

Índices de vegetación y Uso de Suelo en la Región Terrestre Prioritaria 105: Cuetzalan, México

Edgardo Torres¹, Gladys Linares¹, M. Guadalupe Tenorio¹, Ricardo Peña¹, Rosalía Castelán¹, América Rodríguez²

Instituto de Ciencias¹, Unidad Académica de Desarrollo Regional²
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla¹, Universidad Autónoma de Guerrero²
Puebla, Pue.¹; Acapulco, Gro.²; México

[etorres23, mariluar, ricardopena_7] @hotmail.com, [gladys.linares, rosalia.castelan] @correo.buap.mx, amerodriguez@gmail.com

Abstract— Climate change have unique characteristics and global nature, with medium impact and long-term, involves complex interactions between different natural processes, what is essential observation of changes, conserved areas with important source of natural resources. This paper proposes a simple methodology, economic and with significant results to streamline field studies. Which aims to identify some vegetation indices and changes in land use based on digital processing and interpretation of satellite images. Based on available data and considering field information determined some vegetation indices and changes in land use in the priority land region derived of agricultural activities, and take action and conservation measures.

Keyword— *Vegetation indices, land use, remote sensing.*

Resumen— El cambio climático tiene características únicas y de naturaleza global, con impacto a mediano y largo plazo, involucrando interacciones complejas entre diferentes procesos naturales, lo que hace indispensable la observación de los cambios, en zonas conservadas con importante fuente de recursos naturales. Este trabajo propone una metodología sencilla, económica y con resultados significativos para agilizar los estudios de campo. El objetivo es determinar algunos índices de vegetación y cambios de uso de suelo basándose en procesamiento e interpretación de imágenes satelitales. Partiendo de datos existentes y considerando información de campo se determinó densidades de vegetación y los cambios de uso de suelo en la Región Terrestre Prioritaria que derivan de actividades agropecuarias, así tomar acciones y medidas para su conservación.

Palabras claves— *Índices de vegetación, uso de suelo, Teledetección.*

I. INTRODUCCIÓN

El análisis de la vegetación y la detección de los cambios de sus patrones, son claves para la evaluación de recursos naturales y su monitoreo, sobre todo cuando estos recursos son susceptibles al cambio climático, siendo la percepción remota una herramienta útil para la evaluación cuantitativa del estado de la vegetación. Estas evaluaciones se apoyan en la información obtenida a partir de los índices de vegetación, que son medidas cuantitativas, basadas en valores digitales útiles para estimar la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de la vegetación dentro de un píxel. Valores altos de índices de vegetación, significan píxeles representativos para vegetación saludable. La interpretación de imágenes de satélite permite obtener de forma rápida estimaciones de áreas con cobertura vegetal o cultivada, la información permite elaborar mapas temáticos actualizados y precisos, que contienen las diferentes estructuras espaciales resultantes del proceso de ocupación y uso del suelo, así como también de los recursos hídricos, cambio de uso de suelo, así como la estimación de su temperatura superficial, etc. Es importante destacar que esta información puede ser actualizada periódicamente, a bajo costo en comparación con otros métodos tales como censos, restitución aerofotogramétrica, etc.

II. JUSTIFICACIÓN

Por otro lado, se aprovecha el comportamiento radiométrico de la vegetación sana en las diferentes bandas espectrales, especialmente entre el espectro visible y el infrarrojo cercano. En el espectro visible, en particular en la banda roja, los pigmentos de las hojas de las plantas absorben la mayor parte de la energía que reciben de sol, estas pigmentaciones apenas afectan al infrarrojo cercano (Chuvienco, 2007). Los contrastes de la imagen son utilizados para el cálculo de los índices de vegetación, estableciéndose diferencias entre la vegetación; en presencia de vegetación sana se observa un claro contraste entre el espectro de la región visible, especialmente la banda roja, y en el infrarrojo cercano, mientras que en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben. Por otro lado el uso de suelo y vegetación se refiere al resultado de las actividades socioeconómicas que se desarrollan o se han desarrollado sobre una cobertura. Estas actividades se relacionan con la apropiación de recursos naturales para la generación de bienes y servicios (Bocco et al., 2001:19). Las características del uso del suelo son el resultado de la relación entre los factores físicos o naturales y los factores culturales o humanos. Es importante destacar que los factores sociales y culturales representan un papel fundamental dentro de la transformación del cambio de uso del suelo y vegetación, pues gracias a las costumbres, hábitos y formas de organización social se determinan en gran medida la velocidad e intensidad estas transformaciones. Para el estado de Puebla se reportan ocho Regiones Terrestres Prioritarias (RTP), compartidas con estados vecinos, cada una de estas RTP presenta una problemática ambiental específica, generalmente relacionada con la fragmentación de los sistemas naturales o con las prácticas de manejo inadecuadas que, en su conjunto, constituyen una amenaza para la integridad y funcionalidad del ecosistema. Las principales amenazas de la biodiversidad en las RTP se derivan de actividades agropecuarias, puesto que estas suelen inducir cambios de uso de suelo, al desarrollar actividades de roza, tumba y quema, que además favorecen incendios forestales, por lo que se vuelve imprescindible instrumentar acciones y medidas urgentes para su conservación.

De acuerdo con la información anterior, el presente trabajo pretende comparar índices de vegetación y cambios de uso de suelo calculados a partir de la información que proporciona cada pixel de las imágenes Landsat obtenidas para la Región Terrestre Prioritaria 105: Cuetzalan, Puebla, y determinar las características de la zona según su cubierta vegetal en dos períodos: 1994 y 2005.

III. ÁREA DE ESTUDIO: REGIÓN TERRESTRE PRIORITARIA (RTP) 105, CUETZALAN.

El estudio se sitúa en la Región Terrestre Prioritaria 105: Cuetzalan, y de acuerdo a Arriaga et al., (2000) se ubica en las coordenadas extremas: 19°46'23'' y 20°11'55'' de latitud norte y 97°09'17'' a 97°38'36'' de longitud oeste, con una superficie de 1,284 km², esta región se definió como prioritaria para la conservación debido a la existencia de bosques mesófilo de montaña, selva alta perennifolia en las partes bajas y bosques de encino, y bosque encino en asociación con pino; desafortunadamente esta zona prioritaria para la conservación de especies presenta grandes extensiones perturbadas. El único manchón significativo de selva alta se ubica entre las cotas de 200 y 400 msnm y el bosque mesófilo se presenta en las laderas entre los 1,200 y 1,800 msnm (Figura1). El aprovechamiento de los recursos naturales que se realiza en la RTP se relaciona con actividades forestales, agrícolas y/o pecuarias, generalmente asociadas a la deforestación, degradación o transformación del ecosistema.

IV. MATERIALES

- El material satelital comprende: imágenes Landsat con los sensores: MSS (Multi Spectral Scanner), TM (Thematic Mapper), ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) que corresponden al satélite Landsat 5 y Landsat 7 respectivamente; la imagen TM corresponde al 3 de diciembre de 1994 y la ETM+ al 2 de noviembre del 2005. Fueron obtenidas en el sitio oficial del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), <http://landsat.usgs.gov>.

- Se utilizó ArcMap 9.3 en la elaboración de mapas con la base de datos de uso de suelo de la RTP105: Cuetzalan (cuadro 1) e información procesada de las imágenes.
- Los datos se procesaron con MINITAB 15.

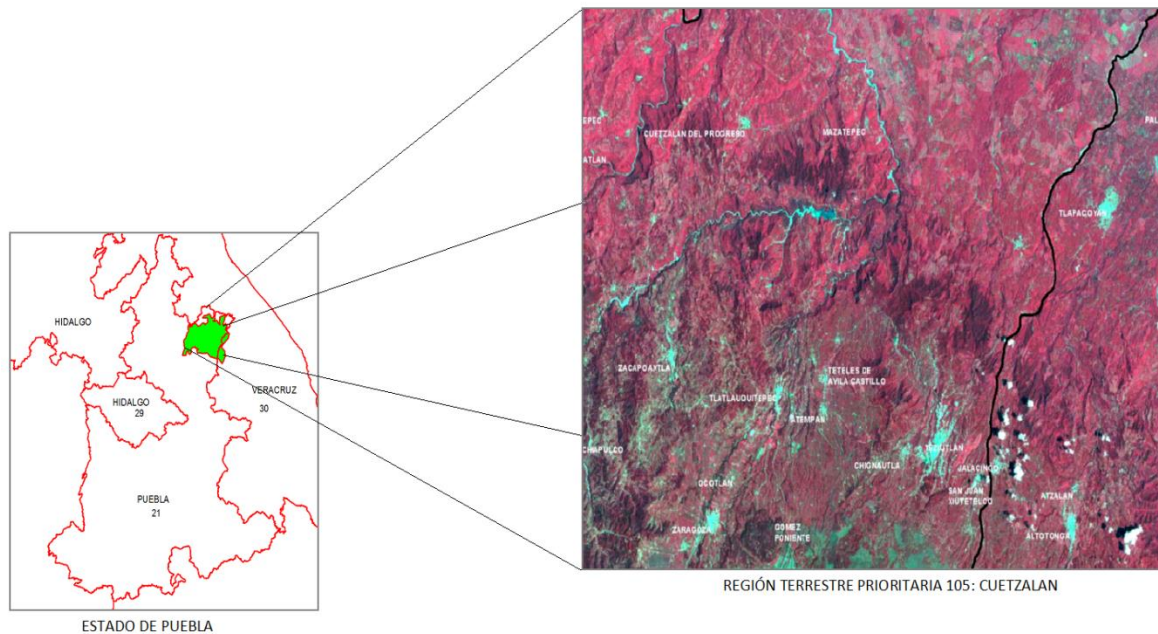


Fig. 1. Localización de la zona de la RTP 105: Cuetzalan.

V. METODOLOGÍA

La metodología se basa en el uso del Sistemas de Información Geográfica (SIG) ArcMap 9.3, para el procesamiento digital e interpretación de las imágenes que proceden del satélite Landsat-5 sensor TM, que proporcionan imágenes de 8 bits en 7 y 8 bandas espectrales, tres de las cuales son visibles y se reconocen como Banda 1, Banda 2 y Banda 3 y cuatro infrarrojo, siendo estas la: Banda 4, Banda 5, Banda 6 y Banda 7. Las bandas 3 y 4, rojo visible e infrarrojo cercano, respectivamente, son adecuadas para la estimación de índices de vegetación, y facilitan establecer relaciones entre la densidad de vegetación alta, media y baja. Los cálculos en este estudio corresponden a los Índices de Vegetación Normalizado (NDVI) e Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI). Estos índices de vegetación se clasificaron en dieciocho clases según su desviación estándar; a partir de estas determinaciones se realizó una reclasificación para obtener solo tres densidades de vegetación (alta, media y baja), y tomando en consideración la información de campo, se obtuvo una clasificación de la densidad de vegetación de la zona de la Región Terrestre Prioritaria 105: Cuetzalan. Estos índices fueron calculados a partir de la reflectividad en diferentes bandas, que indican la abundancia y estado de la vegetación y se basan en el comportamiento reflectivo peculiar de la vegetación. La signatura espectral característica de la vegetación sana muestra un fuerte contraste entre la baja reflectividad en el rojo y la alta reflectividad en el infrarrojo. Esta diferencia es tanto mayor cuanto mayor es la densidad de la vegetación y mejor su estado fitosanitario. De esta forma para el cálculo del Índice Vegetación Normalizado (NDVI) se utilizó la ecuación:

$$X = \frac{B4 - B3}{B4 + B3} \quad (1)$$

donde

B4: Banda 4 de la imagen de Landsat TM (reflectividad en el infrarrojo cercano)

B3: Banda 3 de la imagen de Landsat TM (reflectividad en el rojo)

Este índice varía entre -1 y 1, lo que facilita su interpretación. Puede señalarse como umbral crítico para cubiertas vegetales un valor de NDVI de 0.1 y para la vegetación densa de 0.5. Cualquier valor negativo implica ausencia de vegetación por lo que debieran reclasificarse a cero (Rouse *et al.*, 1974).

Utilizando las mismas bandas tres y cuatro, se determinó el Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (SAVI), representado en la ecuación

$$SAVI = (1 + L) \frac{B4 - B3}{B4 + B3} \quad (2)$$

Obsérvese que el SAVI incorpora el parámetro $L=0.5$ (Huete, 1988).

Utilizando imágenes satelitales de los años 1994 y 2005 se trata de visualizar el contraste entre las clases de densidad de vegetación (alta, media y baja) y comparar los cambios ocurridos en esos años.

Por otra parte, en cuanto al estudio de cambio de uso de suelo, después de una caracterización de la región y con la información proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se procedió a elaborar una base de datos (Tabla 1) y utilizando estos datos se desarrolló el Análisis de Componentes Principales (ACP) de la matriz de correlación de las variables agricultura, zona urbana, selva, bosque y pastizal (medidas en por ciento de superficie del área total). El ACP (Linares, 2007) es una técnica exploratoria de datos multivariados y su propósito es reducir la dimensionalidad del problema original. Usualmente para determinar la importancia de las variables originales, se procede de la siguiente forma:

- Se considera el valor absoluto del mayor elemento del vector propio dividido entre dos. Se consideran como importantes todas las variables cuyos elementos sean mayores o iguales que el valor anterior.
- Una vez conocidas las variables de mayor importancia dentro de cada componente, estas pueden usarse para caracterizarlas e incluso, en ciertos casos, hasta darle un nombre a la componente.
- Se analiza la posición de los conjuntos de individuos dispuestos en el sistema de los ejes. Los subconjuntos (individuos) cercanos al origen de coordenadas se dicen que no tienen influencia de los componentes, mientras más se aleje el subconjunto del origen de coordenadas, se dirá que está bajo una mayor influencia de las componentes y por ende las variables originales de mayor importancia
- Los ejes tienen orientación y dentro de ellos las variables tienen orientación a favor o en contra de los ejes. Según esto se podrá, unido a lo dicho anteriormente, caracterizar los conjuntos de individuos.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primero, en cuanto a los resultados obtenidos de los índices de vegetación tenemos:

A. Índice de vegetación Normalizado (NDVI).

En condiciones normales, la vegetación viva tiene reflectancia baja en el espectro visible y alta en el espectro Infrarrojo Cercano (IR). El disponer de imágenes satelitales de la región permitió estimar la densidad en la cobertura vegetal en los años 1994 y 2005 (Figura 2). En ambos años el NDVI se encontró en un rango de 0.1 a 0.7, que nos indica que existe una densidad de vegetación que va desde baja hasta alta en la Región Terrestre Prioritaria 105: Cuetzalan. Se observa que la cobertura vegetal se encuentra en estrés, y tiende a absorber menos radiación solar en el espectro visible, aumentando su reflectancia, absorbiendo más en el IR. De esta manera, la diferencia de reflectancia de los canales correspondientes: Banda (B3) – Banda (B4), tiende a decrecer cuando la cobertura vegetal está afectada por algún factor estresante. El índice permitió identificar la presencia de vegetación verde o sana, en la superficie y caracterizar su distribución espacial, así como la evolución de su estado a lo largo del tiempo. Esto está determinado fundamentalmente por las condiciones climáticas. La densidad de cobertura vegetal se estima a partir de los valores más altos presentes en la imagen ya que los valores de los píxeles van de 0.5 a 1; en las imágenes satelitales las zonas de densidad de cobertura alta corresponden a la vegetación más vigorosa en donde se muestran aquellos píxeles que fueron clasificados dentro de esta categoría, los cuales denotan parte de una zona más oscura dentro de la imagen y que están representados de color verde oscuro (Figura 2). Por su parte la densidad de cobertura vegetal media considera grandes masas de vegetación menos densa que la anterior, donde el color de los píxeles son menos oscuros y sus valores del índice de vegetación tiene valores de píxeles que van de 0.30 a 0.50 y que están representados en color verde claro (Figura 2). En cuanto a la vegetación dispersa y que no presenta alto follaje y en ocasiones es suelo desnudo, se identifica como cobertura baja, donde los píxeles son más claros y tienen valores que van de 0.1 a 0.30, de acuerdo al índice de vegetación y que están representados en la imagen de color amarillo (Figura 2).

Al analizar comparativamente el NDVI, se observó una disminución considerable de la densidad de vegetación alta en el año 2005 con respecto al año 1994, cuya diferencia es del 51%. En cuanto a la densidad de vegetación media se observa que aumenta en el año 2005 con respecto al año 1994 que indica que existe una disminución de densidad de vegetación con una diferencia del 12% y con respecto a la densidad baja se observa que aumenta en el año 2005 con respecto al año 1994 teniendo una diferencia de 39%, (Figura 3). El estadístico de la prueba Chi cuadrado con 2 grados de libertad, fue igual a 74.922 generando un valor de p de 0.00, por lo que se rechaza la hipótesis nula de independencia entre la densidad de vegetación (alta, media y baja) y los años (1994 y 2005). Estos resultados indican que se sigue deforestando año con año y de no tomar medidas de recuperación o de conservación se verá afectada toda esa zona.

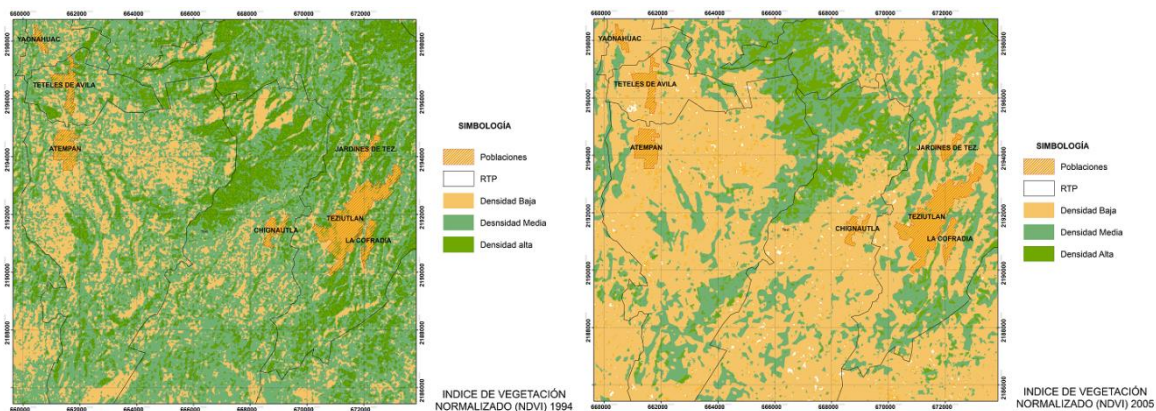


Fig. 2. Imágenes con el cálculo de NDVI de 1994 y 2005.

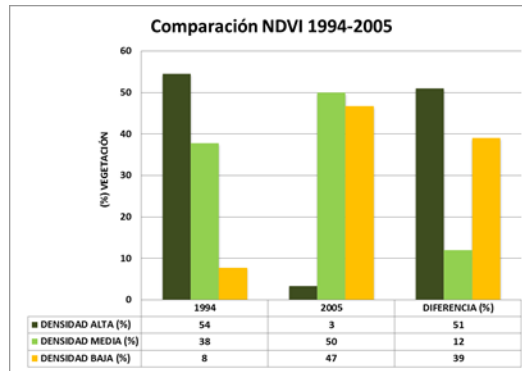


Fig. 3. Comparación de densidad de vegetación con el cálculo de NDVI de los años 1994 y 2005.

B. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI).

En este caso se utilizó el valor estándar de 0.5, considerado para densidades de vegetación intermedias (Figura 4). En el análisis comparativo (Figura 5), se observó que la densidad de vegetación alta en el año 2005 disminuyó en 39% con respecto al 1994, la densidad de vegetación media aumento 2005 en un 18% con respecto al 1994, y en el caso de la densidad de vegetación baja aumento en el año 2005 en un 21% con respecto al 1994. De acuerdo al análisis de este índice existe una diferencia que indica que el SAVI, al eliminar la humedad del suelo y de las plantas, nos da datos más concretos en cuanto a la densidad de vegetación. El estadístico de la prueba Chi cuadrado con 2 grados de libertad, es igual a 39.789 generando un valor de p de 0.00, por lo que, al igual que en el NDVI, en el SAVI se rechaza la hipótesis nula de independencia entre la densidad de vegetación (alta, media y baja) y los años (1994 y 2005). De igual manera las partes más oscuras de las dos imágenes corresponden a zonas con vegetación densa y las partes claras a vegetación baja o nula, sugiriendo que aún existen zonas con vegetación densa en la zona que requieren ser conservadas.

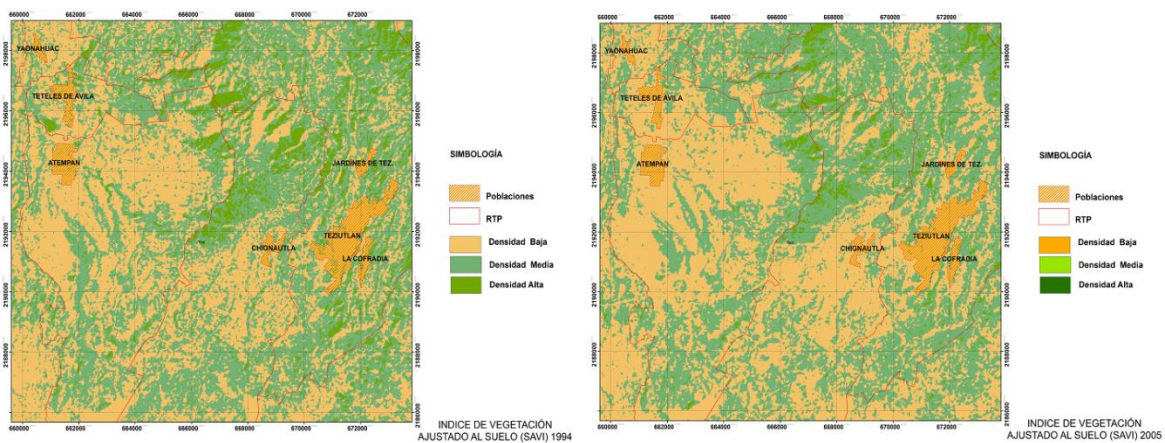


Fig. 4. Imágenes con el cálculo de SAVI de los años 1994 y 2005.

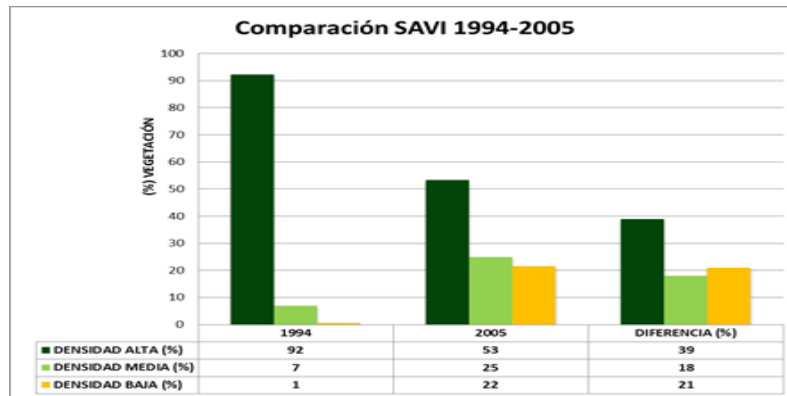


Fig. 5. Comparación de densidad de vegetación con el cálculo del SAVI de los años 1994 y 2005.

Segundo, en cuanto a los cambios en la cubierta vegetal y el uso del suelo, se evidencia que es el resultado de la compleja interacción entre los seres humanos y el medio ambiente. Estos cambios afectan a una amplia gama de escalas espaciales y temporales. Su comprensión es vital para la modelización y predicción de los cambios locales, regionales y globales.

Los datos (tabla 1) fueron procesados en sistema estadístico MINITAB 15 y se elaboro un mapa de uso de suelo y vejtación (Figura 8). En la tabla 2 se resumen los dos aspectos fundamentales del ACP: arriba, se brindan los valores propios de la matriz de correlación, la proporción que explica cada componente y la proporción acumulada y debajo, se relacionan los elementos del vector propio asociado a cada valor propio.

Obsérvese que la primera componente principal (CP 1) explica aproximadamente el 43% de la variabilidad total del fenómeno, mientras que la segunda (CP 2) explica el 26%. Ambas acumulan el 69% de la explicación total.

En la CP 1 se destacan como variables importantes el bosque en oposición a la selva y el pastizal, lo que representa el eje horizontal de la Figura 6. En la CP 2 se oponen el pastizal y la agricultura y corresponde al eje vertical de dicha Figura 6.

En la Figura 7, es posible analizar la posición de los municipios dispuestos en el sistema de los ejes coordenados determinados por las dos primeras CP.

Algunos ejemplos permiten esclarecer la clasificación obtenida de los diferentes municipios de la RPT 105.

En el primer cuadrante está situado el municipio CHIGNAUTLA que se destaca por sus altos porcentos de superficie en bosque y pastizal.

En el segundo cuadrante, los municipios AYOTOXCO DE GUERRERO y HUEYTAMALCO poseen altos porcentos de superficie de pastizal y de superficie de selva.

En el tercer cuadrante, el municipio ATLEQUIZAYAN se caracteriza por poseer alto por ciento de superficie dedicado a la agricultura y mantiene superficie de selva. Y, finalmente, en el cuarto cuadrante, los municipios TETELES DE AVILA y TEZIUTLAN representan municipios con alto porcentaje de superficie dedicado a la agricultura y que mantiene superficies de bosques.

Tabla 1. Uso de suelo y vegetación de la Región Terrestre Prioritaria 105

Tabla 1	Municipio	Agricultura	Zona Urbana	Selva	Bosque	Pastizal
No.		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	SAN JOSE ACATENO.	61	1	10	0	28
2	ALTOTONGA	36	1	5	35	23
3	ATEMPAN	46	14	0	25	15
4	ATLEQUIZAYAN	88	2	10	0	0
5	ATZALAN	41	1	8	5	45
6	AYOTOXCODEGUERRERO	35	1	5	0	59
7	CAXHUACAN	32	11	0	0	57
8	CHIGNAUTLA	12	3	0	38	47
9	CUETZALAN	64	3	3	18	13
10	HUEYAPAN	29	6	0	49	16
11	HUEYTAMALCO	42	1	11	7	39
12	HUITZILANDESERDAN	47	1	0	37	15
13	JALACINGO	54	3	0	25	18
14	JONOTLA	60	3	6	6	25
15	NAUZONTLA	62	3	0	5	30
16	TENAMPULCO	44	1	3	2	50
17	TETELADEOCAMPO	37	1	0	58	4
18	TETELESDEAVILA	56	31	0	13	0
19	TEZIUTLAN	26	27	0	30	17
20	TLAPACOYAN	74	4	0	0	22
21	TLATLAUQUITEPEC	45	7	0	42	6
22	TUZAMAPANDEGALENA	57	1	6	6	30
23	XIUTETELCO	35	3	0	13	49
24	XOCHITLAN	64	4	0	25	7
25	XOCHIAPULCO	27	2	0	71	0
26	YONOAHUAC	28	9	0	63	0
27	ZACAPOAXTLA	36	1	0	63	0
28	ZOQUIAPAN	36	2	12	17	33

Tabla 2. Componentes Principales de la matriz de correlaciones

Valor propio	2.1704	1.2868	1.0149	0.5280	0.0000
Proporción	0.434	0.257	0.203	0.106	0.0000
Proporción Acumulada	0.434	0.691	0.894	1.0000	1.0000
Variable	CP1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5
Agricultura	-0.330	-0.740	0.062	0.324	0.485
Zona Urbana	0.292	-0.234	-0.804	-0.407	0.217
Selva	-0.522	-0.021	0.256	-0.805	0.118
Bosque	0.598	0.122	0.435	-0.158	0.643
Pastizal	-0.420	0.619	-0.307	0.237	0.539

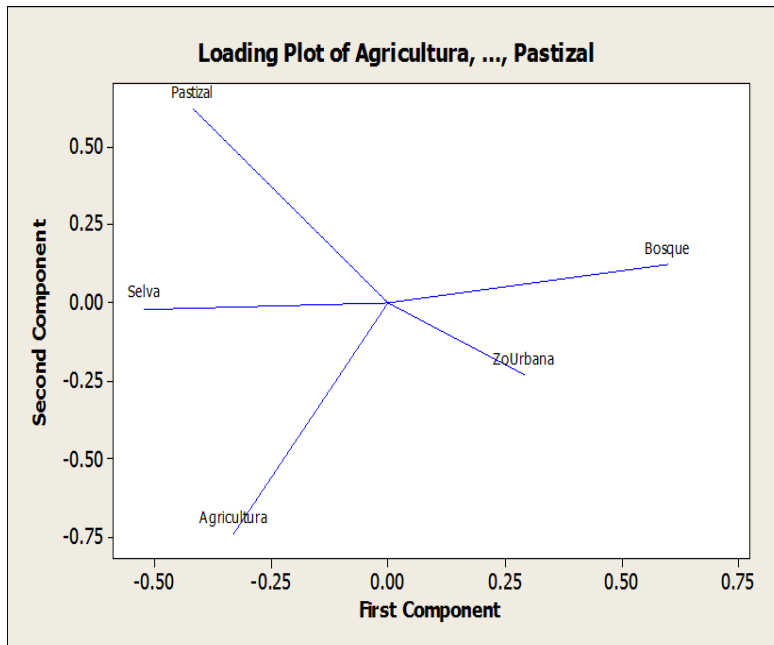


Fig. 6. Gráfico de las dos primeras componentes donde destaca la oposición de bosque - selva (CP1) y la oposición agricultura – pastizal.

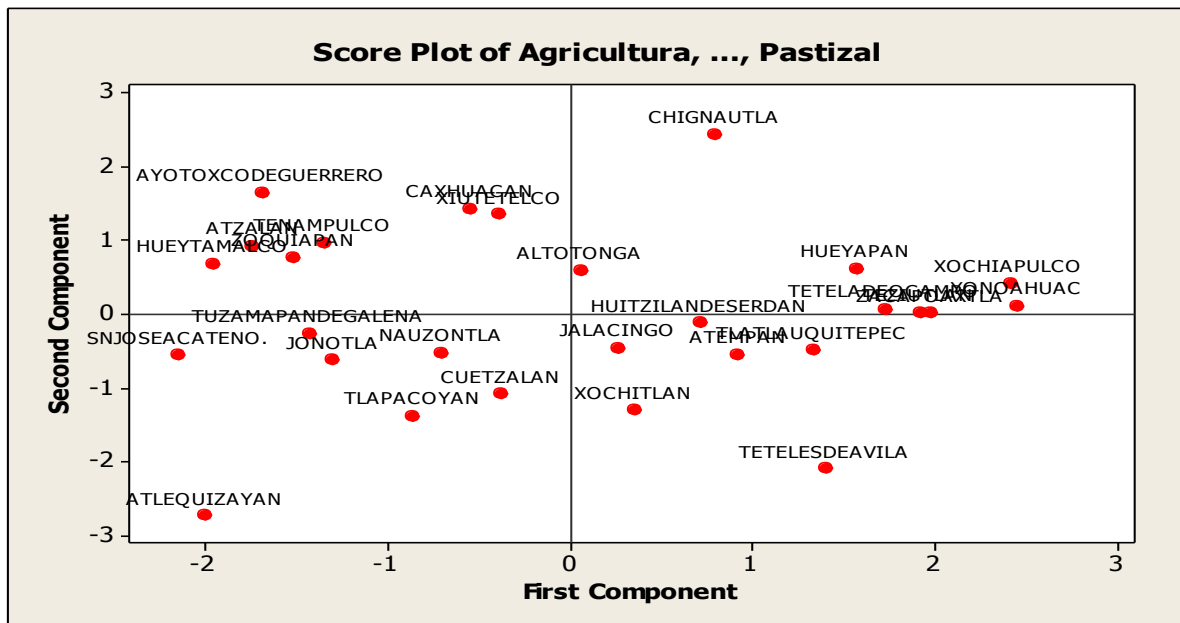


Fig. 7. Gráfico de componentes principales, donde destacan los cambios de uso de suelo de ubicación de los municipios.

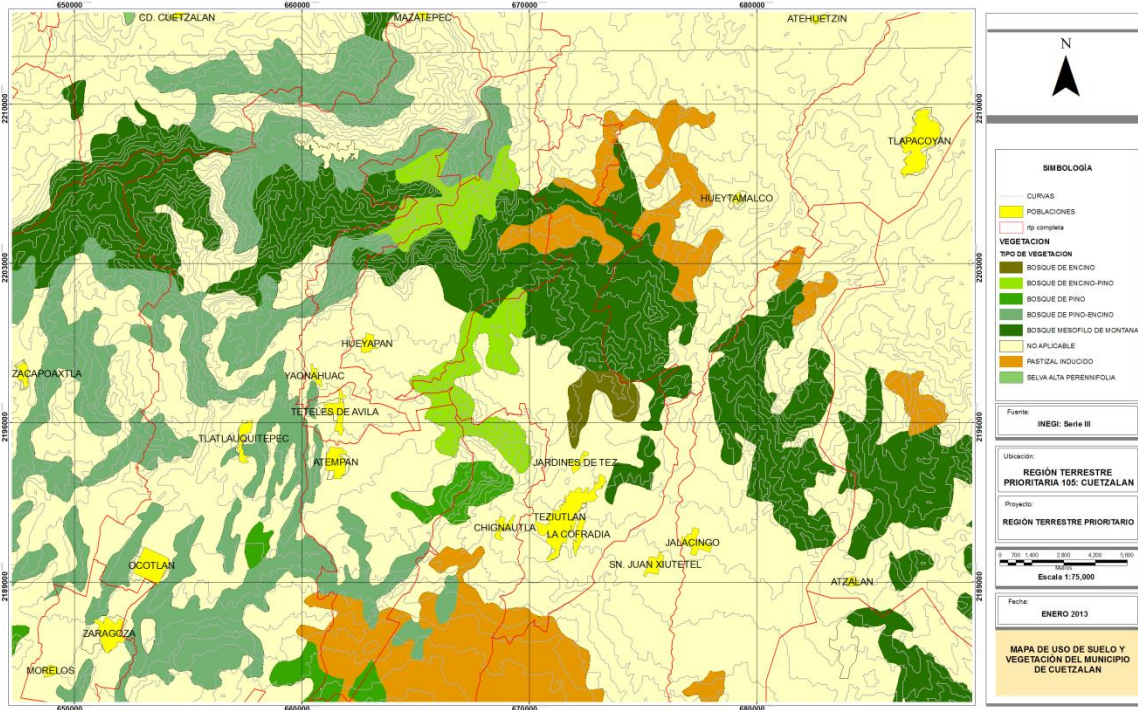


Fig. 8. Mapa de uso de suelo y vegetación de la Región Terrestre Prioritaria 105.

La agricultura es la principal actividad en la región, aunque casi toda la superficie sembrada corresponde a cultivos de subsistencia. Dada las condiciones orográficas, aún se conservan relictos de bosque en las zonas altas de los municipios. Dada la interacción entre el ecosistema y el sistema social es necesario examinar y comprender la relación existente entre estos dos elementos y su importancia en la disminución de las zonas boscosas que van desapareciendo año con año y dando como resultado el cambio de uso del suelo.

VII. CONCLUSIONES

Con respecto al estudio de los índices de vegetación en la Región Terrestre Prioritaria 105: Cuetzalan, Puebla, mediante el uso de sensores remotos, los resultados indicaron que los índices de vegetación NDVI y SAVI calculados, permitieron visualizar el contraste entre las clases de densidad de vegetación (alta, media y baja); los resultados del análisis estadístico con la prueba Chi cuadrado mostraron que existe relación entre la densidad de la vegetación y el paso del tiempo.. Se observa que la zona de estudio se encuentra en situación crítica debido al incremento en la deforestación; los gráficos describen claramente el comportamiento de los índices de vegetación en los dos periodos de análisis, resaltando la disminución de vegetación del año 1994 al año 2005. De acuerdo a lo anterior se puede observar que la actividad antrópica ha modificado casi la totalidad del paisaje natural en la Región Terrestre Prioritaria: 105, principalmente en áreas con fácil acceso y sin limitantes legales para la agricultura y la urbanización.

En cuanto a los cambios de uso de suelo se obtuvo una clasificación de los municipios de la RPT 105 en cuatro clases según los porcentos de superficie de bosques y selvas que predominan y su combinación con los porcentos de superficie de agricultura y pastizal. Se pudo apreciar que la modificación del uso de suelo y vegetación debido a las actividades humanas ha provocado una pérdida

generalizada de la biodiversidad en la RPT 105 y ha desencadenado procesos de degradación ambiental que pueden contribuir de manera importante al cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Posgrado en Ciencias Ambientales, del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Arriaga, L.; J.M. Espinoza; C. Aguilar; E. Martínez; L. Gómez y E. Loa (Eds). 2000. Regiones Terrestres Prioritarias de México. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad, México. 470 pp.
- Astier, C.M.; M. Maass-Moreno y J. Etchevers-Barra. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36:605-620.
- Baret, F., & Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment* 35: 161-173.
- Bocco, G., Mendoza M. y O. Masera, (2001). “La dinámica del cambio de uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación” en *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 44, Instituto de Geografía, México. UNAM, pp. 18-38.
- Birth, G.S. and Mcvey, M.D., 1968. Measuring the colour of growing turf with a reflectance spectroradiometer. *Agronomy Journal*, 60, pp. 640–643.
- Challenger, A. 1998. Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México. Pasado, Presente y Futuro. CONABIO, Instituto de Biología, UNAM y Agrupación Sierra Madre, S. C. México. 230 pp.
- Choudhury, B. J. 1987. Relationships between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment*, 22: 209-233.
- Chuvieco, E. (2007): *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel, Madrid, 592 pp.
- Fensholt, R., Sandholt, I., & Rasmussen, M. S. 2004. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment* 91: 490-507.
- Friedman D.; M. Hubbs; A. Tugel; C. Seybold y M. Sucik. 2001. Guidelines for soil quality assessment in conservation planning. B. Joubert. *NRCS SQI (Eds.) Washintong D. C.* 48 pp.
- Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, pp. 53–70.
- INEGI, (2006). *Carta Uso de Suelo (Raster), E14-3 Veracruz, escala 1: 250,000. Serie III 3ª Edición*, México.
- INEGI, (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. (Acceso en mapserver.inegi.com.mx).
- Linares F., G., (2007). *Análisis de Datos Multivariados*. México, Puebla. Editorial Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. pp.277.
- MINITAB Release 15, (2005). *Statistical Software*. Minitab. Inc. (Acceso a www.minitab.com).
- Muckel, G.B. & Mausbach, M.J. 1996. Soil quality information sheets. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison, Soil Science Society of America., p.393-400 (SSSA Special Publication, 49).
- Ridao, E., Conde, J., & Minués, I. 1998. Estimating fAPAR from nine vegetation indices for irrigated and nonirrigated faba vean and semileafless pea canopies. *Remote Sensing of Environment* 66: 87-100.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. and Harlan, J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, USA, 371 pp.
- Shmidt, H. y Karnieli, A. (2001): Sensitivity of vegetation indices to substrate brightness in hyper-arid environment: the Makhtesh Ramon Crater (Israel) case study. *International Journal of Remote Sensing*, 22 (17): 3503-3520.

- Soil Survey Staff. 2010. Soil Survey Geographic (SSURGO) database. Available at soils.usda.gov/survey/geography/ssurgo/ (verified 20 July 2010). NRCS, Washington, DC. ATGRAPHICS Centurón XVI. Versión 6.1.02.
- Tucker, C. J. 1977. Resolution of grass canopy biomass classes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 43:1059-1067.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8:127-150.
- Tucker, C.J., Townshend, J.R., Goff, T.E. 1985. African land-cover classification using satellite data. *Science* 227:369-375.
- Wardlow, B.D. and S.L. Egbert. 2010. A comparison of MODIS 250-m EVI and NDVI data for crop mapping in the U.S. Central Great Plains. *International Journal of Remote Sensing* 31(3):805-830.