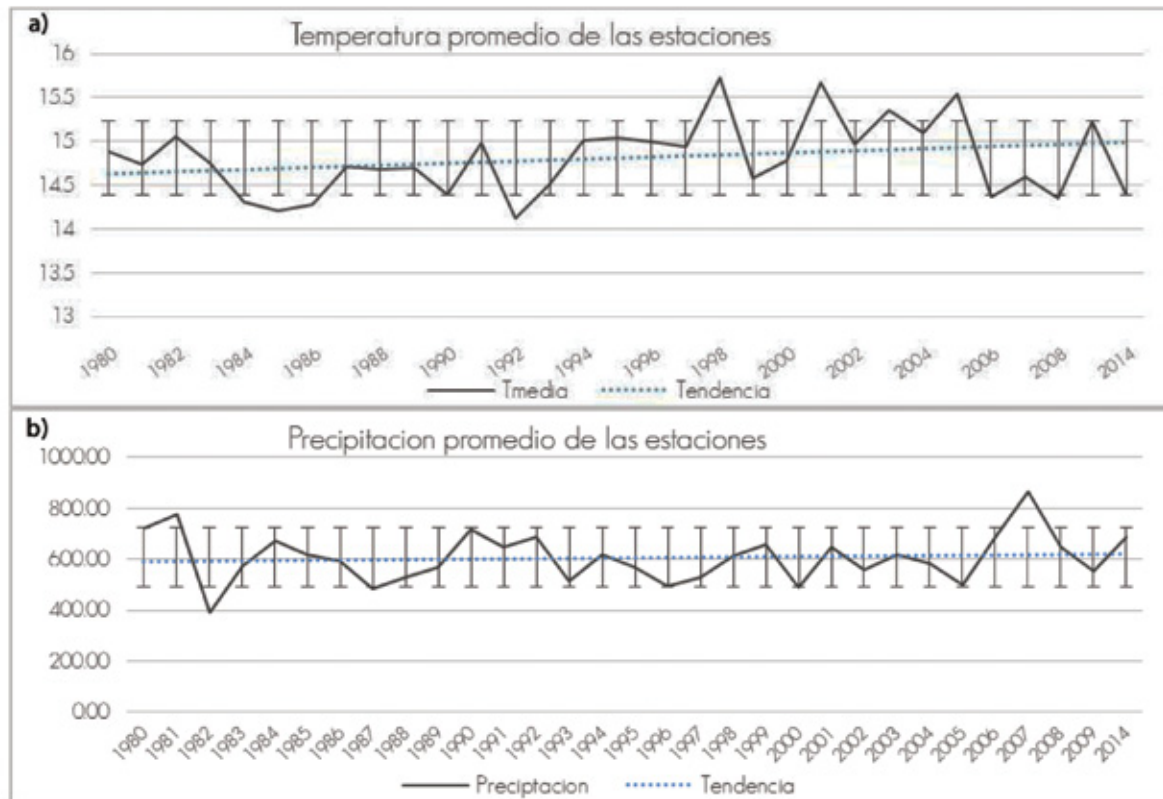
En el periodo estudiado, la temperatura media en el año 2000 fue de 14.8 °C, para una variación menor de 0.2 °C, por lo tanto se asume que no afecte la vegetación.

El valor medio de precipitación, 604 ± 95 mm, con una desviación estándar alta, lo cual indica el comportamiento más disperso e imprevisible de este parámetro. Por ejemplo, en el año 2007 hubo un evento extremo de altas precipitaciones; factor que pudo influir en los resultados de los ΔIV_{00-14} calculados.

c) Preliminary assessment of ΔVIs adjoining urbanization in each AGEB

The estimated ΔVIs show in which of the 27 AGEBS there was a coincidence with the growth of urbanization, as well as the changes in each of the estimated ΔVIs between the years 2000 and 2014 and their sign (Figure 4). The units with greatest impact on the vegetation were AGEBS 4, 7, 11, 14, 18, 25 and 26; of these, only AGEB 4 suffered a negative impact.





Fuente: Datos de precipitación (a) y temperatura (b) las estaciones meteorológicas existentes del SMN de 1980 a 2009. Excepto 2014, que es un promedio de las estaciones meteorológicas de INIFAP, ya que SMN solo cuenta con información en el periodo 1980 a 2010.

Source: Temperature (a) and precipitation (b) data from the existing climate stations of the NMS from 1980 to 2009. Except for 2014, which is an average of the climate stations of INIFAP, since the NMS only has information available for the period from 1980 to 2010.

Figura 3. Datos de precipitación (a) y temperatura (b) medias anuales durante 30 años (1980-2014).

Figure 3. Temperature (a) and precipitation (b) data from annual measurements through 30 years (1980-2014).

c) Valoración preliminar de DIV colindante a la urbanización en cada AGEB

Los ΔIV calculados permiten visualizar en cuáles de las 27 AGEB hubo coincidencia con el aumento de la urbanización y los cambios de cada uno de los ΔIV calculados entre los años 2000 y 2014, así como su signo (Figura 4). Las unidades que tuvieron el mayor impacto en la vegetación son los AGEB 4, 7, 11, 14, 18, 25 y 26, de ellas, solo la AGEB 4 presentó un impacto negativo.

Se observa que hay 10 AGEB con importantes crecimientos en la urbanización, y en esos casos DIV no siempre fue negativo.

Relaciones desfavorables del ΔIV respecto al cociente de urbanización U/NU. Se observan en las AGEB en las que aumentó el área urbanizada y el ΔIV fue negativo. Estas áreas corresponden, en general, a los asentamientos y poblaciones (Pachuca, AGEB 1; Fraccionamientos de Mineral de la Reforma, AGEB 4 y Tizayuca, AGEB 9), y que se han extendido sobre la vegetación nativa o por el uso de matorral y pastizal, como ocurre en el municipio Zapotlán de Juárez (AGEB 6, TSAVI).

The urban sprawl was observed to have grown considerably in 10 AGEBs; in these cases, the DIV was not always negative.

Unfavorable relationships between the ΔVI and the U/NU urbanization ratio. In the AGEBs in which the urbanized area grew, the ΔVI was negative. These areas correspond in general to the settlements, towns and cities (Pachuca, AGEB 1; the Mineral de la Reforma residential developments, AGEB 4, and Tizayuca, AGEB 9), which have spread over the native vegetation or are due to the use of the shrublands and grasslands, as in the municipality of Zapotlán de Juárez (AGEB 6, TSAVI).

Favorable relationships between the ΔVI and the U/NU urbanization ratio. These occurred in the AGEBs whose cultivation areas have expanded and which have positive ΔVI s, despite urbanization. This is evident, especially in the southern residential developments of the Pachuca municipality (AGEB 25) and of Mineral de la Reforma (AGEB 26), and, to a lesser degree, in Jagüey de Téllez (AGEB 14), El Cid (AGEB 18), Villa de Tezontepec (AGEB 10) and Tizayuca-Huizila (AGEB 11).

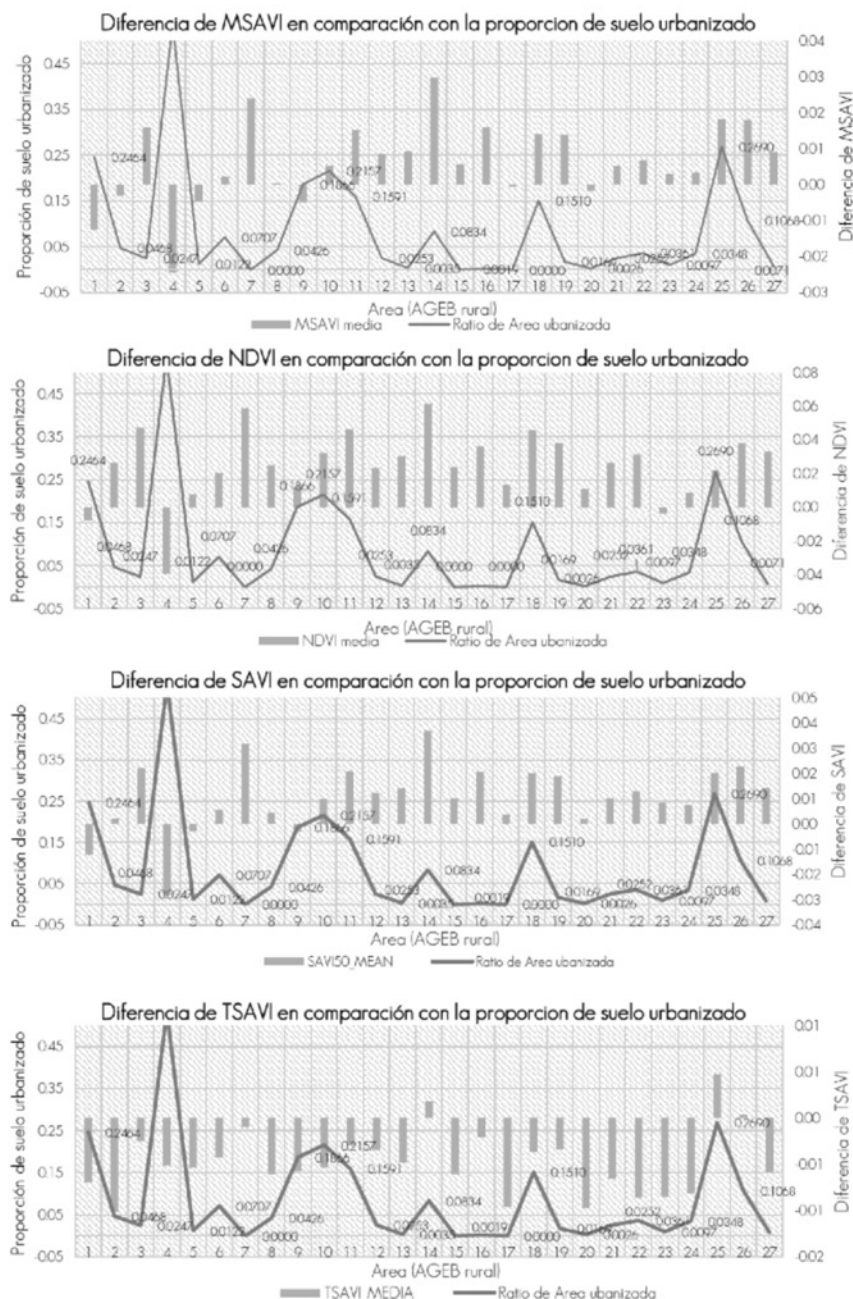
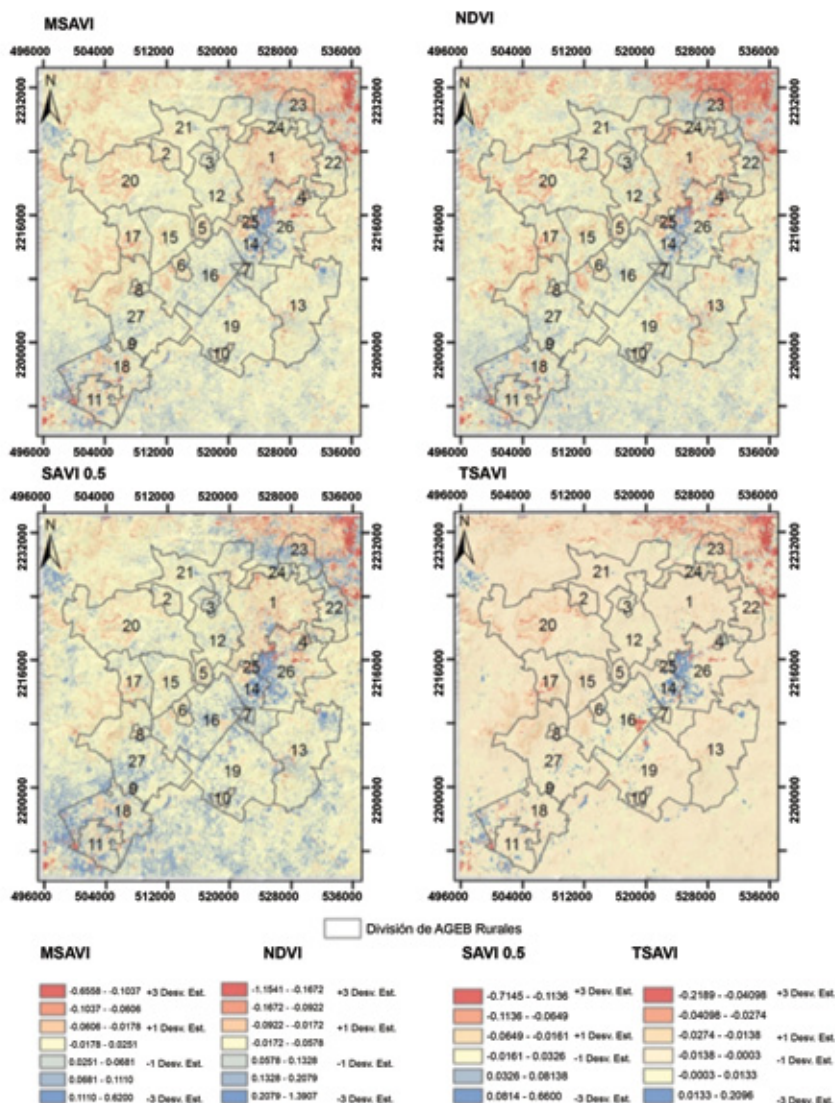


Figura 4. Diferencias positivas y negativas de los IV en comparación con el suelo urbanizado. (AGEB en el eje X. Proporción de suelo urbanizado (cocientes U/UN) por AGEB y DIV en Y).

Figure 4. Positive and negative differences between the VIs compared to the urbanized soil. (AGEB on the X-axis. Proportion of urbanized soil (U/UN ratios) by AGEB and Δ VIs on the Y-axis).

Relaciones favorables de Δ IV respecto al cociente U/NU. Se registraron las AGEBS en donde las áreas de cultivo se han ampliado y presentan Δ IV positivos, a pesar de la urbanización. Lo anterior ocurre, principalmente, en los fraccionamientos del sur del municipio Pachuca (AGEB 25) y Mineral de la Reforma (AGEB 26), y con menor énfasis

Figure 5 includes the maps with the location of the AGEBS for each estimated Δ VI. Increases in the Δ VIs -e.g. those sites where the vegetation has recuperated- are highlighted in blue; Δ VI losses are highlighted in red.



Elaborado a partir de los IV obtenidos y las modificaciones de suelo determinados, clasificado según desviaciones estándar.

Prepared based on the determined VIs and modifications to the soil, classified by standard deviation.

Figura 5. Diferencias positivas y negativas de los IV en por AGEB Rural.

Figure 5. Positive and negative differences between the VIs by Rural AGEB.

en Jagüey de Téllez (AGEB 14), El Cid (AGEB 18), Villa de Tezontepec (AGEB 10) y Tizayuca-Huizila (AGEB 11).

La Figura 5 muestra los mapas con la localización de las AGEB, para cada ΔIV calculado. En color azul se destacan los aumentos ΔIV ; es decir sitios en los que la vegetación se ha visto recuperada. En color rojo, se distinguen las pérdidas de ΔIV .

d) Correlaciones espaciales entre los ΔIV s y la distancia a las áreas urbanas DU

La correlación entre ΔIV y la DU se estimó en cada unidad de análisis (AGEB). Se descarta la autocorrelación en cada una

d) Spatial correlations between the ΔVIs and the DU distance to the urban areas

The correlation between the ΔVIs and the DU was estimated for each analysis unit (AGEB). The self-correlation in each was ruled out using Moran's I test, which gave as a result an average value of 0.07. This means that the proximity of the extracted pixels did not produce a specification error.

Table 4 shows the linear regression parameters of the correlations that turned out to be significant and have higher R-values for the net values of ΔVI vs. DU.

mediante el test I de Morán, que dio un valor promedio de 0.07. Esto significa que la proximidad de los píxeles tomados no produce un error de especificación.

En el Cuadro 4 se consignan los parámetros de regresión lineal de las correlaciones que resultaron significativas, y con mayores valores de R para los valores netos de ΔIV vs. DU.

Discussion

The estimated correlations are valid in the spatial analyses such as were applied in the present study, an example of which are the studies citing correlations between urbanization-related variables (population density, distance to the urban infrastructure, average income) and $\Delta NDVI$ with R-values

Cuadro 4. Parámetros de correlaciones significativas ΔIV vs. DU en AGEb.

DIV neto	AGEb	R	t-value	n	b
$\Delta NDVI_{00-14}$	4	-0.5781**	-5.3275	59	-0.000223
$\Delta NDVI_{00-14}$	7	0.3137*	2.9718	83	0.000077
$\Delta NDVI_{00-14}$	8	0.3922**	4.2380	101	0.000156
$\Delta NDVI_{00-14}$	23	-0.3934**	-9.9662	544	-0.000067
$\Delta MSaVI_{00-14}$	4	-0.4305*	-3.6012	59	-0.000077
$\Delta MSaVI_{00-14}$	8	0.3320*	3.5000	101	0.000080
$\Delta MSaVI_{00-14}$	23	-0.3011**	-7.3500	544	-0.000028
$\Delta SaVI25_{00-14}$	4	-0.5010**	-4.3787	59	-0.000102
$\Delta SaVI25_{00-14}$	8	0.3666*	3.9170	101	0.000027
$\Delta SaVI50_{00-14}$	4	-0.4678*	-3.9973	59	-0.000102
$\Delta SaVI1_{00-14}$	4	-0.4304*	-3.6000	59	-0.000077
$\Delta TSaVI_{00-14}$	4	-0.4684*	4.0010	59	-0.000015

*Nivel de significación $p < 0.05$.

**Nivel de significación $p < 0.01$, (Sin asterisco=No significativo)

R = Coeficiente de correlación lineal; t-value = t de Student; n = Número de píxeles; β = Pendiente de la recta.

Table 4. Parameters of significant correlations ΔVI vs. DU in AGEb.

Net ΔVI	AGEb	R	t-value	n	b
$\Delta NDVI_{00-14}$	4	-0.5781**	-5.3275	59	-0.000223
$\Delta NDVI_{00-14}$	7	0.3137*	2.9718	83	0.000077
$\Delta NDVI_{00-14}$	8	0.3922**	4.2380	101	0.000156
$\Delta NDVI_{00-14}$	23	-0.3934**	-9.9662	544	-0.000067
$\Delta MSaVI_{00-14}$	4	-0.4305*	-3.6012	59	-0.000077
$\Delta MSaVI_{00-14}$	8	0.3320*	3.5000	101	0.000080
$\Delta MSaVI_{00-14}$	23	-0.3011**	-7.3500	544	-0.000028
$\Delta SaVI25_{00-14}$	4	-0.5010**	-4.3787	59	-0.000102
$\Delta SaVI25_{00-14}$	8	0.3666*	3.9170	101	0.000027
$\Delta SaVI50_{00-14}$	4	-0.4678*	-3.9973	59	-0.000102
$\Delta SaVI1_{00-14}$	4	-0.4304*	-3.6000	59	-0.000077
$\Delta TSaVI_{00-14}$	4	-0.4684*	4.0010	59	-0.000015

*Significance level $p < 0.05$.

** Significance level $p < 0.01$, (Without asterisk=Not significant)

R = Linear correlation coefficient; t-value = Student's t; n = Number of pixels; β = Slope of the linear regression line.

Discusión

Las correlaciones estimadas son válidas en los análisis espaciales como los aplicados en el presente estudio, ejemplo de ello son los trabajos que citan correlaciones entre variables relacionadas a la urbanización (densidad de población, distancia a infraestructura urbana, ingreso promedio) y Δ NDVI con valores de R entre 0.225 y 0.381 (Li *et al.*, 2014). También se obtuvo un valor de $R = 0.6$ para la correlación entre la densidad de población urbana y Δ NDVI (Morawitz *et al.*, 2006), o entre aspectos socioeconómicos y DIV con valores de R de 0.14 a 0.32 (Mennis, 2006). En este trabajo, los valores de R son mayores a los anteriores y semejantes a los indicados por Jenerette *et al.* (2007) y Levin (2015).

Se analizó la influencia de la distancia a zonas urbanas sobre los IV como el parámetro principal que describe su cambio Δ IV, se llevó a cabo utilizando valores de Δ IV y DU. De los resultados señalados en el Cuadro 4, se desprende que las AGEB 4 y 23 presentaron un mayor impacto en la vegetación colindante a sus áreas urbanas, mientras que la AGEB 8 no tuvo la misma tendencia.

La AGEB 4 (fraccionamientos del municipio Mineral de la Reforma) registró una correlación lineal negativa con la DU para los cuatro índices evaluados, y esto significa que, en general, la cercanía a las áreas urbanas conlleva a un decrecimiento de la calidad de la vegetación. Se observan que los valores de los coeficientes de correlación R moderados, que varían entre -0.43 y -0.57. El AGEB 23 también presentó correlaciones negativas solo con MSAVI y NDVI, cuyos valores de R correspondieron a -0.30 y -0.39 debido a que en esta zona la vegetación es densa.

En el AGEB 8 (Tolcayuca) las correlaciones fueron positivas significativas, excepto con el TSAVI, en respuesta a la presencia de zonas de matorral denso, y este índice es representativo de zonas con vegetación dispersa. El AGEB 7, solamente, registró correlación significativa con el NDVI, debido a que aumentó el área cultivada entre 2000 y 2014. El cambio positivo en las DIV se produce, principalmente, en áreas lejanas a las áreas urbanas.

Los valores de las pendientes (β_1) resultaron pequeños ya que son multiplicadores de la distancia, expresada en metros y, por ello, su intervalo es del 0 a 20 000. Se observa que los valores de β_1 son un orden mayor en la AGEB 4; es decir, que la vegetación es mucho más sensible a la cercanía de la zona urbana que otras AGEB. Similarmente, el AGEB 8 tuvo el valor mayor de pendiente en la regresión con el NDVI. Con este Δ IV se obtuvieron las pendientes mayores. Los otros IV también responden al cambio y pueden describirlo, pero no son tan sensibles como NDVI en las áreas estudiadas.

between 0.225 and 0.381 (Li *et al.*, 2014). An R-value of 0.6 was also obtained for the correlation between the urban population density and Δ NDVI (Morawitz *et al.*, 2006), or between socioeconomic aspects and Δ VI with R-values of 0.14 to 0.32 (Mennis, 2006). In this paper, R-values are higher than these and similar to those indicated by Jenerette *et al.* (2007) and Levin (2015).

The influence of the distance to the urban areas on the VIs as the main parameter describing their change, Δ VI, was analyzed using Δ VI and DU values. From the results listed in Table 4, it is evident that AGEBs 4 and 23 had a greater impact on the vegetation adjoining its urban areas, while AGEB 8 did not show the same tendency.

AGEB 4 (residential developments of *Mineral de la Reforma* municipality) registered a negative linear correlation with the DU for the four evaluated indices; this means that, in general, the nearness of urban areas entails a decrease in the quality of the vegetation. It is observed that the values of the moderate correlation coefficients R range between -0.43 and -0.57. AGEB 23 also showed negative correlations only with MSAVI and NDVI, whose R-values were -0.30 and -0.39, because the vegetation in this area is dense.

In AGEB 8 (*Tolcayuca*), the correlations were positive and significant, except with TSAVI, in response to the presence of dense shrubland areas, for this index is representative of scattered vegetation areas. AGEB 7 alone registered a significant correlation with the NDVI because the cultivated area increased between 2000 and 2014. The positive change in the Δ VIs occurred mainly in areas that are far from the urban areas.

The values of the slopes (β_1) turned out to be low because they multiply the distance, expressed in meters, and therefore, their interval ranges between 0 and 20 000. Values are higher in AGEB 4; i.e. the vegetation is much more sensitive to the nearness of the urban area than other AGEBs. Likewise, AGEB 8 had the highest slope value in the regression with the NDVI. The highest slope values were obtained with this Δ VIs. Other VIs respond to the change and can describe it, but they are not as sensitive as the NDVIs in the studied areas.

It must be considered that the climatic parameters may be a cause of more dispersion of the data during the same period of the year because the precipitation has important variations through the analyzed years. This effect produces the greatest changes in the vegetation despite the fact that there are no significant differences in temperature. These works cannot be separated from the climatic factors, which are the main causes of point dispersion in the regression and, therefore, of the low and moderate values of R (Wessels *et al.*, 2007). In the particular case of the work documented herein, the Δ VIs due to the nearness of the urban area may be higher

Es necesario considerar que los parámetros climáticos pueden ser causa de más dispersión de los datos en el mismo periodo del año, ya que la precipitación presenta variaciones importantes a lo largo de los años analizados. Efecto que causa los mayores cambios en la vegetación, a pesar de que la temperatura se comporta sin grandes diferencias. Estos trabajos no se pueden deslindar de los factores climáticos, que son las principales causas de la dispersión de los puntos en la regresión y, por tanto, de los bajos y moderados valores de R estudiados (Wessels *et al.*, 2007). En el caso particular de este trabajo, los ΔIV debidos a la cercanía de la zona urbana podrían ser mayores a los esperados ya que la precipitación en el año 2014 fue significativamente superior a la de 2000 (Figura 3).

La estrategia metodológica utilizada para describir los cambios de ΔIV resultó válida en el estudio de caso y el análisis de sus resultados proporciona elementos para los responsables de elaborar políticas públicas para la conservación de ecosistemas que están sujetas a presión por áreas urbanas, una vez identificadas las zonas de vegetación más susceptibles.

Conclusiones

La estimación de las correlaciones espaciales entre distancia a las áreas urbanas y ΔIV permiten conocer las áreas con mayor presión urbana sobre la vegetación.

La correlación de los valores netos de ΔIV resulta significativa e inversamente proporcional a la DU, lo que demuestra que la degradación de la vegetación es mayor a menor distancia de los centros de población rurales o urbanos.

Los AGEB más pequeños presentan pendientes mayores en la correlación ΔIV vs DU y, por tanto, es recomendable utilizar escalas de mayor resolución para estos estudios, en lugar de áreas administrativas que presentan grandes diferencias de superficies.

La correlación espacial entre la diferencia en los índices de vegetación y la distancia a los asentamientos humanos es una aproximación que permite definir en qué áreas es mayor el impacto en la vegetación por la presión urbana. Es recomendable aplicar este método calculando la ΔIV en años con parámetros climáticos muy semejantes.

Los NDVI resultan buenos indicadores de los IV para detectar los impactos de la zona urbana sobre la vegetación colindante, mediante el análisis de correlación lineal de sus cambios en un periodo de tiempo con la distancia a la mancha urbana.

Agradecimientos

María de la Luz Hernández Flores y Abraham Palacios Romero agradecen a Conacyt, México por la beca otorgada. Los autores reconocen el apoyo

than expected, since the precipitation in the year 2014 was significantly greater than in the year 2000 (Figure 3).

The methodological strategy utilized to describe the changes in ΔVIs was valid in the case study and the analysis of its outcomes provides elements for public policy makers to preserve ecosystems subjected to pressure by the urban areas, once the most susceptible vegetation areas have been identified.

Conclusions

The estimation of spatial correlations between the distance to urban areas and the ΔVIs provides a more precise knowledge of the areas with greatest urban pressure on the vegetation.

The correlation between the net values of the ΔVIs is significant and inversely proportional to the DU, which proves that the degradation of the vegetation is larger at a smaller distance from the rural or urban population centers.

The smallest AGEBs have larger slopes in the ΔVI vs DU correlation and, therefore, it is advisable to use scales with a higher resolution for these studies instead of administrative zones with large differences in surface area.

The spatial correlation between the difference in the vegetation indices and the distance to human settlements is an approximation that allows determining in which areas the urban pressure exerts a greater impact on the vegetation. It is advisable to apply this method calculating the ΔVI for years with very similar climatic parameters.

The NDVIs are good indicators of the VIs for the detection of the impacts of the urban area on the adjoining vegetation through the linear correlation analysis of their changes with the distance to the urban sprawl within a given period.

Acknowledgements

María de la Luz Hernández Flores and Abraham Palacios Romero are grateful to the *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* (Conacyt), for the awarded grant. The authors wish to acknowledge the financial and logistic support provided by the "Environmental Quality and Sustainable Development national network of the Teachers Improvement Program (PROMEP) and to the *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*. Likewise, we are grateful to the *Sociedad Mexicana de Recursos Forestales* for the funding of the publication of this paper.



financiero y de logística para la realización de este trabajo a la red nacional PROMEP "Calidad Ambiental y Desarrollo Sustentable" y a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Asimismo expresan agradecimiento a la Sociedad Mexicana de Recursos Forestales por el financiamiento para la publicación del artículo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

María de la Luz Hernández Flores: trabajo experimental (clasificación supervisada, análisis espacial) y discusión de resultados, Abraham Palacios Romero: apoyo trabajo experimental, Elena María Otazo Sánchez: redacción y discusión de resultados, César Abelardo González Ramírez: estadística, Alberto José Gordillo Martínez: enfoque urbanístico, Karen Andrea Mendoza Herrera: cartografía y elaboración de mapas.

Referencias

- Arias, H. A., R. M. Zamora y C. V. Bolaños. 2015. Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, RapidEye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo FLAASH del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*:39-60.
- Bannari, A., D. Morin and A. Huete. 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*:95-120.
- Baret, F. and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment* 35(2-3): 161-173.
- Benliay, A. and A. Altıntaş. 2014. Using NDVI to Assess Vegetative Land Cover Change in Coastline of Belek, Antalya. *Journal of Selçuk University Natural and Applied Science*:11.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). 2005. Programa de conservación y manejo del Parque Nacional El Chico. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México, D.F., México. 236 p.
- Cuevas M., L. A. Garrido, J. Pérez y D. González. 2010. Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural. In: Cotler, H. (coord.). *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*. Semarnat, INE y Fundación G. Río Arriente IAP México, D.F., México. pp. 96-103.
- Chander, G., B. L. Markham and D. L. Helder. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* 113:893-903.
- Dhorde, A., S. Das and A. Dhorde. 2012. Evaluation of Land Use/Land Cover Change in Mula-Mutha Watershed, Pune Urban Agglomeration, Maharashtra, India, Based on Remote Sensing Data. *Earth Science India* 5 (3):108-121.
- Eastman, R. 2009. *Idrisi Taiga, Guide to GIS and Image Processing*. Clark University, Worcester, MA, USA. 342 p.
- Figueroa- Jáuregui, M. L., L. A. Ibáñez C., R. Arteaga R., J. L. Arellano M. y M. Vázquez P. 2011. Cambio de uso de suelo en la Cuenca de San Cristóbal de las Casas, México. *Agrociencia* 45:531-544.
- Galicia, L., M. L. C. Fernández, L. M. G. Ramírez and S. Couturier. 2014. Detección de cambio ambiental en selvas y bosques de México con percepción remota: un enfoque multiescalar de espacio y tiempo. *Interciencia* 39:368.
- García-Mora, T. J. y J. F. Mas. 2008. Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México. *Investigaciones Geográficas* 67: 7-19.
- Hantson, S., E. Chuvieco, X. Pons, C. Domingo, C. Cea, G. Moré, J. Cristobal, J. J. Pece y J. A. Tejero. 2011. Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección. *Revista de Teledetección* 36:51-61.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Contribution by author

María de la Luz Hernández Flores: experimental work (supervised classification, spatial analysis) and discussion of results, Abraham Palacios Romero: support in the experimental work; Elena María Otazo Sánchez: writing and discussion of results; César Abelardo González Ramírez: statistics; Alberto José Gordillo Martínez: urbanistic focus; Karen Andrea Mendoza Herrera: mapping.

End of the English version



- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment* 25: 295-309.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (Inegi). 1999. *Ortofotos digitales*. Fuente: fotografías aéreas escala 1:75 000. Proyección: UTM. Datum: ITRF92. Elipsoide: GRS 80. Dimensiones del pixel X,Y: 1.5 metros. *Productos geográficos básicos digitales*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México, D.F., México. s/p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (Inegi). 2007. *Conjunto de datos vectoriales de áreas geoestadísticas básicas rurales*. Instituto Nacional de Estadística y geografía. Aguascalientes, Ags., México. s/p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (Inegi). 2008. *Conjunto de datos vectoriales de Unidades Climáticas Escala 1:1 000 000*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags., México. s/p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (Inegi). 2014. *Anuario estadístico y geografico de Hidalgo 2013*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags., México. 573 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (Inegi). 2014. *Anuario estadístico y geografico de Hidalgo 20013*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags., México. 573 p.
- Jenerette, G. D., S. L. Harlan, A. Brazel, N. Jones, L. Larsen and W. L. Stefanov. 2007. Regional relationships between surface temperature, vegetation, and human settlement in a rapidly urbanizing ecosystem. *Landscape Ecology* 22:353-365.
- Kruse, F. A., 2004. Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, CO. In: Green, R. O. (ed.). *Quiénes Summaries of 13th JPL Airborne Geoscience Workshop*, Jet Propulsion Lab. Pasadena, CA. <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/38724/1/05-3.pdf> (30 de noviembre de 2015).
- Levin, N. 2015. Human factors explain the majority of MODIS-derived trends in vegetation cover in Israel: a densely populated country in the eastern Mediterranean. *Regional Environmental Change* DOI.10.1007/s10113-015-0848-4.
- Li, G. Y., S. Chen, Y. Yan and C. Yu. 2014. Effects of Urbanization on Vegetation Degradation in the Yangtze River Delta of China: Assessment Based on SPOT-VGT NDVI. *Journal of Urban Planning Development* 141(4): 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000249.
- Mao, D., Z. Wang, L. Luo and C. Ren. 2012. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 18:528-536.

- Martin, C. A., P. S. Warren and A. P. Kinzig. 2004. Neighborhood socioeconomic status is a useful predictor of perennial landscape vegetation in residential neighborhoods and embedded small parks of Phoenix, AZ. *Landscape and Urban Planning* 69: 355-368.
- Mas, J. F., M. Kolb, M. Paegelow, M. T. Camacho O. and T. Houet. 2014. Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environmental Modelling & Software* 51: 94-111.
- Mas, J. F., J. R. Díaz-Gallegos y A. Pérez-Vega. 2003. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas* 51: 53-72.
- Meneses-Tovar, C. L. 2011. El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasylva* 238(62):39-46.
- Mennis, J., 2006. Socioeconomic-Vegetation Relationships in Urban, Residential Land. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72: 911-921.
- Morawitz, D., T. Blewett, A. Cohen and M. Alberti. 2006. Using NDVI to Assess Vegetative Land Cover Change in Central Puget Sound. *Environmental Monitoring and Assessment* 114: 85-106.
- Pérez-Morales, J. A. 2014. Índice de degradación de la vegetación sometida a manejo forestal en el sur de Nuevo León, México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, N.L., México. 68 p.
- Pineda-Jaimes, N., J. Bosque S., M. Gómez D. y W. Plata R. 2009. Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 69:33-52.
- Qi, J., A. Chehbouni, A. Huete, Y. Kerr and S. Sorooshian. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sensing of environment* 48: 119-126.
- Rouse, J. W., H. R. Haas, D. W. Deering, J. A. Schell and J. C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC. Greenbelt, MD, USA. 371 p.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2007. Carta Geológico-Minera f14-11. Estado de Hidalgo. Escala 1:250 000. Mexico. Secretaría de Economía, México, D.F., México. s/p.
- Sun, J., X. Wang, A. Chen, Y. Ma, M. Cui and S. Piao. 2011. NDVI indicated characteristics of vegetation cover change in China's metropolises over the last three decades. *Environmental monitoring and assessment* 179:1-14.
- Torres, E., G. Linares, M. G. Tenorio, R. Peña, R. Castelán y A. Rodríguez. 2014. Índices de vegetación y Uso de Suelo en la Región Terrestre Prioritaria 105: Cuetzalan, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 1(3):101-112.
- Wessels, K. J., S. D. Prince, J. Malherbe, J. Small, P. E. Frost and D. VanZyl. 2007. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa. *Journal of Arid Environments* 68: 271-297.
- Zuria, I. and H. G. Rendón. 2010. Notes on the breeding biology of common resident birds in an urbanized area of Hidalgo, Mexico. *Huitzil* 11(1): 35-41.



