

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157
<http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>

VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE LA COBERTURA TERRESTRE EN LA CUENCA DEL RÍO TECOLUTLA, MÉXICO

FELIPE OMAR TAPIA SILVA¹, EDGAR LÓPEZ FLORES¹

¹Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa

San Rafael Atlixco No. 186, Col. Vicentina, Iztapalapa, 09340, Ciudad de México.

otapia@xanum.uam.mx, edgarus.uam@outlook.com

RESUMEN

En este estudio se caracteriza el cambio de coberturas de suelo de una cuenca en México desde la Geomática. Se parte de aplicar un modelado conceptual que permitió efectuar una abstracción espacial útil para identificar los elementos fundamentales del sistema territorial analizado y sus interrelaciones. Se analizaron imágenes satelitales Landsat (5, 7, 8), correspondientes a los años 1985-1986, 1994, 2002-2003 y 2013, cubriendo un periodo de 28 años. Se aplicaron correcciones radiométricas, y se obtuvieron clasificaciones supervisadas. Como resultado se alcanzaron índices Kappa de 0.74-0.85, indicando buena exactitud. Los principales resultados en la cuenca en los 28 años analizados son: la cobertura agrícola pasó de 24 % a 42 % y su tasa de cambio anual (TCA) fue de 1.86 %. Poblado fue la clase más dinámica (TCA 8.8 %). Forestal pasó a agrícola en 54 %, matorral a pastizal en 46 % y a agrícola en 41 %.

Palabras clave: Geomática, Modelo Conceptual Geoespacial, imágenes Landsat, cuenca, cambio de cobertura terrestre.

SPACE-TEMPORAL VARIABILITY OF TERRESTRIAL COVERAGE IN THE RIVER BASIN TECOLUTLA, MEXICO

ABSTRACT

Land cover change in a Mexican river basin was characterized by Geomatics, applying a conceptual modeling method that allowed a spatial abstraction useful to identify the fundamental elements of the analyzed territorial system and their interrelationships. Landsat satellite images (5, 7 and 8) of 1985-1986, 1994, 2002-2003 and 2013, were used, covering a period of 28 years. Radiometric corrections were applied and supervised classifications were obtained. As result Kappa indices of 0.74-0.85 were reached, indicating good accuracy. The main results in the 28-year analyzed are: agricultural coverage increased from 24 % to 42 % and its annual change rate (TCA) was 1.86 %. Urban was the most dynamic class (TCA 8.8 %). Forest cover changes to agriculture in 54 %, scrub to pasture in 46 % and to agriculture in 41 %.

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157
<http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>

Keywords: Remote Sensing, Geomatics, Geospatial Conceptual Model, Landsat images, basin, land cover change.

1. Introducción

Este artículo desarrolla la aplicación, desde la Geomática, de un método simple para generar modelos conceptuales de sistemas territoriales complejos, como paso previo para el desarrollo de un proyecto en un entorno SIG (Tapia-Silva 2016). Con base en éste, y desde la aplicación de técnicas de Teledetección, este trabajo analiza los cambios de coberturas terrestres en la cuenca del río Tecolutla (México)

Una cuenca de escurrimiento superficial es: "un espacio geográfico definido que permite delimitar territorio y una superficie de drenaje común, donde interactúan aspectos físicos, biológicos y sociales" (Villanueva-Manzo, 2002). La cuenca se conceptualiza como una integración y resultado de procesos interrelacionados. Por ello, para su estudio, se deben aplicar métodos de diagnóstico y análisis que integren los factores de los problemas ambientales en un entorno sistémico (Villanueva-Manzo, 2002). Según Murray *et al.* (2005) cobertura terrestre es: "una categorización física, química, ecológica o biológica de la superficie terrestre que da lugar a unidades superficiales específicas: forestal, pasto, cemento, asfalto, etc.". Su transformación resulta de la expansión de las actividades humanas y sólo puede estudiarse a partir de datos de calidad y fiables. Por su parte, cambio de cobertura terrestre hace referencia a la sustitución completa de un tipo en particular por otro, que en la mayoría de los casos tiene implicaciones ecológicas-económicas importantes. Al respecto, Vitousek *et al.* (1997) establecen que el uso de la tierra para obtener bienes y servicios representa la mayor alteración del sistema terrestre y que se ha alterado entre un tercio y un medio de la superficie terrestre por este motivo. Ejemplo de lo anterior es la reducción de la producción primaria neta de los ecosistemas que impacta en un aumento de los requerimientos de materiales y energéticos para asegurar el funcionamiento del sistema económico asociado (Murray *et al.* 2005). FAO reporta que 5 % de la superficie del globo se encuentra transformada por el hombre (Murray *et al.* 2005). En México los procesos de cambio del uso de suelo y vegetación se incrementaron en velocidad y extensión desde la segunda mitad del siglo XX. Challenger y Dirzo (2009) refieren que en 1976 la cobertura vegetal original del país se había reducido 38 %, en 1993 sólo cubría 54 % y para el 2002 ocupaba únicamente 50 % de la superficie total del país. Cuevas *et al.* (2010a) indican que las actividades que producen esta transformación son principalmente la ganadería, la agricultura, los asentamientos humanos y las zonas urbanas, las mismas que se extendieron considerablemente antes de los 70s. Este panorama negativo también puede expresarse como una degradación significativa de las cuencas. Cuevas *et al.* (2010b) establecieron que entre 1976 y 2009 el 80 % de las cuencas perdieron entre el 1 % y el 20 % de su vegetación natural, mientras que 12 cuencas situadas principalmente en el Golfo de México perdieron el 80 %. La pérdida masiva de cobertura vegetal en casi todos los ecosistemas forestales es provocada principalmente por la deforestación (Villanueva-Manzo, 2002). Los cambios están asociados a pérdida del suelo, mal uso del agua y contaminación por desechos industriales, domésticos y agrícolas. En las partes bajas frecuentemente se localiza una desembocadura hacia el océano, generando impactos en otros ecosistemas.

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): “Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México”, *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>

1.2 Geomática y cambio de cobertura en cuencas

Una forma de generar indicadores de la degradación de cuencas consiste en la definición de la variabilidad espacio-temporal de cambios de cobertura terrestre. La Geomática permite la integración espacio-temporal de los factores que intervienen en un problema geográfico. Gomarazca (2010) la define como “...un enfoque integrado, multidisciplinario y sistémico para seleccionar los instrumentos y las técnicas apropiadas para coleccionar, almacenar, integrar, modelar, analizar, recuperar, transformar, desplegar y distribuir datos espacialmente georreferenciados provenientes de diferentes fuentes con características bien definidas de precisión y continuidad en una forma digital”. Además, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituyen un importante eje que integra las disciplinas de la Geomática (véase figura 1) (Tapia-Silva, 2014). La Geomática, permite estudiar los cambios de cobertura terrestre en cuencas hidrológicas (Beuchle *et al.* 2015, Wasige *et al.* 2013, Haque & Basak 2016, Sanhouse-García, 2016, Estrada *et al.* 2013, Osuna-Osuna *et al.* 2015). Los SIG funcionan como medio de almacenamiento, procesamiento, representación y análisis espacial. Como se observa en la figura, la Teledetección es otra disciplina integrada a la Geomática.

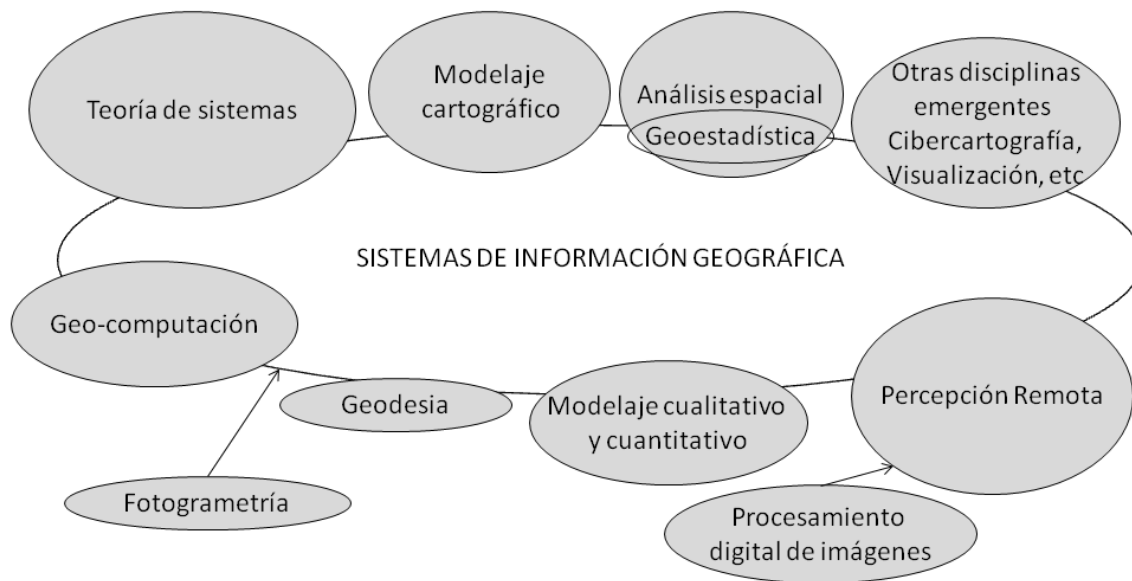


Figura 1. Integración de las disciplinas de la Geomática con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Tapia-Silva, 2014).

Para el desarrollo de esta investigación, la problemática se abordó conceptualmente desde una metodología surgida de la Geomática que permite generar modelos conceptuales o de conocimiento. Esta se denomina Modelado Geoespacial Conceptual (MGC, Tapia-Silva, 2016) y permite abordar el problema desde el mundo conceptual para transformarlo a un modelo manejable en el mundo geográfico. El proceso de modelación permite: delimitación geográfica y temporal del problema, identificación de elementos e interrelaciones y selección del subsistema a implementar mediante modelos específicos del mundo geográfico (Tapia-Silva, 2016). A partir del modelo, pudo atenderse la necesidad de conocer el estado actual y los cambios sufridos en los últimos 28 años de los tipos de cobertura que componen la cuenca del río Tecolutla. Se buscó generar información que sirviera de base para diversos estudios referentes al presente caso (ej. estudios de pérdida y contaminación del suelo, transporte de

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>

sedimentos, asolvamiento y contaminación de cuerpos acuíferos, deforestación, balance hídrico, etc.).

Como único antecedente directo de un estudio de cambios en la cobertura terrestre desde la Geomática para la cuenca del río Tecolutla, Veracruz (en este caso utilizando Teledetección) se encuentra el trabajo de Osuna-Osuna *et al.* (2015), que reporta un aumento del 75 % del uso de suelo agrícola y una tendencia de continuo aumento, principalmente en el Estado de Veracruz (1994-2010).

2. Área de Estudio

La cuenca del río Tecolutla está dentro de la Región Hidrológico-Administrativa X Golfo Centro y la Región Hidrológica 27 Norte de Veracruz Tuxpan-Nautla (CONAGUA, 2015). Está delimitada por las coordenadas N 2277909 S 2141729 y E 720029 O 569754 de la proyección UTM Zona 14 N (figura 2). La cuenca hidrográfica comprende 7800 km², de los cuales Veracruz abarca 1710 km² o 2 % de su Extensión Total (ET), Puebla registra 5873 km² (17 % ET), Tlaxcala posee 223 km² (5 % ET) e Hidalgo abarca 83 km² (0.39 % ET), (CONABIO, 2012).

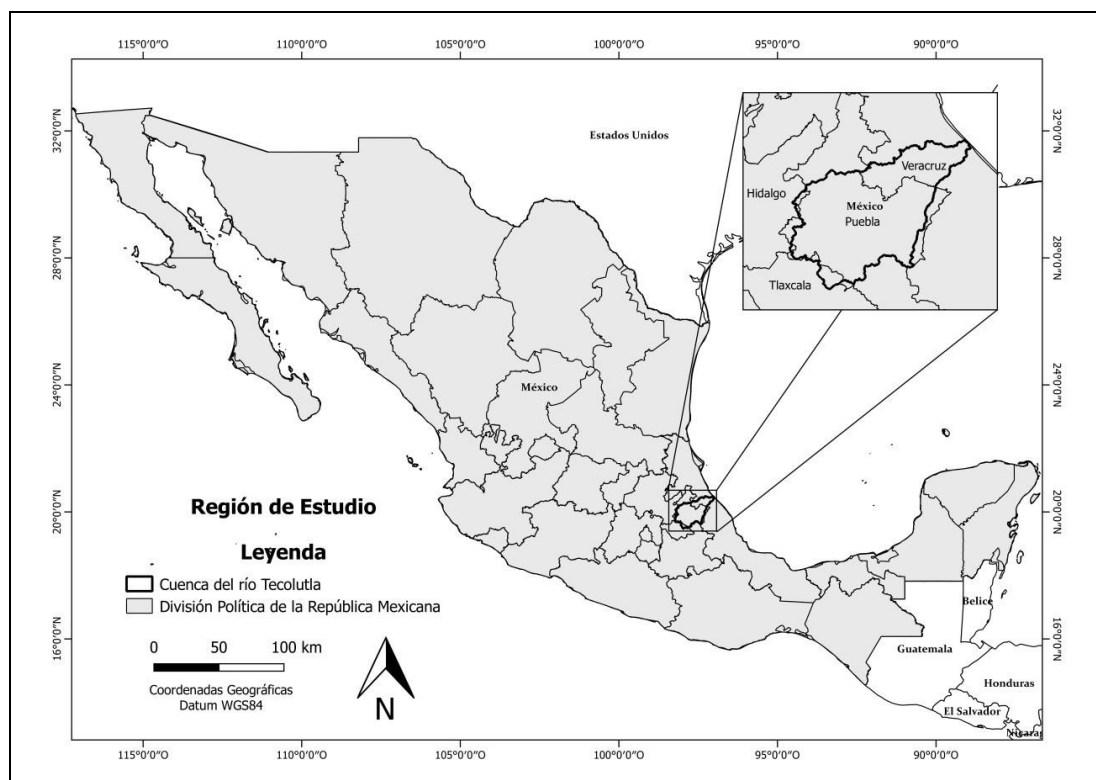


Figura 2. Localización de la cuenca del río Tecolutla.

En la parte alta de la cuenca (Sierra Madre Oriental) los cauces se encuentran alojados en cañones angostos y profundos con fuertes pendientes. En la intermedia disminuye la pendiente de los cauces. La parte baja atraviesa la planicie costera de Veracruz y desemboca en el Golfo de México (Pereyra-Díaz *et al.* 2010). Los arroyos que originan el río Tecolutla nacen en la Sierra de Puebla (Pereyra-Díaz *et al.* 2010). La corriente principal recibe los nombres de arroyo Zapata, río Coyuca, río Apulco y río Tecolutla (Pereyra *et al.* 2010). El Clima en la parte alta es

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>

templado-húmedo con abundantes lluvias en verano y todo el año. En la parte baja es cálido-húmedo y subhúmedo con abundantes lluvias en verano y todo el año (CONABIO, 2016). La temperatura media fluctúa entre 14°C y 26°C; la precipitación entre 1200 mm y 4000 mm y la Evaporación entre 1064 mm y 1420 mm (CONABIO, 2016). Los suelos son pobres, poco profundos, con pendientes pronunciadas (tipos Regosol, Luvisol, Feozem, Vertisol, Cambisol) (CONABIO, 2016).

Las principales actividades económicas son agricultura, ganadería, pesca y turismo. Las principales problemáticas identificadas, según CONABIO (2016), son modificación del entorno (deforestación), cambio de la cobertura vegetal, excepto en cañadas, ganadería extensiva, pérdida de suelos por deslave, desecación de ríos y mantos freáticos, monocultivo de maíz y manejo inadecuado del suelo, contaminación por agroquímicos (que afectan el cultivo de vainilla y generan presencia de coliformes en la cuenca baja y media) y dificultades en el abasto de recursos energéticos (gas, agua, agua de riego).

3. Materiales y Métodos

Para la obtención del modelo mediante MGC (Tapia-Silva, 2016) se efectuó una identificación holista de los componentes del sistema territorial, que fueron simplificados y conectados para representar las interacciones observadas. Luego se seleccionaron las capas para implementarse en el ámbito de SIG y se establecieron los límites temporales (1985-2013) y espaciales (cuenca) para el estudio.

Para delimitar la cuenca de captación y procesar las imágenes satelitales se utilizaron métodos de Teledetección y Análisis Espacial integrados en programas *opensource*: *Grass* 7.0.4 y *QGIS* 2.14.3. Los cambios en la cobertura fueron obtenidos del procesamiento de imágenes Landsat: 5 (*Thematic Mapper-TM*), 7 (*Enhanced Thematic Mapper Plus-ETM+*) y 8 (*Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor-OLI/TIRS*) de los años 1985-1986 (enero, marzo, octubre), 1994 (noviembre, diciembre), 2002-2003 (febrero, noviembre) y 2013 (junio). De esta forma fue posible estudiar imágenes representativas de cuatro décadas diferentes. Las imágenes (Path/Row: 25/46; 25/47; 26/46) se seleccionaron de *USGS/Glovis* con nubosidad máxima de 0 %-10 %.

3.1. Delimitación de la cuenca de captación del río Tecolutla

Se procesó un Modelo Digital de Elevaciones de SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) con resolución de 30 m. Aplicando el comando de *Grass* *i.watershed*, se seleccionaron un valor umbral de acumulación de 10000 celdas y direcciones infinitas de flujo. Posteriormente, se seleccionaron cuencas que coinciden con la red de drenaje cuyo punto de salida común es el río Tecolutla y tributarios. Estas cuencas fueron disueltas para obtener el polígono del parteaguas de la cuenca de estudio. Los polígonos de los estados que conforman la cuenca fueron obtenidos de la base de datos de CONABIO (2012).

3.2. Pre-procesamiento de imágenes

El método de corrección atmosférica utilizado fue el 6S (Vermote *et al.*, 1997), modelo físico de transferencia radiactiva basado en atmósferas estándar, tomando en cuenta parámetros como: simulación de observaciones planas, elevación del terreno y cálculo de transmisión de gases atmosféricos (Chuvieco, 2002). Se realizó la conversión de niveles digitales (DN) a valores de radiancia de la atmósfera superior (*top-of-atmosphere radiance*) para las imágenes

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>

Landsat 5 y 7, aplicando el comando `i.landsat.toar` del SIG *Grass* 7.0.4. En el caso de Landsat 8 se empleó la siguiente fórmula:

$$L\lambda = MLQ_{cal} + AL$$

Siendo: $L\lambda$ = TOA radiancia espectral (Watts/($m^2 * srad * \mu m$)), ML= Factor de reescalamiento multiplicativo específico por banda obtenido del metadato de la imagen (*RADIANCE_MULT_BAND_x*, donde x es el número de banda), A= Factor de reescalamiento multiplicativo específico por banda obtenido del metadato (*RADIANCE_ADD_BAND_x*, donde x es el número de banda), Qcal= valores cuantizados y calibrados por pixel/números digitales (DN). Posteriormente, se realizó la corrección atmosférica extrayendo valores de reflectancia superficial con un reescalado de 0-1 en cada imagen satelital. Después, se realizaron los mosaicos referentes a los años de análisis (1985-1986, 1994, 2002-2003 y 2013) y se acotaron al área de estudio mediante un corte exacto a lo correspondiente a un buffer de 10 km de distancia del perímetro de la cuenca de captación hacia el exterior.

3.3. Clasificación de las imágenes y validación

Las clases a obtener fueron cuerpo de agua, poblado, pastizal, agrícola, forestal, matorral y suelo desnudo. El método utilizado fue el de Máxima Verosimilitud, que es de tipo supervisado y parte del supuesto de que los valores de reflectancia superficial de las clases asignadas siguen una distribución normal. Mediante el vector de medias y la matriz de varianza-covarianza estima la probabilidad de que un pixel pertenezca a cada una de las clases establecidas y le asigna la de mayor probabilidad (Chuvieco, 2002, Del Toro Espín *et al.* 2015). Este clasificador es considerado estándar y su complejidad demanda un considerable volumen de cálculos, lo cual le confiere una robustez importante, además de ajustarse a la disposición original de los datos (Chuvieco, 2002). Para el registro de reflectancia superficial específica por clase, se realizaron polígonos de entrenamiento, tratando de abarcar todas las combinaciones posibles de pixeles. Después se crearon firmas espectrales de cada polígono con su determinada clase y fueron empleadas por el clasificador de Máxima Verosimilitud, implementado en el SIG *Grass* 7.0.4. Las clases obtenidas fueron: agrícola, pastizal, poblado, forestal, cuerpo de agua y matorral.

La validación de resultados fue efectuada mediante coeficientes Kappa y matrices de confusión. Se obtuvieron puntos de validación (alrededor de 1000 puntos por imagen) que representaron las clases consideradas verdaderas. La fuente de los puntos de validación fueron las Series I-V de vegetación y uso de suelo de INEGI. Su presencia fue corroborada mediante compuestos de color natural de las imágenes satelitales correspondientes. Se efectuaron reclasificaciones puntuales en las zonas donde se identificaron errores, como un procesamiento pos-clasificador para la obtención de imágenes con un valor de Kappa mayor a 0.7. Se procedió definiendo una mayor cantidad de polígonos que incluyeran la mayor diversidad de pixeles posible.

3.4. Análisis de Cambios

El cambio entre categorías se determinó, década a década, usando los resultados de las imágenes clasificadas. Entre 1985 y 2013 se calcularon tasas anuales de cambio (r), mediante la ecuación propuesta por Puyravaud (2003):

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>

$$r = \left(\frac{1}{(t_2 - t_1)} \right) \ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right)$$

Siendo, t_2 = tiempo final del periodo analizado, t_1 = tiempo inicial del mismo periodo, A_2 = área final de la cobertura terrestre (tiempo final) y A_1 =área de la cobertura (tiempo inicial).

Para fines de comparación, se calcularon para los mismos años las tasas anuales de cambio (q) y el cambio anual (R) mediante las siguientes fórmulas (FAO 2015):

$$q = \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{1/(t_2 - t_1)} - 1$$

$$R = \frac{A_1 - A_2}{t_2 - t_1}$$

Siendo, t_2 = tiempo final del periodo analizado, t_1 = tiempo inicial del mismo periodo, A_2 = área final de la cobertura (tiempo final) y A_1 = área cobertura (tiempo inicial).

4. Resultados y Discusión

4.1 Resultados del Modelado Conceptual

En la figura 3 se presenta el MGC obtenido, que incluye cuatro subsistemas: Medio ambiente, Sociedad, la relación entre ambos y la Geomática como medio de estudio. En el primero aparece la cobertura terrestre como parte de los recursos naturales, categoría en la que también se incluyen los forestales, acuáticos, florísticos y suelos. En el mismo subsistema se integran factores como topografía, clima y geología. La variabilidad espacio-temporal de estos factores determina la configuración de la cobertura terrestre sin intervención antropogénica. El subsistema Sociedad muestra medios que determinan los usos de suelo y alteran la cobertura terrestre. En este contexto, la sociedad actúa como agente perturbador del ambiente a través de las instituciones de gobierno que determinan Políticas relacionadas con el uso y ordenamiento del Territorio. Mediante diversos instrumentos se determinan aspectos, como regiones aptas para ciertas actividades económicas, para asentamientos humanos o áreas de protección al ambiente. Adicionalmente, se presentan prácticas ilegales, como son tala ilegal o asentamientos humanos en áreas naturales protegidas. El subsistema Sociedad-Medio ambiente considera que el cambio de cobertura terrestre es resultado de la dinámica ecológica y socioeconómica de la región. La importancia del último Subsistema radica en que la Geomática permite el estudio de los cambios de cobertura terrestre relacionados o no con la acción antropogénica.

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>

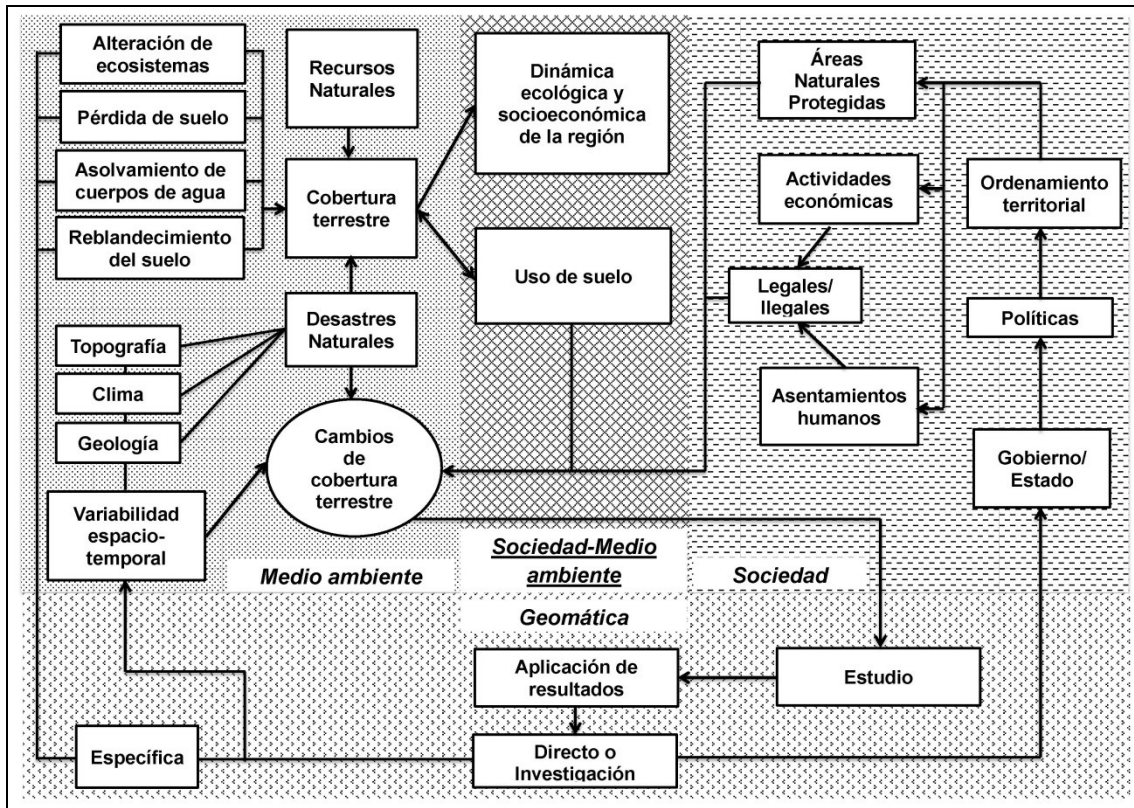


Fig. 3 Modelo conceptual del funcionamiento territorial relacionado con el cambio de cobertura terrestre, su estudio y la aplicación de resultados para apoyar el proceso de toma de decisiones

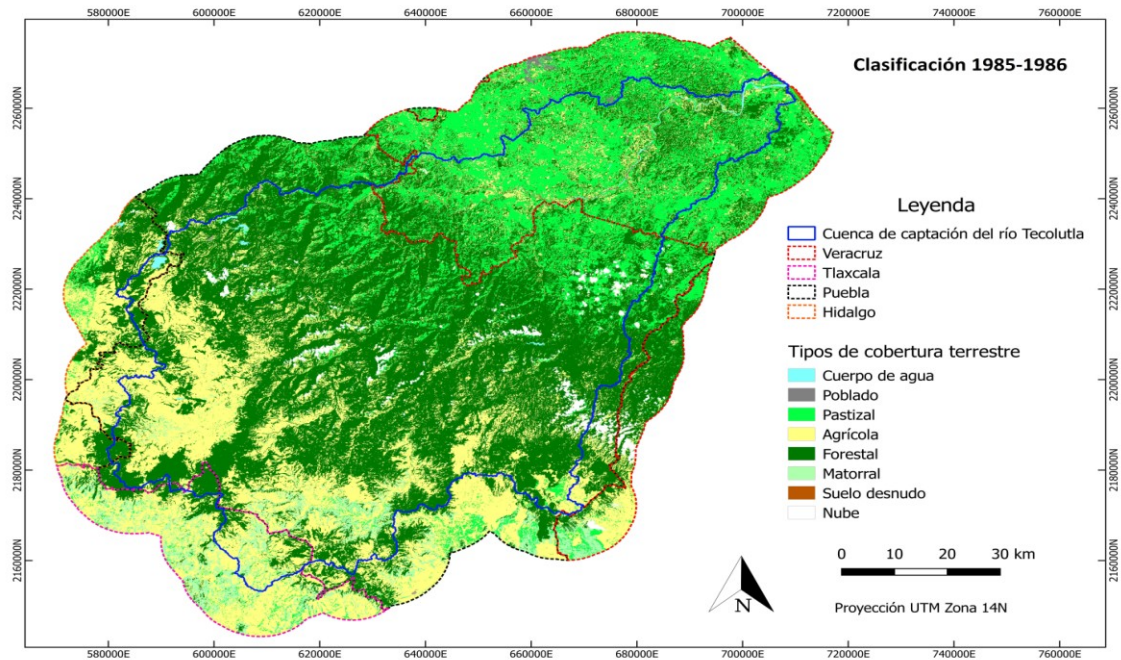
El MGC obtenido es una posibilidad para analizar el sistema territorial relacionado con el cambio de cobertura terrestre en la región de interés. Los resultados de este estudio, con visión sistémica y de análisis de la variación espacio temporal, tendrán una aplicación directa en la formulación de nuevas políticas de ordenación del territorio. También podrán ser base para la explicación de fenómenos más específicos en investigaciones tanto ambientales como sociales (económicas, políticas, geográficas, entre otras), permitiendo cerrar positivamente un ciclo constituido por los subsistemas descritos a lo largo del tiempo. Ello permite advertir la importancia del monitoreo de este proceso de cambio continuo de la cobertura terrestre de la cuenca a través de la Geomática.

4.2. Resultados de la clasificación de tipos de cobertura por década y análisis de precisión

Los resultados para los años representativos de las 4 décadas se muestran en las figuras 4-7. Para 1985-86 y 1994 se encontraron 8 clases, para 2002-03, 7 clases y para 2013 se obtuvieron 9 clases. Esto indica una mayor capacidad de diferenciación de tipos de cobertura con imágenes Landsat 8 respecto a sus predecesoras. En 1985-86 (fig. 4) la parte alta de la cuenca estuvo dominada por agricultura, la media y las zonas montañosas por forestal, y la baja por pastizal. En 1994 (fig. 5) se mantiene este patrón, aunque es posible observar el crecimiento de la agricultura en las partes media y baja. Para 2002-03 (fig. 6) se observa la expansión de esta cobertura en la parte baja, conformando, junto con pastizal, las dos coberturas dominantes. En 2013 (fig. 7) se observa la expansión de agricultura en la parte media, incluso en las zonas montañosas, caracterizándola como la cobertura dominante. El número de clases obtenidas varió

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>

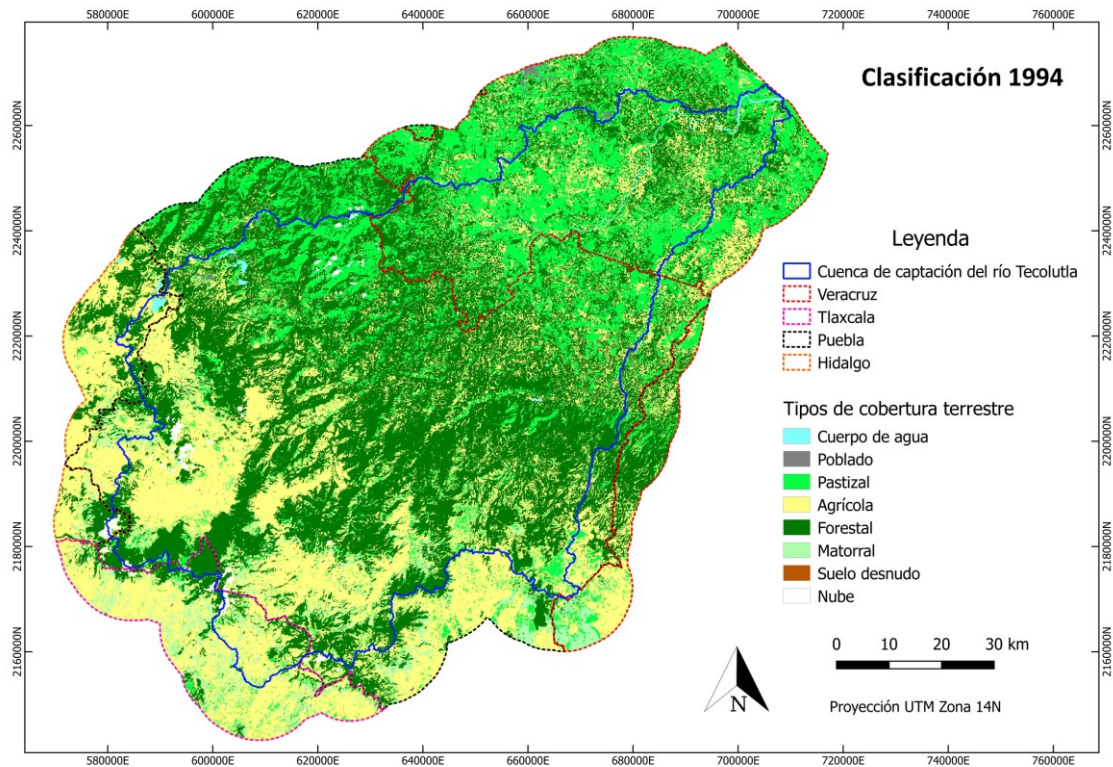
en función de la presencia de sombra y/o nubes y de la capacidad de diferenciación de cada sensor.



| 1985-1986 | | Referencia | | | | | | | Exactitud Usuario (%) | Error Comisión (%) |
|---------------|-----------------------------------|----------------|---------|----------|----------|----------|----------|-------|-----------------------|--------------------|
| | | Cuerpo de agua | Poblado | Pastizal | Agrícola | Forestal | Matorral | Total | | |
| Clasificación | Cuerpo de agua | 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48 | 100 | 0 |
| | Poblado | 1 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34 | 97.05 | 2.94 |
| | Pastizal | 0 | 2 | 303 | 14 | 0 | 4 | 323 | 93.51 | 6.48 |
| | Agrícola | 3 | 8 | 13 | 233 | 2 | 1 | 260 | 89.61 | 10.38 |
| | Forestal | 0 | 4 | 6 | 30 | 171 | 2 | 213 | 79.90 | 20.09 |
| | Matorral | 0 | 1 | 0 | 5 | 0 | 70 | 76 | 92.10 | 7.89 |
| | Suelo desnudo | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 | NA | NA |
| | Nube | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | NA | NA |
| | Total | 52 | 51 | 322 | 283 | 173 | 77 | | | |
| | Exactitud Clasificador (%) | 92.30 | 64.70 | 93.80 | 82.33 | 98.84 | 90.90 | | | |
| | Error Omisión (%) | 7.69 | 35.29 | 6.19 | 17.66 | 1.15 | 9.09 | | | |

Figura 4. Resultados de la clasificación de tipos de cobertura terrestre para 1985-86.

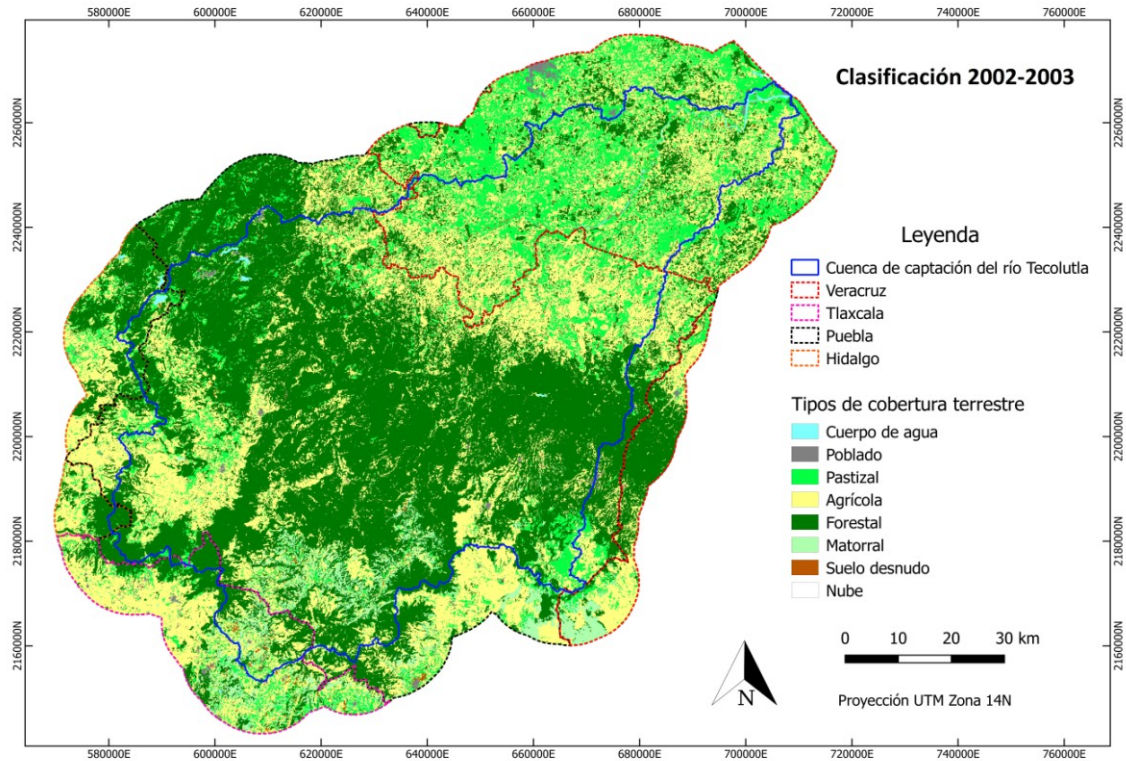
Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>



| 1994 | | Referencia | | | | | | | Exactitud Usuario (%) | Error Comisión (%) |
|-----------------------------------|----------------|----------------|---------|----------|----------|----------|----------|-------|-----------------------|--------------------|
| | | Cuerpo de agua | Poblado | Pastizal | Agrícola | Forestal | Matorral | Total | | |
| Clasificación | Cuerpo de agua | 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48 | 100 | 0 |
| | Poblado | 0 | 32 | 0 | 1 | 0 | 0 | 33 | 100 | 0 |
| | Pastizal | 0 | 1 | 114 | 59 | 0 | 2 | 176 | 64.77 | 35.22 |
| | Agrícola | 3 | 7 | 2 | 236 | 31 | 8 | 287 | 82.22 | 17.77 |
| | Forestal | 1 | 0 | 2 | 32 | 190 | 0 | 225 | 84.44 | 15.55 |
| | Matorral | 0 | 0 | 1 | 4 | 0 | 40 | 45 | 88.88 | 11.11 |
| | Suelo desnudo | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | NA | NA |
| Total | | 52 | 40 | 119 | 333 | 221 | 50 | | | |
| Exactitud Clasificador (%) | | 92.30 | 80 | 95.79 | 71.08 | 85.97 | 80 | | | |
| Error Omisión (%) | | 7.69 | 20 | 4.20 | 28.91 | 14.02 | 20 | | | |

Figura 5. Resultados de la clasificación de tipos de cobertura terrestre para 1994.

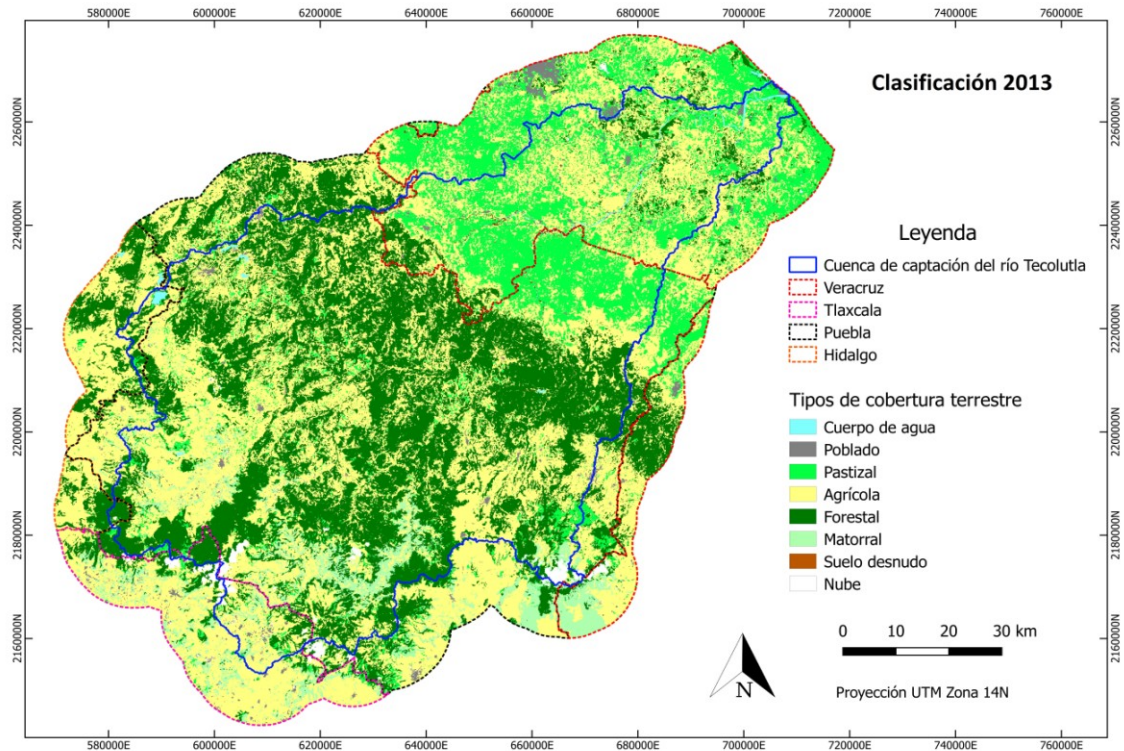
Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>



| 2002-2003 | | Referencia | | | | | | Total | Exactitud Usuario (%) | Error Comisión (%) |
|---------------|-----------------------------------|----------------|---------|----------|----------|----------|----------|-------|-----------------------|--------------------|
| | | Cuerpo de agua | Poblado | Pastizal | Agrícola | Forestal | Matorral | | | |
| Clasificación | Cuerpo de agua | 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48 | 100 | 0 |
| | Poblado | 0 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 100 | 0 |
| | Pastizal | 0 | 0 | 170 | 76 | 2 | 2 | 250 | 68 | 32 |
| | Agrícola | 5 | 3 | 26 | 175 | 4 | 2 | 215 | 81.39 | 18.60 |
| | Forestal | 0 | 0 | 1 | 11 | 198 | 6 | 216 | 91.66 | 8.33 |
| | Matorral | 0 | 0 | 5 | 5 | 0 | 44 | 54 | 81.48 | 18.51 |
| | Suelo desnudo | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 8 | NA | NA |
| | Total | 53 | 33 | 202 | 275 | 204 | 54 | | | |
| | Exactitud Clasificador (%) | 90.56 | 90.90 | 84.15 | 63.63 | 97.05 | 81.48 | | | |
| | Error Omisión (%) | 9.43 | 9.09 | 15.84 | 36.36 | 2.94 | 18.51 | | | |

Figura 6. Resultados de la clasificación de tipos de cobertura terrestre para 2002-2003.

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>



| 2013 | | Referencia | | | | | | | Exactitud Usuario (%) | Error Comisión (%) |
|-----------------------------------|----------------|----------------|---------|----------|----------|----------|----------|-------|-----------------------|--------------------|
| | | Cuerpo de agua | Poblado | Pastizal | Agrícola | Forestal | Matorral | Total | | |
| Clasificación | Cuerpo de agua | 44 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 44 | 100 | 0 |
| | Poblado | 6 | 75 | 0 | 2 | 0 | 0 | 83 | 90.36 | 9.63 |
| | Pastizal | 1 | 0 | 118 | 38 | 7 | 2 | 166 | 71.08 | 28.91 |
| | Agrícola | 0 | 3 | 40 | 270 | 70 | 1 | 384 | 70.31 | 29.68 |
| | Forestal | 0 | 0 | 0 | 3 | 246 | 3 | 252 | 97.61 | 2.38 |
| | Matorral | 0 | 0 | 3 | 9 | 0 | 66 | 78 | 84.61 | 15.38 |
| | Suelo desnudo | 0 | 1 | 0 | 4 | 0 | 0 | 5 | NA | NA |
| | Nube | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | NA | NA |
| Total | | 51 | 79 | 161 | 327 | 323 | 72 | | | |
| Exactitud Clasificador (%) | | 86.27 | 94.93 | 73.29 | 82.56 | 76.16 | 91.66 | | | |
| Error Omisión (%) | | 13.72 | 5.06 | 26.70 | 17.43 | 23.83 | 8.33 | | | |

Figura 7. Resultados de la clasificación de tipos de cobertura terrestre para 2013.

Debajo de las figuras 4-7 se muestran las matrices de confusión resultantes del análisis de precisión del proceso de clasificación de las imágenes. La clasificación para 1985-86 mostró el mayor error de comisión (figura 4) en la clase forestal, con 20.1 % y Exactitud del Usuario (EU) de 79.9 %, que asignó erróneamente en esta clase píxeles que corresponden a la clase agrícola. Ello puede deberse a que se tomaron imágenes de diferentes fechas para lograr el cubrimiento total de la cuenca para esas fechas representativas de la década de los 80's. Para 1994 (figura 5), el mayor error de comisión se obtuvo en la clase pastizal, con 35.2 % (EU 64.7 %). Para 2002-03 (figura 6), la clase pastizal obtuvo el error de comisión más alto con 32 % (EU 68 %). Para ambos años, píxeles de la clase agrícola fueron clasificados como pastizal. El 2013 (figura 7)

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>

tuvo la particularidad de presentar dos clases con el mayor error de comisión (agrícola, pastizal). La primera con 29.7 % (EU 70.3 %) y la segunda con 28.9 % (EU 71.1 %). Para este año, los píxeles de las clases forestal/pastizal fueron clasificados como agrícolas y píxeles de la clase agrícola fueron clasificados como pastizal.

Para 1985-86 (figura 4), la clase que presentó un mayor porcentaje de omisión fue poblado, con 35.3 % (EU 64.7 %), clasificándose erróneamente en agrícola, principalmente. Para 1994 (figura 5), la clase agrícola presentó el mayor error de omisión, con 28.9 % (Exactitud del Clasificador o EC de 71.1 %), clasificándose erróneamente en pastizal y forestal, mayoritariamente. Para 2002-03 (figura 6), nuevamente la clase agrícola presentó el mayor error de omisión, con un 36.4 % (EC 63.6 %), clasificándose erróneamente en pastizal. Para 2013 (figura 7), se obtuvo el mayor porcentaje de omisión en pastizal y forestal, con 26.70 % y 23.83 %, respectivamente (EC 73.3 % y 76.2 %), clasificándose erróneamente las clases pastizal y forestal en agrícola. Estos valores de error de omisión se explican considerando la similitud que presentan las radiancias superficiales de las clases, lo que puede provocar que el clasificador de máxima verosimilitud tienda a confundirlas.

Los coeficientes Kappa obtenidos (Tabla 1) permiten afirmar, de acuerdo a Monserud & Leemans (1992) que las clasificaciones son muy buenas para 1994, 2002-2003 y 2013 (entre 0.70 y 0.85) y excelente (>0.85) para 1985-86. El porcentaje de puntos de validación clasificados correctamente confirma el buen desempeño del procedimiento. Para los años analizados este valor obtuvo entre 80 % y 89.4 %.

Tabla 1. Interpretación basada en la escala propuesta por Monserud & Leemans (1992) del coeficiente Kappa obtenido para las clasificaciones de cobertura terrestre.

| Año | Coficiente Kappa | Varianza índice Kappa | Total de observaciones | Observaciones correctas (%) | Interpretación |
|---------|------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------|----------------|
| 1985-86 | 0.86 | 0.000172 | 960 | 89.40 | Excelente |
| 1994 | 0.75 | 0.000345 | 814 | 81.82 | Muy bueno |
| 2002-03 | 0.75 | 0.000331 | 821 | 81.00 | Muy bueno |
| 2013 | 0.75 | 0.000274 | 1013 | 80.85 | Muy bueno |

4.3. Análisis de cambios dominantes de coberturas

En la figura 8 (arriba) se observa que forestal fue la cobertura dominante de 1985 a 2003. En 2013 dejó de serlo. Esto coincide con lo expuesto por Villanueva-Manzo (2002) en términos de que la deforestación es una constante respecto al cambio de cobertura a nivel nacional. Aquí, la agricultura se vuelve la cobertura con mayor extensión, confirmando lo observado. De 1985-2006, agricultura estuvo en segundo término (después de forestal). El ligero aumento en la cobertura forestal en el 2003 puede asociarse a prácticas de reforestación. La cobertura poblado, aunque aún marginal respecto a la extensión de los demás tipos, no dejó de crecer de 1985-2013 en cuanto al porcentaje de área ocupada.

El porcentaje de área ocupada correspondiente a cada cobertura terrestre con respecto a la totalidad de la cuenca es presentado por Estados de la República en la figura 8 (abajo). En 1985-86, las coberturas forestal, agrícola, matorral y poblado se concentraron en Puebla y la cobertura pastizal en Veracruz. Para 1994, las coberturas matorral, forestal, poblado, agrícola y pastizal se concentraron en Puebla y suelo desnudo en Veracruz. En 2002-03, se mantuvo la misma concentración en Puebla y Veracruz presentada en 1994. En 2013, las coberturas forestal, matorral, agrícola y poblado se concentraron en Puebla y pastizal en Veracruz. Pudo

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>

identificarse un incremento en el porcentaje de ocupación de la cobertura agrícola desde 1985-86 hasta 2013 (24 %-42 % de la extensión total). Esto significa un incremento del 18.1 % y una disminución en la cobertura forestal de 1985-2013, de 54.6 % a 37.6 % (reducción de 17 %).

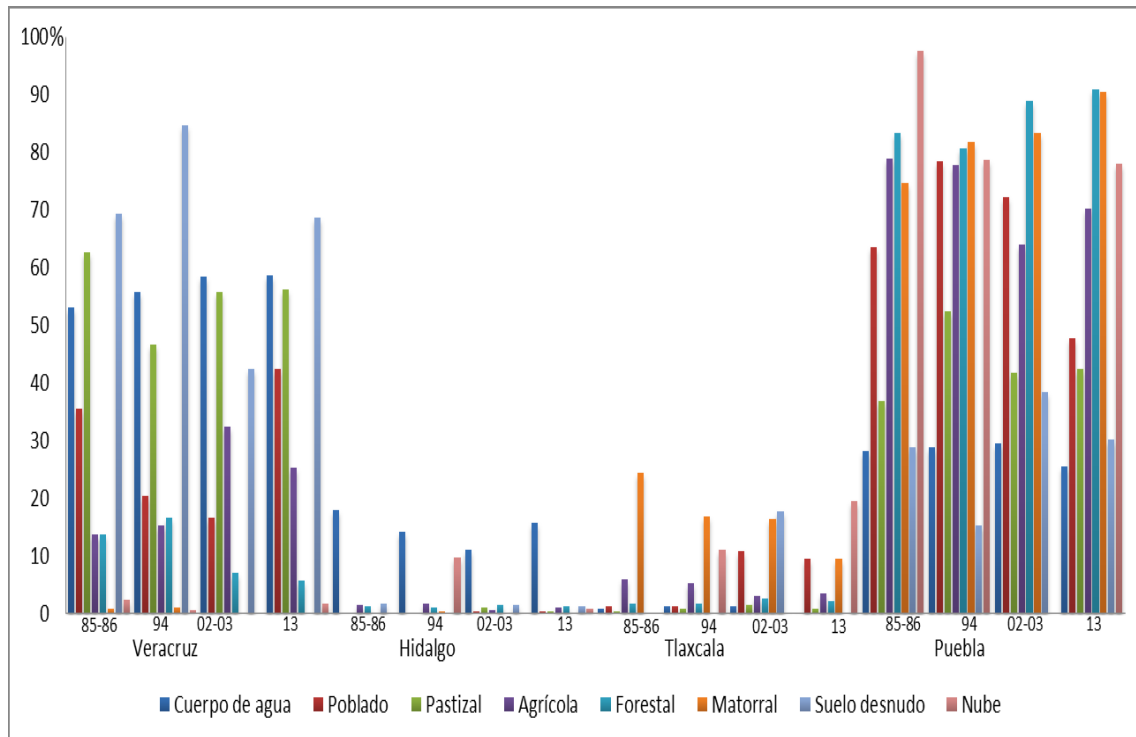
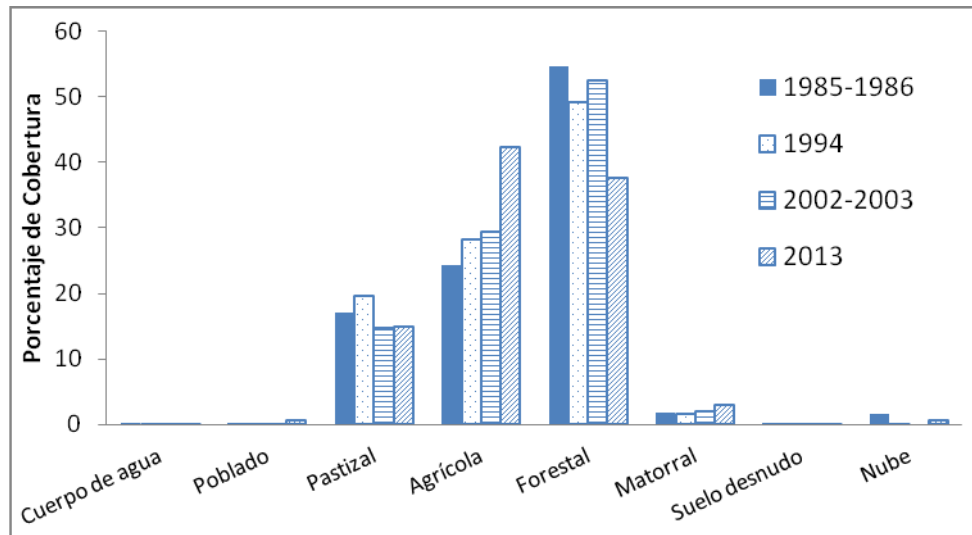


Figura 8. Porcentaje de cobertura respecto al total de la cuenca de captación entre 1985 y 2013 (arriba) y por parte de los Estados en la cuenca (abajo).

En la Tabla 2 se presentan las tasas anuales de cambio en el periodo 1985-2013 de cada tipo para toda la cuenca, de acuerdo a Puyravaud (r, 2003) y a FAO (q, 2015), así como el cambio anual según FAO (R, 2015). En concordancia con Cuevas *et al.* (2010a), se identificó

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>

que la clase poblado presentó la mayor tasa positiva anual de cambio ($r=8.6\%$ / $q=9.0\%$), seguida de la clase agrícola con $r=1.85\%$ y $q=1.87\%$, la clase matorral con $r=1.67\%$ y $q=1.69\%$ y la clase cuerpo de agua con $r=0.24\%$ y $q=0.24\%$. El mayor decremento se presentó para la clase suelo desnudo con $r=-1.39\%$ y $q=-1.38\%$, seguida de la clase forestal con $r=-1.24\%$ y $q=-1.23\%$ y la clase pastizal con $r=-0.4\%$ y $q=-0.4\%$. Los valores de r y q son muy parecidos. Sobre las diferencias entre estas tasas anuales de cambio, Peralta-Rivero *et al.* (2015) mencionan que r tiende a calcular una tasa anual mayor para los casos con pérdidas de cobertura grandes y aceleradas, y resultados iguales a q en pérdidas y ganancias de cobertura mínimas o no aceleradas. Lo anterior es explicado por dichos autores de acuerdo a lo siguiente. La tasa r toma en cuenta la pérdida de los recursos forestales y su implicación en la parte biológica de los ecosistemas forestales, mientras que q calcula una tasa anual de cambio más aproximada al área final (A_2) de las coberturas. Sin embargo, ambas tasas tienden a subestimar los resultados mientras mayor sea el cambio de cobertura, pues las tasas en un periodo de 30 años no dan como resultado el área final del 2013. Respecto al cambio anual de cobertura terrestre (R), la mayor ganancia de cobertura en hectáreas por año se presentó en la clase agrícola con 4709.43 ha/año, y la mayor pérdida en forestal con -4408.36 ha/año. Esto indica un cambio proporcional de cobertura forestal, principalmente a cobertura agrícola.

Tabla 2. Tasas anuales de cambio de cobertura terrestre r (Puyravaud, 2003) y q (FAO, 2015), y cambio anual de cobertura terrestre R (FAO, 2015), 1985-2013.

| Clase | Cuenca de captación | | | | | |
|----------------|---------------------|------------------|-------------------|--------------|---------|---------|
| | A_1 (1984, ha) | A_2 (2014, ha) | Δt (años) | R (ha/año) | r (%) | q (%) |
| Cuerpo de agua | 2733 | 2935 | 30 | 6.73 | 0.24 | 0.24 |
| Poblado | 409 | 5422 | 30 | 167.1 | 8.62 | 9.00 |
| Pastizal | 132778 | 117089 | 30 | -522.96 | -0.42 | -0.42 |
| Agrícola | 189885 | 331168 | 30 | 4709.43 | 1.85 | 1.87 |
| Forestal | 426046 | 293795 | 30 | -4408.36 | -1.24 | -1.23 |
| Matorral | 14232 | 23507 | 30 | 309.16 | 1.67 | 1.69 |
| Suelo desnudo | 1847 | 1217 | 30 | -21 | -1.39 | -1.38 |

En cuanto a los cambios para toda la cuenca de 1985 a 2013 (figura 8 abajo) la clase pastizal fue la que presentó mayor cambio, pasando a agrícola en un 42.9 %. La segunda mayor transición fue la de matorral a agrícola (32.5 %). Otro cambio importante se presentó en la cobertura forestal, que pasó a agrícola (32.3 %). Suelo desnudo presentó un cambio a pastizal (24.3 %) y a agrícola (34.1 %). Las coberturas con menos cambios fueron cuerpo de agua y poblado (73.0 % y 67.7 % respectivamente). Veracruz presentó el mayor cambio de cobertura forestal a agrícola (54.1 % de transición), seguido del cambio de matorral a pastizal y agrícola (46.1 % y 41.2 % respectivamente). El mayor cambio para Veracruz fue de pastizal a agrícola (44.9 %). Sobre Puebla, la mayor transición fue de pastizal a agrícola (39.2 %). En segundo término, se detectó matorral a agrícola (29.5 %) y forestal a agrícola (29.3 %). En Tlaxcala, el mayor cambio fue de pastizal a agrícola (55.31 %). El siguiente cambio fue de matorral a agrícola (41.2 %). Hidalgo presentó el mayor cambio de matorral a agrícola (85.7 %), seguido de pastizal a agrícola (25 %) y forestal a agrícola (22.1 %).

En general puede observarse una tendencia de cambio hacia la cobertura agrícola en la cuenca del río Tecolutla (figura 9 abajo) y en los Estados que comprenden la cuenca de captación, sobre todo en Veracruz, donde también se presentó un cambio hacia pastizal. Lo anterior coincide con lo reportado por Osuna-Osuna *et al.* (2015). Para toda la cuenca y todo el periodo de estudio (figura 9 arriba) puede observarse el decremento de la cobertura forestal (de

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>

426 a 294 miles de ha, 30 % de pérdida) y el crecimiento de la agricultura (de 190 a 330 miles de ha, 74 % incremento). Este efecto de intensificación de la agricultura en términos de su crecimiento en cuanto a cubrimiento de superficies con otros tipos de cobertura terrestre es un fenómeno que se observa en diversas regiones del mundo. Así por ejemplo el estudio de José-María *et al.* (2010) verifica su ocurrencia en la región mediterránea. Este estudio considera los efectos negativos de esta tendencia de cambio en cuanto a pérdidas en la riqueza de semillas y cambios negativos en la composición de las especies vegetales nativas. Este efecto pudiera estar ocurriendo en la cuenca de estudio.

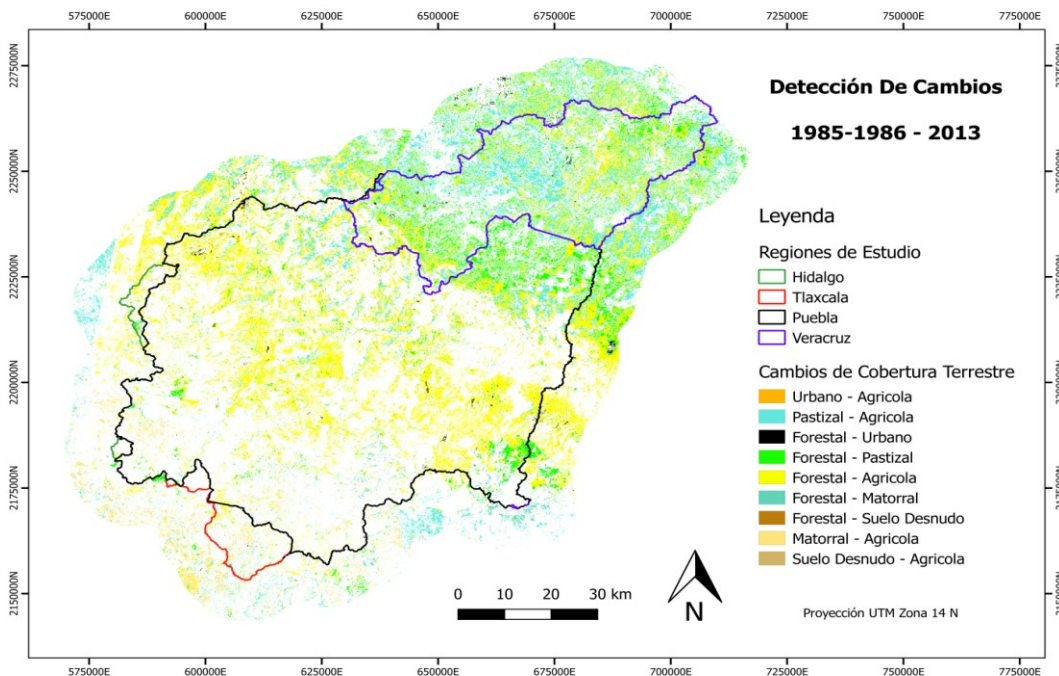
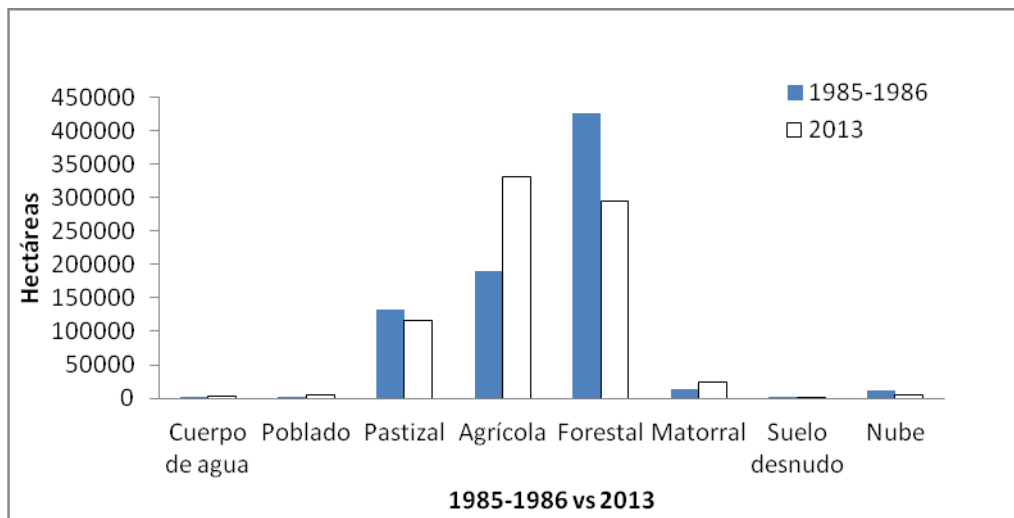


Figura 9. Cambios principales de cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, 1985-2013.

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>

4.4. Aportes de la Geomática y limitantes en el estudio

La mejor manera de realizar estudios como el presentado en este artículo es con ayuda de la Geomática (específicamente desde Teledetección), ello debido a que se manejan datos que no pueden ser medidos actualmente por haber ocurrido en el pasado, (Butt *et al.* 2015), específicamente en las últimas cuatro décadas. Así también, definir tipos actuales de cobertura terrestre con levantamientos de campo directo es prácticamente imposible por la extensión y la dificultad de acceso a los territorios de las cuencas. Las técnicas de Teledetección son también las indicadas en este tipo de estudios (Rujoiu-Mare & Mihai, 2016). Hay que destacar que estas técnicas constituyen una forma de medición directa en campo, de características biofísicas a partir de las propiedades ópticas de los tipos de cobertura terrestre en términos de su reflexión de la luz incidente. Las citas antes presentadas (Beuchle *et al.* 2015, Wasige *et al.* 2013, Haque & Basak 2016, Sanhouse-Garcia, 2016, Estrada *et al.* 2013, Osuna-Osuna *et al.* 2015) son constancia de la eficacia y pertinencia de los estudios de cambio de cobertura terrestre en cuencas usando análisis de imágenes satelitales.

Ventajas adicionales que proporcionó la Geomática a este estudio son las siguientes: disponibilidad de herramientas que permiten conceptualizar la problemática territorial y la generación de modelos de conocimiento que orientan la implementación de los componentes del modelo obtenido del sistema territorial en el entorno de SIG (Tapia-Silva, 2016); obtención de información geográfica gratuita (INEGI, CONABIO, Google Earth, etc.); análisis de grandes extensiones territoriales en distintos momentos, en poco tiempo (comparado con otras técnicas de estudio) e inclusive en el pasado; así como facilidad de presentación de resultados en mapas, tablas y estadísticas.

En cuanto a las limitantes del enfoque conceptual y metodológico de este estudio están: no contar en todos los casos con imágenes satelitales de buena calidad y sin nubes; la sobreestimación o pérdida de información producto de una mala clasificación de imágenes, resultado de la confusión por parte del algoritmo de clasificación (relacionado a la similitud de firmas espectrales de los tipos de cobertura). Casos de confusión fueron pastizal por agrícola, agrícola por matorral y forestal por pastizal. Estos problemas han sido reportados también por Del Toro-Espin *et al.* (2015). En ese estudio se observó confusión entre clases usando los clasificadores Máxima Verosimilitud, SMAP y Random Forest. La confusión entre coberturas por parte del clasificador utilizado se puede disminuir con un tratamiento post-clasificador. Esto fue efectuado en nuestro trabajo dando como resultado una mejora en los coeficientes Kappa que, como se indicó previamente, de acuerdo con Monserud & Leemans (1992), permiten caracterizar las clasificaciones obtenidas como muy buenas y excelentes. Según lo corroborado, la Geomática ofrece más ventajas que desventajas para la resolución de problemas como la identificación de la cobertura terrestre en grandes extensiones, con distinta temporalidad y sus tendencias de cambio.

5. Conclusiones

Este estudio se centra en dos puntos fundamentales. El primero consiste en la aplicación, desde la Geomática, de un método simple para generar modelos conceptuales de sistemas territoriales complejos, como paso previo para el desarrollo de un proyecto en el entorno de SIG (Tapia-Silva 2016). El segundo es el estudio mediante Teledetección, a partir del modelo antes referido, del cambio de cobertura terrestre en una cuenca en México (Río Tecolutla), en proceso de pérdida de cobertura natural y cambio a antropogénica durante las últimas cuatro décadas. De acuerdo a nuestro conocimiento, no existe un estudio precedente con estas características.

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>

El método utilizado para Modelado Geoespacial Conceptual permite desarrollar satisfactoriamente modelos que representan sistemas complejos, facilitando la identificación de factores clave en problemáticas multifactoriales, mediante la abstracción del mundo real al mundo geográfico. Los componentes fundamentales del sistema modelado pueden implementarse en SIG como eje integrador de las disciplinas convergentes en Geomática. Trabajos como el presentado pueden realizarse eficientemente desde el ámbito de esta ciencia y sus disciplinas convergentes (específicamente Teledetección) dado el manejo de enormes cantidades de datos que no pueden ser medidos directamente en campo en el presente (por su extensión) o correspondientes a fechas pasadas.

Para el caso de estudio presentado, se concluye que la cuenca del río Tecolutla presenta una tendencia de cambio hacia la agricultura, principalmente en Veracruz y Puebla. De 1984 a 2014 este tipo de cobertura pasó de 24 % a 42 % de la extensión total. Esto se traduce en un incremento del 18.1 % (tasa anual de cambio de 1.8 %). La mayor tasa de cambio anual fue presentada por la cobertura poblado (8.6 %), siendo la de mayor dinamismo. Otro patrón de cambio detectado es la pérdida de cobertura forestal, la cual es sustituida por coberturas agrícolas.

La tendencia principal observada (incremento en la actividad agrícola) puede traer como consecuencias: pérdida de áreas de captación de agua, aumento de contaminación por agroquímicos, azolvamiento por arrastre de sedimentos, reblandecimiento de suelos, etc. Influye en aspectos ecológicos, económicos y sociales de la cuenca del río Tecolutla. Los resultados obtenidos con este proyecto pueden aportar información y conocimiento relevantes, requeridos para la formulación de políticas públicas y privadas que permitan reducir los efectos indeseados.

Referencias bibliográficas

Berlanga-Robles, C.A.; García-Campos R.R.; López-Blanco J.; Ruiz-Luna A (2010): Patrones de cambio de coberturas y usos del suelo costa norte de Nayarit (1973-2000). *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 72, pp. 7-22.

Beuchle, R.; Grecchi, R.C.; Shimabukuro, Y.E.; Seliger.; Eva, H.D.; Sano, E. & Achard F. (2015). Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. *Applied Geography*, 58, pp. 116-127.

Brizuela, A.B.; Aguirre, C.A.; Velasco, I. (2007): Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. *TELEDETECCIÓN-Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*. pp. 207-214.

Challenger, A. & R. Dirzo (2009): Factores de cambio y estado de la biodiversidad, en *Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio*. México, Conabio, pp. 37-73.

Chuvieco, E. (2002): *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio*. España, Ariel.

Comisión Nacional del Agua. (2015): *Estadísticas del agua en México, edición 2015*. México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONABIO. (2012): *Portal de geoinformación: sistema nacional de información sobre biodiversidad*. México, CONABIO. [Consulta: 15-08-2016]. Disponible en <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>

CONABIO. (2016): *Río Tecolutla*. México, CONABIO. [Consulta: 15-08-2016]. Disponible en http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_076.html

Cuevas M.L., Garrido A., Pérez D.J.L. y González I.D. (2010a): "Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural", en Cotler-Avalos H. (Coor.): *Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización*. México, Instituto Nacional de Ecología/Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P, 231 pp.

Cuevas M.L.; Garrido A.; Sotelo E.I. (2010b): "Regionalización de las cuencas hidrográficas de México", en Cotler-Avalos H. (Coor.): *Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización*, México, Instituto Nacional de Ecología/Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P, 231 pp.

Del Toro Espín, N.; Gomáriz-Castillo, F.; Canovas-García, F.; Alonso-Sarria F. (2015): Comparación de métodos de clasificación de imágenes de satélite en la cuenca del río Argos (región de Murcia). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 67, pp. 327-347.

Demers, M.N. (2000): *Fundamentals of Geographic Information Systems*. John Wiley and Sons.

Estrada, F.; Barba E.; Ramos R. (2013): Cobertura temporal de los humedales en la cuenca del Usumacinta, Balacán, Tabasco, México. *Universidad y ciencia trópico húmedo*, 2, 29, pp. 141-151.

Haque, Md. I. & Basak, R. (2016). Land cover change detection using GIS and remote sensing techniques: A spatio-temporal study on Tanguar Haor, Sunamganj, Bangladesh. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. In press, corrected proof. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.12.003>

Jiménez-Moreno, M.J.; González-Guillen, M.J.; Escalona-Maurice M.; Valdez-Lazalde J.R.; Aguirre-Salado C.A. (2011): Comparación de métodos espaciales para detectar cambios en el uso del suelo urbano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17, 3, pp. 389-406.

Monserud, R.A., Leemans, R. (1992): Comparing Global Vegetation Maps with the Kappa Statistic. *Ecological Modelling*, 62, pp. 275–293.

Murray, I; M. Blázquez; O. Rullan. (2005): Los cambios en la cobertura de la tierra: una revisión bibliográfica desde la geografía. *Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, 10, 571.

Osuna-Osuna, A.K.; Díaz-Torres J.D.J.; De Anda-Sánchez J.; Villegas-García E.; Gallardo-Valdez J.; Dávila-Vázquez G. (2015): Evaluación de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca del río Tecolutla, Veracruz, México; periodo 1994-2010. *Rev. Ambient. Agua*, 10, 2, pp. 350-362.

Peralta-Rivero, C.; Torrico-Albino, J.C.; Vos, V. A.; Galindo-Mendoza, M. G.; Contreras-Servín, C. (2015): Tasas de cambios de coberturas de suelo y deforestación (1986 – 2011) en el municipio de Riberalta, Amazonia boliviana. *Ecología en Bolivia*. 50, 2, pp. 91-114.

Pereyra Díaz, D.; J. A. A. Pérez Sesma; M. R. Salas Ortega. (2010): "Hidrología", en Florescano, E., J. Ortiz Escamilla (coords.): *Atlas del Patrimonio Natural, Histórico, Cultural de Veracruz, tomo I*. México, Gobierno del Estado de Veracruz–Universidad Veracruzana, pp. 71-106.

Puyravaud, Jean-Philippe. (2003): Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177, pp. 593-596.

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.564>

Sanhouse-García, A.J.; Bustos-Terrones, Y.; Rangel-Peraza, J.G.; Quevedo-Castro, A. & Pacheco, C. (2016). Multi-temporal analysis for land use and land cover changes in an agricultural region using open source tools. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. In Press. Corrected Proof. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2016.11.002>

Tapia-Silva, F.O. (2014): Avances en geomática para la resolución de la problemática del agua en México. *Tecnología y Ciencias del agua*, 2, 5, pp.131-148.

Tapia-Silva, F.O. (2016): Modelado Geoespacial Conceptual aplicado a definición del potencial de captación de agua de lluvia en una megalópolis en crisis. *Memorias del primer Congreso Nacional de Ciencias Geoespaciales*. 7-9 Diciembre. Ciudad de México.

Vermote, E.F; Tanré D.; Deuzé J.L.; Herman M.; Morcrette J.-J. (1997): Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35, 3, pp. 675-686.

Villanueva-Manzo, J. (2002): *Microcuencas*. México, Universidad Autónoma de Chapingo, pp. 225.

Wasige, J.E.; Groen, T.A.; Smaling, E. & Jetten, V. (2013). Monitoring basin-scale land cover changes in Kagera Basin of Lake Victoria using ancillary data and remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, pp. 32- 42.

Butt, A.; Shabbir, R.; Ahmad, S.S. & Aziz, N. (2015) Land use change mapping and analysis using Remote Sensing and GIS: A case study of Simly watershed, Islamabad, Pakistan, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18-2, pp 251-259.

Rujoiu-Mare M.R. & Mihai, B.A. (2016). Mapping Land Cover Using Remote Sensing Data and GIS Techniques: A Case Study of Prahova Subcarpathians, *Procedia Environmental Sciences*, 32, pp. 244-255.

José-María, L., Armengot, L.; Blanco-Moreno, J.M.; Bassa, M. and Sans, F.J. (2010). Effects of agricultural intensification on plant diversity in Mediterranean dryland cereal. *Journal of Applied Ecology*, 47-4, pp. 832-840

Vitousek PM, Mooney HA, Lubchenco J, Melillo JM (1997) Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science*. 277. pp.494-499.