

PATRONES DE CAMBIO EN LA ZONA DE LA PRESA MARTE R. GÓMEZ, TAMAULIPAS, MÉXICO*

Gabriela Gómez Rodríguez**

Resumen

Una de las ventajas de monitorear una zona mediante imágenes de satélite es la de poder repetir las observaciones. Esto posibilita detectar la transformación en las condiciones del medio. Este trabajo ejemplifica el uso de las técnicas de detección de cambio, e ilustra como la combinación de información obtenida de las imágenes digitales, más otra complementaria integrada en un ambiente de sistemas de información geográfica, puede dar una idea mucho más precisa de las transformaciones que, desde el punto de vista ecológico, puedan ser de importancia. Para esto se seleccionó una zona semiárida del NE de México, que abarca parte de los estados de Tamaulipas y Nuevo León, en la frontera con Estados Unidos y forma parte de la cuenca del Río San Juan.

La combinación de la información de cambio, obtenida de la diferencia de índices de vegetación de tres imágenes Landsat MSS, y del uso del suelo, permitió identificar la distribución del cambio. Es así que queda en evidencia la fuerte disminución en la extensión de los cuerpos de agua, un aparente incremento en la cobertura vegetal de las zonas con agricultura de temporal y su disminución en la agricultura de riego y el pastizal, así como la poca fluctuación de las zonas boscosas.

Al incorporar la información del modelo de elevación del terreno se muestra el cambio en zonas de alto riesgo de deforestación por erosión hídrica, y que la pérdida de vegetación en áreas de pendiente pronunciadas es poco frecuente.

Palabras clave: detección de cambio, índices de vegetación, imágenes digitales, sistemas de información geográfica.

Summary

One of the advantages of land cover monitoring by means of satellite images is to have several observations of a specific place. That gives us the possibility of detecting land changes. This paper exemplifies the use of change detection techniques and illustrates how the combination of digital image information and ancillary data in a geographic information system can give us a much clear idea of the ecological importance of transformations.

A semiarid zone, in the Tamaulipas and Nuevo León States was selected. This area, south of the US border, is part of the San Juan River basin. The change image was obtained from the vegetation index difference of 3 Landsat MSS images. This change image was combined with digital land use maps to produce the change distribution. This procedure flags a marked decrease in the extent of the water bodies, an increase in vegetation cover in areas of temporal agriculture and grassland, and the little

* Recibido: 18 de abril de 1997.

** Instituto de Geografía, UNAM, México.

variation of the forested areas. With the aid of the elevation model it was possible to discriminate the change in areas of high water erosion risk. The loss of the vegetation cover in areas of high slope is not frequent

Key words: detecting changes, vegetation index, digital image, geographic information system.

1. Introducción

Una de las ventajas del uso de imágenes de satélite es la posibilidad de observar una zona específica en repetidas ocasiones. Dependiendo de las características de las imágenes se tendrá un periodo de revisita de una zona dada que fluctúa desde minutos hasta días. Esta característica ha sido utilizada por numerosos autores que, mediante diversos métodos, han comparado imágenes para encontrar las diferencias que presenta una zona en especial a lo largo del tiempo. Un ejemplo claro de esto lo representan los estudios que, por medio de comparaciones multitemporales de imágenes NOAA AVHRR, analizan las variaciones estacionales de la vegetación y mapean diversos tipos de vegetación (Tucker *et al.*, 1985; Goward *et al.*, 1987; Achard y Blasco, 1990; Brown *et al.*, 1993; Eastman y Fulk, 1993; Reed, 1993; Running *et al.*, 1995). Estudios multitemporales de la calidad del agua en lagunas costeras de México son otro ejemplo (Ruiz, 1995).

Una importante área de investigación ha sido la detección de cambio que analiza las diferencias en la cobertura vegetal y en el uso del suelo a través del tiempo. Las técnicas de detección de cambio se basan en el supuesto de que cualquier transformación en la cobertura resultará en alteraciones en los valores de reflectancia lo suficientemente grandes para ser registradas. Para el análisis de este fenómeno debe buscarse que las imágenes tengan condiciones atmosféricas, de ángulo solar y humedad del suelo similares (Singh, 1989).

Estas técnicas van desde la simple comparación visual de dos imágenes, lo cual imposibilita la cuantificación de áreas, hasta el análisis digital de dos o más imágenes simultáneamente. En este grupo Mouat *et al.* (1993) incluye: *a)* diferencia o división de imágenes, *b)* rutinas de clasificación, *c)* datos transformados y *d)* análisis de regresión. Todas estas técnicas requieren de imágenes digitales correctamente registradas (Townshend *et al.*, 1992) y corregidas atmosféricamente (Hall *et al.*, 1991) de manera que permitan una cuantificación de las zonas afectadas.

Es conveniente recordar que las imágenes digitales están compuestas de una "malla" de números, cada una de sus celdas recibe el nombre de pixel ("picture element") y contiene un número digital. Cada número representa, en el caso de imágenes de satélite, el valor promedio del brillo de una superficie de la Tierra a determinada longitud de onda. La superficie puede variar desde unos cuantos metros a kilómetros, dependiendo del sensor empleado.

Es así que la diferencia o división de los valores digitales contenidos en las imágenes, implica analizar el comportamiento reflectivo de diferentes superficies a diversas longitudes de onda y seleccionar la parte del espectro en la cual los elementos de cambio (zonas urbanas, cuerpos de agua, etc.) se puedan observar con más claridad en ambas fechas y realizar restas (o divisiones) de las bandas correspondientes.

Dentro del análisis de datos transformados se encuentra, entre otros, la diferencia de índices de vegetación, en este método, empleado frecuentemente para detectar cambios en la cobertura vegetal (Briggs y Nellis, 1991; Dymond *et al.*, 1992; Goita y Royer, 1992), la fórmula puede diferir (Richardson, 1992), pero el supuesto básico es la absorción de la energía en el espectro visible y la gran reflectividad en el infrarrojo por parte de la vegetación. Numerosos estudios han demostrado la fuerte correlación de la biomasa vegetal y dichos índices (Anderson *et al.*, 1993).

Una vez obtenida la imagen por cualquiera de los métodos descritos, se deberá decidir cómo separar los píxeles de cambio, del resto del área. Por ejemplo, en el caso de una resta de imágenes, los píxeles de no cambio tendrán valores cercanos a cero, por el contrario, los de cambio poseerán valores absolutos grandes. Es ahí donde el analista deberá decidir un valor umbral por encima del cual considerará que ha habido alguna transformación. En sistemas biológicos la situación es compleja ya que el cambio es una característica intrínseca y natural (Botkin *et al.*, 1989); Fung y LeDrew (1988), entre otros, han tratado de encontrar el valor umbral óptimo. Para la zona estudiada, valores de alrededor de una desviación estándar respecto a la media de los datos digitales resultantes, fueron adecuados. Estos autores llegan a la conclusión que, de acuerdo con la técnica usada, será el tipo de cambio encontrado. Por ejemplo, transformaciones de zonas rurales a urbanas, la resta de bandas 2 en MSS es adecuada.

El siguiente problema, después de encontrar las zonas donde el cambio ha ocurrido, es definir hasta qué punto no es debido a la dinámica intrínseca del sistema que pueda llevar a condiciones menos productivas. Es ahí donde el uso de otro tipo de información de respaldo, indicará la importancia de acuerdo con la ubicación espacial del cambio.

En este trabajo se ejemplificará el uso de las técnicas de detección de cambio y se ilustrará cómo la combinación de información obtenida de las imágenes digitales, más otra complementaria, todo esto combinado en un ambiente de sistemas de información geográfica, puede dar una idea mucho más precisa de los cambios que, desde el punto de vista ecológico, podrán ser de importancia. Para esto se seleccionó, como área piloto, la zona de la Presa Marte R. Gómez.

2. Descripción del área en estudio

Se ubica en el noreste de la República Mexicana, donde hay una gran fluctuación interanual de las condiciones de aridez, en los estados de Nuevo León y Tamaulipas, al sur de la frontera con Estados Unidos (Gómez, 1989). Dicha zona, que abarca de los 25° 45' a los 26° 25' de latitud norte y de los 98° 20' a los 90° 20' de longitud oeste, posee altitudes que fluctúan desde menos de 50 hasta 300 msnm. Forma parte de la cuenca hidrológica del Río San Juan; dicho río atraviesa la zona del sudoeste hasta desembocar en la presa Marte R. Gómez. De esta última sale, por su parte oeste, el canal de riego Guillermo Rhode, que alimenta una gran zona de riego al noreste. Al norte se encuentra el río Bravo que cruza la zona de oeste a este. También se incluye una pequeña parte de la presa de La Amistad al norte. El resto de los cuerpos de agua son temporales.

Según la "Regionalización de los climas de México" (García *et al.*, 1983) pertenece a la región noreste. Presenta un clima de árido (BS₀) a semiárido (BS₁), semicálido, extremo y con sequía intraestival (Gómez, 1989).

Los suelos que predominan, según la carta de suelos 1:50 000 (INEGI, SPP, 1976), son los Xerosoles lúvicos y calcáricos en aproximadamente un 75% de la zona. También se encuentran Vertisoles calcáricos y crómicos, principalmente en los cauces de los ríos, este tipo de suelos presenta problemas de salinidad, especialmente en los lechos secos. Alrededor del cauce del río Bravo predomina el Fluvisol. En un 8% (aproximadamente) se encuentran Regosoles calcáricos y en menor proporción existen Litosoles.

Gran parte de la zona posee una fase gravosa (presencia de gravas con diámetro menor de 7.5 cm). Al NW de la Presa se localiza una fase lítica (lecho rocoso y continuo que limita el crecimiento de las plantas). Ambas fases son características del terreno que restringen o impiden el uso agrícola del suelo. Sólo una pequeña zona al norte (donde se ubican los distritos de riego) junto a la frontera, está constituida por suelos profundos (más de un metro) sin capas endurecidas, ni acumulación de sílice, sulfatos, carbonatos o sodio que afecte a los cultivos (López *et al.*, 1990).

La vegetación en el área está integrada, principalmente, por una serie de comunidades de tipo arbustivo, típicas de zonas áridas y semiáridas que Rzedowski (1978) agrupa como matorral xerófilo, así como por algunos pastizales. En cuanto al uso del suelo, es tanto agrícola (de temporal y riego) como ganadero.

3. Materiales y método

Se utilizaron tres imágenes Landsat, MSS corregidas geográficamente provenientes del proyecto North American Landscape Characterization (NALC), la primera compuesta de dos fragmentos: el primero del mes de marzo de 1973 y el segundo de septiembre de 1974; las otras dos corresponden a julio de 1986 y julio de 1991.

Las imágenes fueron corregidas atmosféricamente utilizando los coeficientes de dispersión de Rayleigh (Allen, 1973) de acuerdo con la fórmula:

$$\sigma_s = 1.04 \times 10^5 (n-1)^2 / \lambda^4$$

donde:

n = Índice refractivo del aire, basado en condiciones atmosféricas promedio.

λ = Longitud de onda en micrómetros.

Posteriormente, los valores digitales se multiplicaron por el factor (F) para corregir las diferencias del ángulo solar al momento de la toma, mediante la fórmula:

$$F = \sin(\alpha_0) / \sin(\alpha_1)$$

donde:

α_0 = Ángulo de inclinación solar de la imagen a corregir.

α_1 = Ángulo de inclinación solar de la imagen de referencia.

Se calcularon los índices de vegetación normalizados (NDVI) para cada fecha mediante la fórmula:

$$NDVI = (MSS4 - MSS2) / (MSS4 + MSS2)$$

donde:

MSS2 = Banda 2 LANDSAT MSS (visible)

MSS4 = Banda 4 LANDSAT MSS (infrarrojo cercano).

Se iniciaron restas de estos índices (imagen 1973 menos imagen 1990; 1973-1986; y 1986-1990). De acuerdo con sus desviaciones estándar, respecto a la media, se clasificaron en ocho zonas de cambio.

Se superpuso la información cartográfica a las imágenes de satélite. Para esto se contó con las cartas correspondientes del Inventario Nacional Forestal (Sorani, 1996) en formato digital, en las cuales se agruparon los tipos generales de vegetación y uso del suelo y se rasterizaron. Cabe aclarar que, debido a que la zona no es considerada como forestal, la mayor parte de la información proviene de las cartas de vegetación y uso del suelo que INEGI elaboró en la década de los años setenta y que la porción correspondiente al territorio de Estados Unidos no fue incluido, por no contarse con información respecto a su cobertura.

El modelo digital de elevación utilizado en este estudio posee una resolución de tres segundos de arco, es decir, un dato de elevación cada 90 m, y fue elaborado por la "Defensa Mapping Agency" de los Estados Unidos de América, y obtenido a través del INEGI. Dicho modelo fue remuestreado a 60 m para ajustarlo a la resolución de las imágenes Landsat MSS correspondientes al proyecto NALC. A partir de dicho modelo se calcularon la pendiente en grados y diversos parámetros hidrológicos, desde los límites de la cuenca hasta la dirección y acumulación del flujo.

Como información adicional se contó con una visita al área en enero de 1993, lo cual, en algunos casos, ayudó a la interpretación de los resultados. Tanto para el procesamiento como para el análisis se empleó el sistema de información geográfica ARC/INFO, versiones 6.1 y 7.02 (Environmental Systems Research Institute, Inc.).

4. Resultados

Imágenes de cambio

Las imágenes obtenidas de las restas 1986-1973(74) (80-70) y -1990-1973(74) (90-70) resultan difíciles de comparar, ya que la época del año en que fueron tomadas no corresponde; esto debido a que 1973 fue principio de la época de crecimiento en el mes más seco para la zona (a pesar de que los dos meses previos tuvieron precipitaciones muy por arriba del promedio), y 1986 y 1990, por el contrario, plena temporada de lluvias y finales del ciclo de cultivo de verano, si. Sin embargo, cabe destacar que existen algunos cambios evidentes en estas restas. El primero es la disminución en el área abarcada por la presa Marte R. Gómez ubicada al centro de la imagen en la resta 90-70 (Figura 1). En esta imagen también es evidente el incremento en las zonas abiertas al cultivo, más notorio en la parte noroccidental de la imagen.

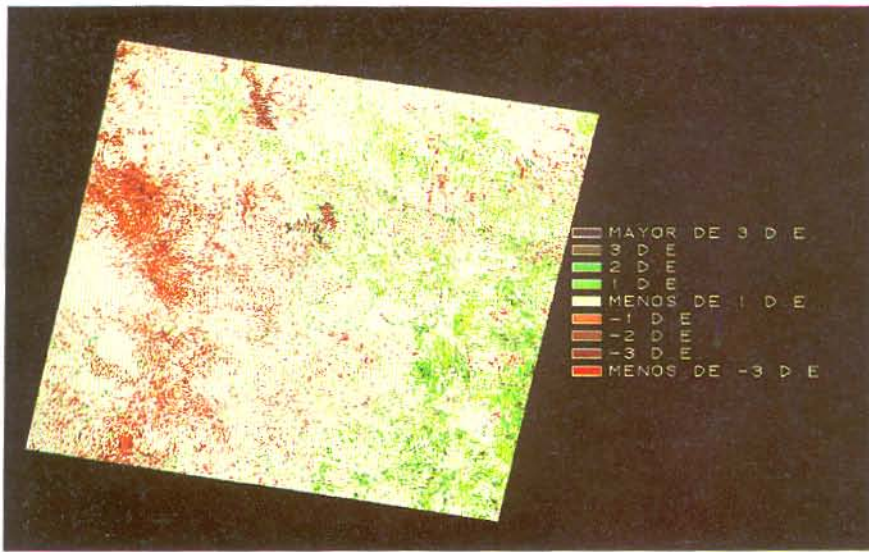


Figura 1. Resta de los índices de vegetación de 1973(74) y 1990 con los polígonos de cobertura de suelo superpuestos. Los números representan las diferentes coberturas, a) pino-encino, b) vegetación en galería, c) agricultura de riego, d) agricultura de temporal, e) pastizal, f) mezquital y matorral y g) vegetación halófila.

De 1986 a 1991 (imagen 90-80) se vuelve a encontrar una disminución tanto en el área de las presas como en la cubierta vegetal de las zonas al occidente de la imagen y un aumento al oriente (**Figura 2**). En general, se puede decir que un 73% del área, es decir 22 195 km², no han sufrido transformación, mientras que un 26% restante se divide en los distintos niveles de cambio (**Tabla 1**).

Tabla 1. Distribución por niveles de cambio

	D. Estándar	RANGO		Núm. pixels	km ²	%
1	Más de 3 D.E.	75.196	165.000	9 082	32.70	0.11
2	3 D. E.	56.661	75.196	43 684	157.26	0.52
3	2 D. E.	38.026	56.661	208 483	750.54	2.49
4	1 D. E.	19.441	38.026	893 338	3216.02	10.65
5	Menos de 1 D.E.	-17.729	19.441	6 165 520	22195.87	73.51
6	-1 D. E.	-36.314	-17.729	877 964	3160.67	10.47
7	-2 D. E.	-54.899	-36.314	158 276	569.79	1.89
8	-3 D. E.	-73.484	-54.899	25 682	92.46	0.31
9	Menos de 3 D.E.	-173.000	-73.484	5 662	20.38	0.07
		TOTAL		8 387 691	30 195.69	100.00

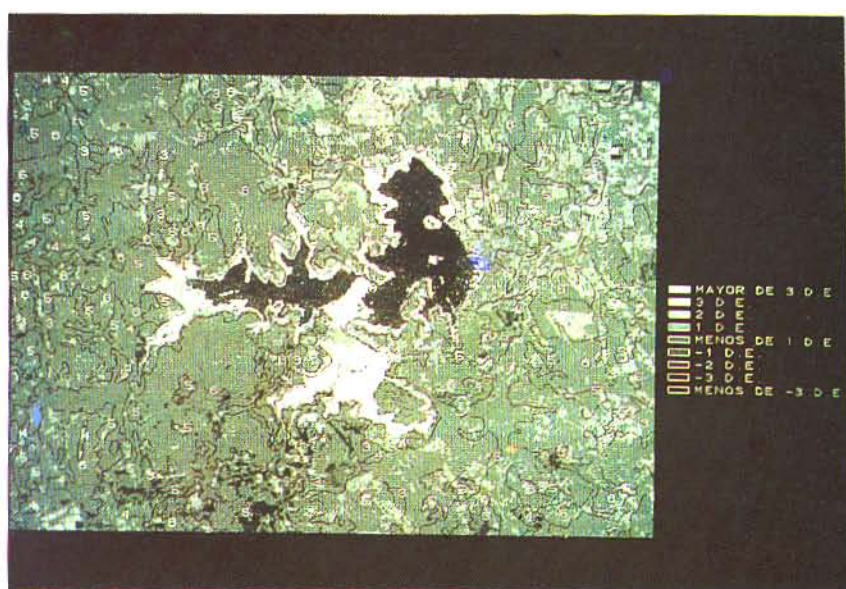


Figura 2. Resta de los índices de vegetación de 1986 y 1990.

Comparación de imágenes de cambio con mapa de uso del suelo

Con base en la imagen 90-80 se identificaron los píxeles de acuerdo con su posición en el mapa de uso de suelo, como se ilustra en la **tabla 2**. Cabe destacar que la cobertura con mayor cambio es la de agua, donde menos de un 50% (48.73%) del área se mantuvo sin alterar y existen altos porcentajes de cambio en ambos sentidos. En algunos puntos, un aumento en el índice de vegetación hacia 1991 corresponde a la utilización de tierras, antes cubiertas por agua, para agricultura y también a eutrofización de la presa con la consecuente aparición de lirio acuático. Por otra parte, la disminución en el mencionado índice puede deberse a los suelos desnudos (altamente reflectivos en el espectro visible) descubiertos al bajar el nivel del agua, como puede apreciarse en la **figura 3**.

Las áreas que permanecen, en apariencia estables, son pequeños manchones de bosque de pino y encino (98.79%), las áreas perturbadas (86.06%), así como las desprovistas de vegetación (90.76%). Estas últimas parecen tener un ligero incremento en su cobertura vegetal, sin embargo, la superficie que abarca esta clase es pequeña para establecer, a esta resolución, una tendencia clara. Las áreas perturbadas, por el contrario, parecen tener una tendencia negativa.

Tabla 2. Distribución de los píxeles por niveles de cambio para cada tipo de cobertura. Resta de índices de vegetación 90-80

Número de píxeles *	DESVIACIONES ESTANDAR (respecto al promedio) + DE 3 D.E.										SUMA	%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
TIPO DE COBERTURA	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
Bosques de pino y encino		148	2	14	27216	166	2			27548	0.41	
%		0.54	0.01	0.05	98.79	0.60	0.01					
Vegetación en galería	275	12	39	230	3907	743	186	28		5420	0.08	
%	5.07	0.22	0.72	4.24	72.08	13.71	3.43	0.52				
Agricultura de riego	1024	7750	40318	170239	1186027	248845	40728	7540	383	1702854	25.62	
%	0.06	0.46	2.37	10.00	69.65	14.61	2.39	0.44	0.02			
Agricultura de temporal		6882	27424	65407	227400	55524	17023	4361	209	404230	6.08	
%		1.70	6.78	16.18	56.26	13.74	4.21	1.08	0.05			
Pastizal	572	6555	44334	149322	783867	179215	48838	5927	352	1218982	18.34	
%	0.05	0.54	3.64	12.25	64.31	14.70	4.01	0.49	0.03			
Matorrales y huizachales	672	12108	57299	271342	2388360	297156	27346	1820	365	3056468	45.99	
%	0.02	0.40	1.87	8.88	78.14	9.72	0.89	0.06	0.01			
Vegetación halófito	31		572	8054	155056	5982	209	59	43	170006	2.56	
%	0.02		0.34	4.74	91.21	3.52	0.12	0.03	0.03			
Áreas perturbadas	5	4	6	15	704	84				818	0.01	
%	0.61	0.49	0.73	1.83	86.06	10.27						
Áreas desprovistas de vegetación			1							184	0.00	
%				14	167	2						
Agua	6216	3220	2284	4744	29088	1560	8773	1820	1990	59695	0.90	
%	10.41	5.39	3.83	7.95	48.73	2.61	14.70	3.05	3.33			
SUMA	8795	36679	172279	669381	4801792	789277	143105	21555	3342	6646205	100.00	
%	0.13	0.55	2.59	10.07	72.25	11.88	2.15	0.32	0.05			

* Cada píxel representa un área aproximada de 3 600 m².



Figura 3. Presa Marte R. Gómez, enero de 1992.

La agricultura de temporal tiene valores elevados de cambio, y parece haber incrementado su cobertura vegetal hacia 1991. Mientras que la agricultura de riego y el pastizal tienen una tendencia negativa. En el caso del riego, la disminución en su cobertura parece ser consistente con una menor disponibilidad de agua. Lo mismo puede decirse de la vegetación de galería, cuya baja es aún más evidente en la imagen.

Comparación de imágenes de cambio con productos del modelo de elevación del terreno

Al superponer la información de cambio con respecto a la pendiente extraída del modelo de elevación de terreno, se encontró que las zonas con tendencia hacia una cobertura menor, que se encontraban en pendientes altas y, en consecuencia, con alto riesgo de erosión, son escasas en la zona y se limitan a algunos manchones aislados al occidente (**Tabla 3**). Sin embargo, son relativamente más amplias las zonas con un flujo acumulado alto, es decir, puntos relativamente más bajos por los cuales el agua tiende a fluir y formar cauces, y que presentan una disminución en su cobertura vegetal, donde en caso de lluvia torrencial tienen una alta probabilidad de sufrir erosión (**Tabla 4**).

Tabla 3. Riesgo por pendientes

	D. Estándar	Núm. pixels	km ²	% por nivel
6	-1 D. E.	3 453	12.43	0.39
7	-2 D. E.	296	1.07	0.19
8	-3 D. E.	261	0.94	1.02
9	menos de 3 D. E.	70	0.25	1.24

Tabla 4. Riesgo por flujo acumulado

	D. Estándar	Núm. pixels	km ²	% del total
6	-1 D. E.	25 541	91.95	2.91
7	-2 D. E.	4 877	17.56	3.08
8	-3 D. E.	588	2.12	2.29
9	menos de 3 D. E.	117	0.42	2.07

5. Discusión y conclusiones

Uno de los primeros puntos que debe tenerse en cuenta en la zona estudiada es el contraste entre una menor disponibilidad de agua en la zona, evidente en la disminución del área abarcada por la presa (**Tabla 2**) y que de hecho corresponde a un menor volumen de agua, y un incremento en la superficie cultivada. Situación que a la fecha debe de ser mucho más pronunciada, ya que ahora existe otra presa cuenca arriba (El Cuchillo) que seguramente retiene gran cantidad del agua que antes se utilizaba en la zona. En un futuro será importante monitorear las zonas que están cambiando hacia una cobertura vegetal mayor (*véase Tabla 2*), que en general son cultivos o pastos inducidos y que, a falta de agua, su tendencia se revertiría por completo.

La zona en particular posee peligro por deforestación en zonas de alto flujo acumulado (**Tabla 4**). Es importante destacar que la zona, por poseer un clima semiárido, se ve sometida, frecuentemente, a precipitaciones torrenciales que agudizan el problema, por lo que esta situación debe ser tomada en cuenta para cualquier planificación futura. En contraste, las zonas con pérdida de vegetación en altas pendientes son pocas, pues la zona es relativamente plana, y no representan un gran riesgo (**Tabla 3**).

La ganadería extensiva es una práctica común en el norte del país y es muy difícil de evaluar empleando, exclusivamente, imágenes de satélite. Sin embargo, mediante la conjunción de información se ve que más de un 50% del área posee matorrales y pastizales (**Tabla 2**).

donde este tipo de actividades se desarrollan, y que el pastizal es una de las clases que más ha cambiado, con una tendencia a una cobertura menor.

La adición de diversas capas de información a la imagen resultante ayuda, en gran medida, a clasificar el cambio, a cuantificarlo y a ubicarlo espacialmente, dándole diferente peso de acuerdo con su ubicación relativa. Es imposible asegurar, con un 100% de certeza, que un pixel clasificado como cambio, mediante cualquier método estadístico, realmente sea algo más que una fluctuación y que, a la larga, lleve a condiciones ambientales adversas, pero sí se puede evaluar el riesgo que dicha situación puede implicar.

En este caso se seleccionó un valor umbral de una desviación estándar para identificar las zonas de cambio. Dicho valor podría, mediante un muestreo de campo, ser ajustado. Sin embargo, es importante comprender que cambios vistos en la imagen de la misma dirección e intensidad pero en sistemas distintos (por ejemplo, dos tipos de vegetación, diferentes pendientes, etc.) pueden tener consecuencias incluso opuestas. Esto no quiere decir que la detección de cambio no sea una herramienta de gran utilidad, pero ésta deberá estar acompañada de otro tipo de información.

Por otra parte, cabe aclarar que la utilización de estas tecnologías no elimina la necesidad del reconocimiento del área. El mapa resultante sirve, entre otras cosas, de guía, al señalar los puntos importantes a verificar en campo. De esta forma el muestreo podrá ser mucho más rápido y eficiente.

El análisis ambiental es un asunto complejo, en el que es necesario contar con información, lo más confiable posible, entre la cual la detección de cambio a partir de imágenes de satélite puede ser de gran ayuda.

6. Agradecimientos

La autora desea hacer patente su profundo agradecimiento a la M. en C. Enriqueta García y a la Dra. Pilar Ruiz Azuara por su asesoría al trabajo de tesis doctoral del cual este artículo forma parte y por sus valiosas sugerencias al manuscrito. También agradece al Instituto de Geografía de la UNAM por el apoyo recibido.

Referencias

- Achard, F., F. Blasco (1990), "Analysis of vegetation seasonal evolution and mapping cover in West Africa with the use of NOAA AVHRR HRPT data", *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, núm. 10, pp. 1359-1365.

- Allen, C. W. (1973), *Astrophysical quantities*, 3a. ed., Athlone Press, London, pp. 125-126.
- Anderson, G. L., J. D. Hanson y R. H. Hass (1993), "Evaluating Landsat thematic mapper derived vegetation indices for estimating above-ground biomass on semiarid rangelands", *Remote Sensing of the Environment*, núm. 35, pp. 11-27.
- Botkin, D. B., M. F. Caswell, J. E. Estes y A. A. Orto (eds.). (1989), *Changing the global environment: perspectives of human involvement*, Academic Press, EUA. 459 pp.
- Briggs, M. D. Nellis (1991), "Seasonal variation of heterogeneity in the tallgrass prairie: A quantitative measure using remote sensing", *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, núm. 4, pp. 407-411.
- Brown, J. F., T. R. Loveland, J. W. Merchant, B. C. Reed y D. O. Ohlen (1993), "Using multisource data in global land cover characterization: concepts requirements and methods", *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, vol. 59, núm. 6, pp. 977-987.
- Dymond, J. R., P. R. Stephens, P. F. Nwsome y R. H. White (1992), "Percentage vegetation cover of a degrading rangeland from SPOT", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, núm. 11, pp. 1999-2007.
- Eastman, R. y M. Fulk (1993), "Long sequence time series evaluation using standardized principal components", *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, vol. 59, núm. 6, pp. 991-996.
- Fung, T. y E. LeDrew (1988), "The determination of the optimal threshold levels for change detection using various accuracy indices", *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, núm. 10, pp. 1449-1454.
- García, E., R. Vidal, M. D. Cardoso y M. E. Hernández (1983), "Las regiones climáticas de México", *Memoria del IX Congreso Nacional de Geografía*, Guadalajara, Jal., México, febrero, vol. 1, pp. 123-130.
- Goita, K. y A. Royer (1992), "Land surface climatology and land cover change monitoring since 1973 over a North-Saharan zone (Ansongo-Mali) using Landsat data", *Geocarto Internacional*, núm. 2, pp. 15-28.
- Gómez R., G. (1989), Variación climática en el Noreste de México, tesis de maestría, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 91 pp.
- Goward, S. N., D. G. Dye, A. Kerber y V. Kalb (1987), "Comparison of North and South American biomes from AVHRR observations", *Geocarto Internacional*, núm. 1, pp. 27-39.

- Hall, F. G., D. E. Stebel, J. E. Nickelson y S. J. Goetz (1991), "Radiometric rectification: toward a common response among multirate, multisensor images", *Remote Sensing of the Environment*, núm. 35, pp. 11-27.
- López García, J., C. Melo Gallegos, L. Manzo Delgado, G. Hernández Corzo (1990), "Propiedades físicas y químicas del suelo", Atlas Nacional de México, Instituto de Geografía, UNAM, México, IV.7.2.
- Mouat, D. A., G. G. Mahin y J. Lancaster (1993), "Remote sensing techniques in the analysis of change detection", *Geocarto Internacional*, núm. 2, pp. 39-50.
- Reed, B. C. (1993), "Using remote sensing and geographic information systems for analyzing landscape/drought interaction", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, núm. 18, pp. 3489-3503.
- Richardson, A. J. y J. H. Everitt (1992), "Using spectral vegetation indices to estimate rangeland productivity", *Geocarto Internacional*, núm. 1, pp. 63-69.
- Ruiz Azuara, P. (1995), "Multitemporal analysis of "simultaneous" Landsat Imagery (MSS and TM) for monitoring primary production in a small tropical coastal lagoon", *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, núm. 2, pp. 187-198.
- Running, T. R., Loveland, L. L., Pierce, R. R., Nemani, E. R., Hunt Jr. (1995), "A remote sensing based vegetation classification logic for global land cover analysis", *Remote Sensing of the Environment*, núm. 51, pp. 39-48.
- Rzedowski, J. (1978), *Vegetación de México*, Limusa, México, 432 pp.
- Singh, A. (1989), "Digital change detection techniques using remotely-sensed data", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, núm. 6, pp. 989-1003.
- Sorani, V. y R. Alvarez (en prensa), "Hybrid maps: updating forest cartography using Landsat TM imagery and land use information", *Geocarto Internacional*.
- Townshend, J. R. G., C. O. Justice, C. Gurney y J. McManus (1992), "The impact of misregistration on change detection", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, núm. 5, pp. 1054-1060.
- Tucker, C. J., J. R. G. Townshend y T. E. Goff (1985), "African land cover classification using satellite data", *Science*, vol. 277, núm. 4685, pp. 33-40.