

Una evaluación cuantitativa de los errores en el monitoreo de los cambios de cobertura por comparación de mapas

Jean-François Mas*
Tania Fernandez*

Recibido: 18 de noviembre de 2002
Aceptado en versión final: 25 de abril de 2003

Resumen. Muchos estudios se basan en la comparación de mapas de diferentes fechas para monitorear los cambios en la cobertura vegetal del suelo. Esta comparación permite el cálculo de las tasas de cambio y la elaboración de datos más detallados como la matriz de transición y los mapas de cambio. En este estudio, se evaluaron los errores que se producen al comparar mapas representados en escalas distintas, obtenidas a través de procesos de digitalización independientes, elaboradas con base en sistemas clasificatorios diferentes o bien cuando los mapas se elaboraron con base en insumos de fechas diferentes. Los errores inherentes a la diferencia de escala o a la captura en la cartografía en formato digital generaron falsos cambios de una amplitud comparable o superior a los cambios reales. La comparación de mapas que se basa en sistemas de clasificación diferentes invalida toda comparación. En cambio, los diferentes enfoques utilizados para enfrentar el problema de los mapas con fechas "múltiples" no arrojan resultados muy diferentes. Se analizan algunos métodos para aminorar estos problemas y evaluar la confiabilidad de base de datos multifecha.

Palabras claves: Monitoreo de cambios de cobertura, sistema de información geográfica, evaluación de confiabilidad, base de datos multifecha.

Quantitative assessment of errors in monitoring land-cover changes by comparison of maps

Abstract. Many studies aimed at assessing land-cover changes are based upon the comparison of maps elaborated in different dates. This comparison allows the calculation of change rates as well as to generate more detailed data such as the transition matrix and the change map. In this study, we evaluated the errors incurred when comparing maps elaborated at different scales, obtained through independent digitalisation processes, elaborated using different classification schemes or when the maps were elaborated with inputs from different dates. Errors derived from the difference of scale or from the map-digitalisation processes led to false changes with a similar or greater scale to that of true changes. The comparison of maps based on different classification schemes invalidated the results of the comparison. By contrast, the different approaches used to tackle the issue of maps with multiple dates produced similar results. The paper discusses some methods aimed at reducing these problems and evaluating the reliability of multi-temporal databases.

Key words: Monitoring land-cover changes, geographic information system, reliability assessment, multi-temporal databases.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se incrementó considerablemente el número de estudios en los cuales se evalúan los cambios en las coberturas del suelo, debido a las consecuencias negativas que tienen estos sobre la conservación de la biodiversidad, los suelos, el clima, el ciclo hidrológico, etc. (Turner y Meyer, 1994; Lambin *et al.*, 2001). Estos estudios de cambio pueden hacerse a partir de datos estadísticos, extrapolaciones, clasificaciones multifecha y comparación de mapas, estos

dos últimos enfoques permiten una representación cartográfica de los cambios. México se ubica dentro de los principales países con una alta tasa de deforestación, aproximadamente de 0.25% y 0.76% anual durante las últimas décadas para el bosque templado y la selva tropical respectivamente (Mas *et al.*, 2002; Velázquez *et al.*, 2002). Este proceso de deforestación tan acelerado se origina principalmente a partir de la década de los años treinta por el rápido crecimiento demográfico y las políticas agrarias (Revel-Mouroz, 1980).

*Instituto de Geografía-UNAM, Sede Morelia, Aquiles Serdan 382, Col. Centro Histórico, CP 58000, Morelia, Michoacán. E-mail :jfm@igiris.igeograf.unam.mx

En muchos estudios, la evaluación de procesos como la deforestación, la pérdida de biodiversidad y las emisiones de CO₂, entre otros, se basan en datos sobre cambios de cobertura obtenidos a través de la comparación de mapas temáticos de diferentes fechas, principalmente los de uso de suelo y vegetación. En teoría, esta comparación cartográfica es una operación muy sencilla en un sistema de información geográfica (SIG): al sobreponer dos mapas de fechas diferentes se obtienen los tipos de cambio, su superficie y localización (Figura 1).

La comparación de estos mapas permite determinar la extensión y la localización de tres tipos de cambio anotados 2/1, 3/1 y 3/2 (cambio de las coberturas 2 a 1, 3 a 1 y 3 a 2, respectivamente).

Los principales datos derivados de esta comparación cartográfica son:

La superficie de los tipos de cobertura para cada fecha, de la cual se deriva la superficie y la tasa de cambio. La tasa de cambio se expresa en superficie promedio que cambia anualmente (dividiendo la superficie de cambio por el número de años del periodo considerado) o en porcentaje de la superficie existente al principio de cada año. Esta última se obtiene usualmente empleando la

ecuación que se indica a continuación (FAO, 1995; Nascimento, 1991),

$$t = \left(1 - \frac{S_1 - S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1 \quad (1)$$

donde t es la tasa de cambio (expresada en % por año multiplicando por 100), S₁ y S₂ la superficie para las fechas 1 y 2 respectivamente y n el número de años entre ambas fechas. Este enfoque no proporciona información detallada sobre los procesos de cambio, sino únicamente el balance final de estos procesos. Por ejemplo, la cobertura 2 (Figura 1) no presenta cambios significativos de su superficie entre la fecha 1 y 2 (tasa de cambio casi nula) aunque esta aparente estabilidad oculta dos procesos de cambio (de 3 a 2 y de 2 a 1) que se anulan (Tabla 1).

La matriz de cambio y el mapa de cambio que indican el tipo de cambio (transformación de una cobertura a otra), su superficie y localización.

La Tabla 1 muestra los datos derivados de la Figura 1, las tasas de cambio se calcularon suponiendo que el periodo entre las dos fechas es de 10 años.

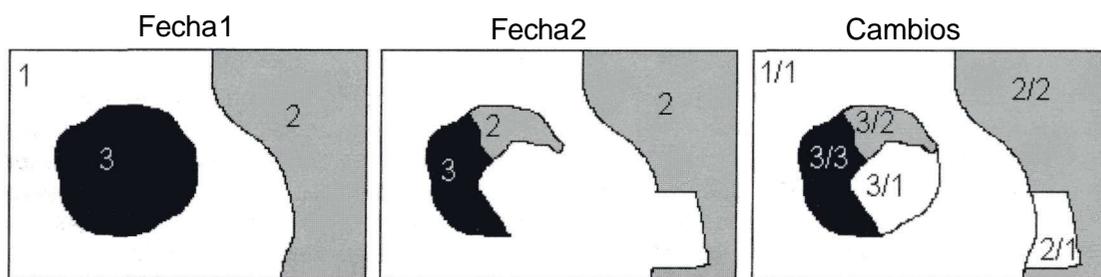


Figura 1. Sobreposición de mapas de dos fechas y obtención de los cambios. Los mapas presentan la distribución de tres tipos de cobertura (1, 2 y 3 respectivamente, representados en blanco, gris y negro) para dos fechas.

Tabla 1. Estadísticas y matriz de cambio (las superficies están expresadas en porcentaje del área total)

Cobertura	Superficie Fecha 1	Superficie Fecha 2	Tasa de cambio (%/ año)
Clase 1	50.4	61.1	1.94
Clase 2	28.2	27.9	-0.11
Clase 3	21.4	11.0	-6.44
Total	100	100	

		Fecha 1			
		1	2	3	Total
Fecha 2	1	50.4	3.6	7.1	61.1
	2	0.0	24.6	3.3	27.9
	3	0.0	0.0	11.0	11.0
Total		50.4	28.2	21.4	100.0

Este tipo de comparación supone que las coberturas están perfectamente identificadas en los mapas, es decir, que no existe ambigüedad o error en cuanto a su clasificación, su delimitación, ni tampoco en la fecha de la información. El incumplimiento de estos supuestos puede llevar a una evaluación errónea de los cambios. Por ejemplo, los errores temáticos en cualquiera de las dos fechas producen "falsos" cambios, de tal manera que la confiabilidad del mapa de cambio puede reducirse de manera considerable (Figura 2). El mapa de cambio producido con base en dos mapas con una confiabilidad de 80% presenta una confiabilidad aproximada de 64% (0.8×0.8 ; Singh, 1989). Los errores de orden geométrico, como la precisión de la localización del límite entre dos coberturas, pueden también generar una gran cantidad de errores (Figura 3). Es notable que estos errores no afectan de igual manera los diferentes tipos de datos sobre cambio. Por ejemplo, los desfases que se presentan en la Figura 3, generan una gran cantidad de falsos cambios que se reflejan en el mapa y en la matriz de cambio, pero no cambian de manera importante las superficies y las tasas

de cambio, ya que la superficie total de los diferentes tipos de cobertura no está muy afectada por los desfases. En cambio, el error de atributo en la Figura 2 genera un falso cambio que se refleja en el mapa y la matriz de cambio y conduce a sobreestimar la pérdida de la cobertura 3 y produce un falso incremento de la cobertura 2. Estos errores están relacionados con las principales características de los mapas involucrados en la comparación como la escala, el sistema clasificatorio, la fecha de elaboración, los métodos e insumos utilizados, así como su calidad (confiabilidad temática y precisión geométrica).

El objetivo de este trabajo es evaluar y cuantificar los errores relacionados con el análisis del cambio de cobertura por comparación de mapas. Se evaluaron los errores generados al comparar fuentes cartográficas: a) representadas en dos escalas distintas, b) obtenidas por procesos de digitalización independientes, c) elaboradas con base en sistemas clasificatorios diferentes y, d) obtenidas a partir de insumos de varias fechas.



Figura 2. Error en el mapa de cambio debido a un error de atributo. En la fecha 2, se identificó erróneamente una cobertura 3 como 2, generando un falso cambio 3 a 2.

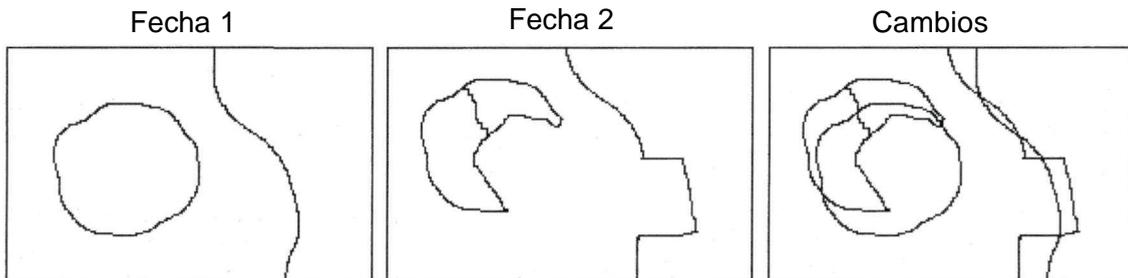


Figura 3. Falsos cambios generados por problemas de índole geométrica en los mapas insumos. Desfases en el mapa de la fecha 2 producen una gran cantidad de falsos cambios en el mapa de cambios que ocultan los cambios reales.

ZONA EN ESTUDIO

El área en estudio se ubica entre las coordenadas 104° 0'0" y 100° 0' longitud oeste y 18°41'0" y 21°0'0" latitud norte. Corresponde a seis hojas escala 1:250 000 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI; F13-12, F14-10, E13-3, E14-1, E13-6-9 y E14-4), las cuales cubren totalmente el estado de Michoacán y, parcialmente, los estados limítrofes de Jalisco, Colima, Estado de México, Guanajuato, Querétaro y Guerrero (Figura 4). La zona de estudio cuenta con una gran variedad de tipos de vegetación que van desde los bosques de pino, encino, pino-encino y oyamel en las zonas templadas hasta las selvas bajas caducifolias en las zonas calidosecas. La vegetación transformada in-

cluye pastizales inducidos, pastizales cultivados, matorral secundario y bosque cultivado. El estado de Michoacán presenta una de las tasas de deforestación más altas a nivel nacional (Bocco *et al.*, 2001).

MATERIALES Y METODOS

Se utilizó la cartografía de uso de suelo y vegetación del INEGI, escala 1:250 000 y 1:1 000 000 y la del Inventario Nacional Forestal de 1994 (INF 1994) y el Inventario Forestal Nacional 2000 (IFN 2000; escala 1:250 000). La cartografía a escala 1:250 000 del INEGI tiene como mínimo cartografiable 250 000 m², mientras los mapas a escala 1:1 000 000 tienen un mínimo de 4 000 000 m² (2 mm x 2 mm en el mapa en ambos casos) y presentan

una delimitación de las coberturas más general. La cartografía de uso del suelo y vegetación de INEGI corresponde a la serie I, que se elaboró en el final de la década de los años setenta y en los ochenta con base en fotografías aéreas y la Serie II, que es la actualización de la información anterior por interpretación de imágenes de satélite. Se unieron las seis hojas escala 1:250 000 para generar el mapa de la zona en estudio.

Comparación de cartografía representada en escala diferente

Para evaluar los errores generados al utilizar escalas diferentes, se comparó la misma cartografía en escala 1:250 000 y 1:1 000 000. Para ello, se reagruparon las

375 clases de la cartografía 1:250 000 en 27 categorías consideradas en los mapas escala 1:1 000 000. Se realizó la superposición de ambos mapas para generar un mapa de cambio, en el cual todos los cambios se atribuyeron a errores inherentes a la diferencia de escala. Para evaluar si estos errores dependían de los patrones de distribución de las coberturas del suelo, se comparó, para cada clase, la tasa de cambio con índices de fragmentación, como la superficie promedio de los polígonos, el cociente P_r / W_r e *Patch Analyst* (Elkie et al., 1999).

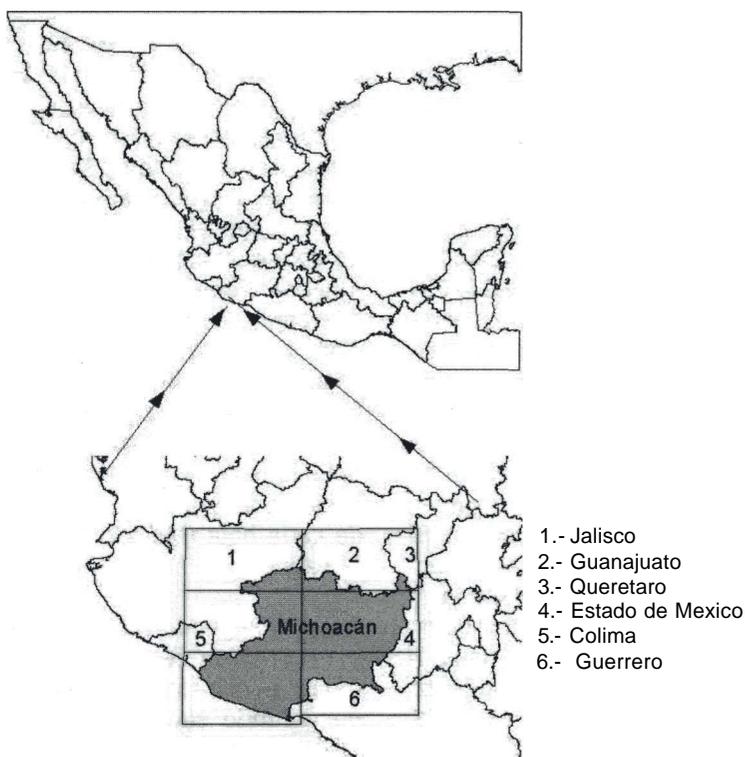


Figura 4. Ubicación de la zona en estudio.

Evaluación de los errores inherentes a la elaboración de los mapas digitales

Al comparar dos mapas temáticos para la detección de cambios, se generan falsos cambios resultantes de las diferencias en la delimitación de los polígonos y de los errores de atributo. Para evaluar dichos errores se compararon dos versiones digitales de la misma cartografía obtenidas por dos procesos de digitalización, uno realizado por una empresa para el Instituto Nacional de Ecología (INE) y el otro elaborada por el Instituto de Geografía de la UNAM. Se considero que todas las diferencias se debían a errores en el proceso de digitalización.

Comparación de mapas basados en sistemas clasificatorios diferentes

Para evaluar los errores inherentes a la comparación de cartografías elaboradas con base en sistemas de clasificación diferentes, se compararon los mapas de uso del suelo y vegetación Serie II de INEGI (INEGI, 1980), adaptados al sistema clasificatorio del Inventario Forestal Nacional 2000 (IFN 2000; Palacio *et al.*, 2000; Mas *et al.*, 2002) y los del Inventario Nacional Forestal 1994 (INF 1994). Ambas cartografías se generaron con imágenes de satélite de fechas cercanas, pero con base en sistemas clasificatorios diferentes. La cartografía del INF 1994 es una cartografía híbrida en la cual se conjunta información actualizada a 1993, con base en la interpretación visual de imágenes de satélite e información de INEGI Serie I. El sistema clasificatorio de la información actualizada se deriva de FAO y contempla, a diferencia del INEGI, conceptos tales como cobertura cerrada, abierta, fragmentada y perturbada (SARH, 1994; Sorani y Alvarez, 1996). El sistema clasificatorio de la cartografía del IFN 2000 se deriva de la clasificación del INEGI por agrupación de categorías con base en criterios ecológicos y espectrales (Palacio *et al.*, 2000; Velazquez *et al.*, 2001 y 2002; Mas *et al.*, 2002 y 2003).

Problemas relacionados con las fechas de los insumos

La cartografía de la Serie I del INEGI se elaboro con base en fotografías aéreas tomadas entre el final de la década de los años sesenta y mediados de los ochenta, por lo que las hojas presentan fechas diferentes. Por ejemplo, dentro de la zona de estudio, las fechas de las hojas fluctúan entre 1971 y 1984. La estimación de las tasas de cambio depende directamente del periodo considerado, si se toman en cuenta fechas que no corresponden a la fecha real de la información, se introduce un error en la estimación de las mismas. Para mayor claridad, se asume que el mapa de la zona de estudio esta conformado por varias hojas y se examinan diferentes opciones para calcular las tasas de cambio con base en un mapa donde las diferentes hojas que lo componen no tienen la misma fecha. Se puede calcular el promedio de las fechas de las hojas y considerar dicho promedio como la fecha del mapa para la estimación de las tasas de cambio. Sin embargo, este método opera bajo el supuesto de que los tipos de cobertura considerados se distribuyen de manera homogénea en las hojas de las diferentes fechas. Si cierto tipo de cubierta esta principalmente representado en una hoja, es mas conveniente tomar en cuenta la fecha de esta hoja y no el promedio. En este estudio, se compararon las tasas de cambio obtenidas considerando una fecha promedio (Método 1) y tomando en cuenta las fechas de cada hoja (Método 2 en la Figura 5 y en la Tabla 2).

En este segundo método, la tasa de cambio para el mapa se obtiene calculando el promedio de las tasas de cambio en cada hoja, ponderando cada tasa por la superficie de la cobertura en cada una de las hojas. La tabla que se presenta a continuación indica las superficies y los periodos que se toman en cuenta para el cálculo de las tasas de cambio con la ecuación (1).

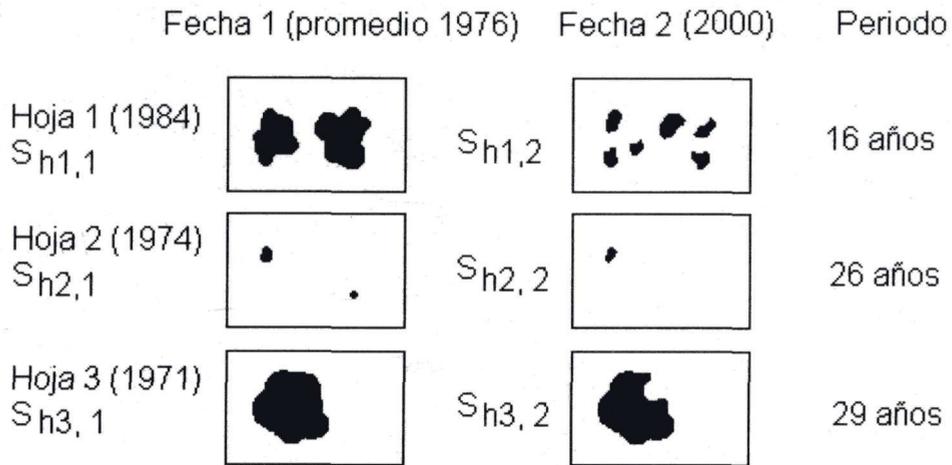


Figura 5. Cálculo de las tasas de cambio cuando la fecha de un insumo es variable. S_{nij} es la superficie de la cobertura en la hoja i y en la fecha j .

Tabla 2. Cálculo de las tasas de cambio cuando un mapa no presenta una fecha única

	S_1	S_2	Número de años (n)	Tasa de cambio
Método 1	$S_{h1,1} + S_{h2,1} + S_{h3,1}$	$S_{h1,2} + S_{h2,2} + S_{h3,2}$	24 años	Tas general del mapa t_{mapa}
Método 2				
Hoja 1	$S_{h1,1}$	$S_{h1,2}$	16	t_{h1}
Hoja 2	$S_{h2,1}$	$S_{h2,2}$	26	t_{h2}
Hoja 3	$S_{h3,1}$	$S_{h3,2}$	29	t_{h3}

En el método 2, la tasa de cambio de todo el mapa, t_{mapa} se obtiene a través de un coeficiente de ponderación (ecuaciones 2 y 3) que permite dar mas peso a las hojas que presentan mas superficie inicial de la cobertura de suelo considerada en el cálculo del promedio de las tasas de cambio de cada hoja (ecuación 3).

$$K_{hi} = S_{hi}/S_{mapa} \quad (2)$$

donde K_{hi} es el coeficiente de ponderación para la hoja i ,
 S_{hi} es la superficie de la cobertura de suelo considerada en la hoja i y,
 S_{mapa} es la superficie de la misma cobertura en el mapa.

$$t_{\text{mapa}} = \sum K_{hi} t_{hi} \quad (3)$$

donde t_{mapa} es la tasa de cambio correspondiente al mapa,
 K_{hi} es el coeficiente de ponderación de la hoja i ,
 t_{hi} es la tasa de cambio correspondiendo a la hoja i .

RESULTADOS

Comparación de mapas a escalas diferentes

Se generó un mapa de cambio con base en la comparación de la misma cartografía de uso del suelo y vegetación a escala 1:250 000 y 1:1 000 000. Las diferencias más notables entre ambas escalas fueron la delimitación de los polígonos inherentes a los procesos realizados para obtener la cartografía a un millón, y la eliminación de polígonos pequeños en el mapa al 1:1 000 000 (Figura 6).

Estas diferencias generaron falsos cambios que representan cerca de 12% de la super-

ficie total (Figura 7). Se evaluaron estos falsos cambios para las diferentes categorías examinando la coincidencia espacial (CE) entre la extensión de la cobertura a las dos escalas y la variación de la superficie total de cada categoría en las dos fuentes cartográficas. Algunas clases, como el chaparral y el matorral rosetófilo desaparecen totalmente en la cartografía a escala 1:1 000 000. De otras categorías, dos coinciden en menos de 50% entre las dos escalas. Solamente tres clases (de un total de 27) coinciden en más de 90%. En cuanto a la superficie total, que afecta el cálculo de la tasa de cambio, se observan también variaciones importantes entre las dos escalas (Tabla 3). Para once categorías la variación de superficie, debido a la diferencia de escala, rebasa 10% de la superficie de la escala 1:250 000. De acuerdo con la ecuación 1, un cambio de 10% de la superficie corresponde a una tasa de cambio de 0.7% por año durante 15 años. En otras palabras, los errores introducidos por el cambio de escala son de la misma amplitud o inclusive más importantes que los cambios observados en el país durante más de una década.

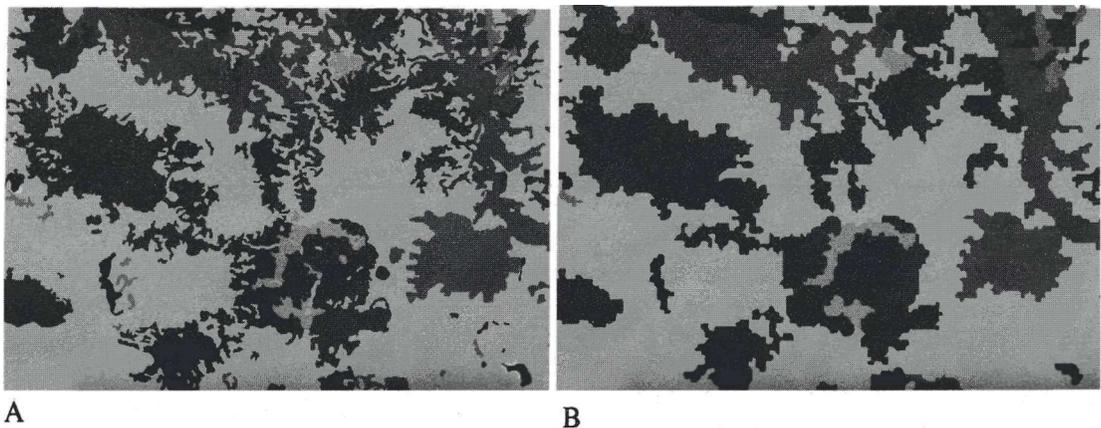


Figura 6. Cartografía a escala 1:250 000 (a) y 1:1 000 000 (b).

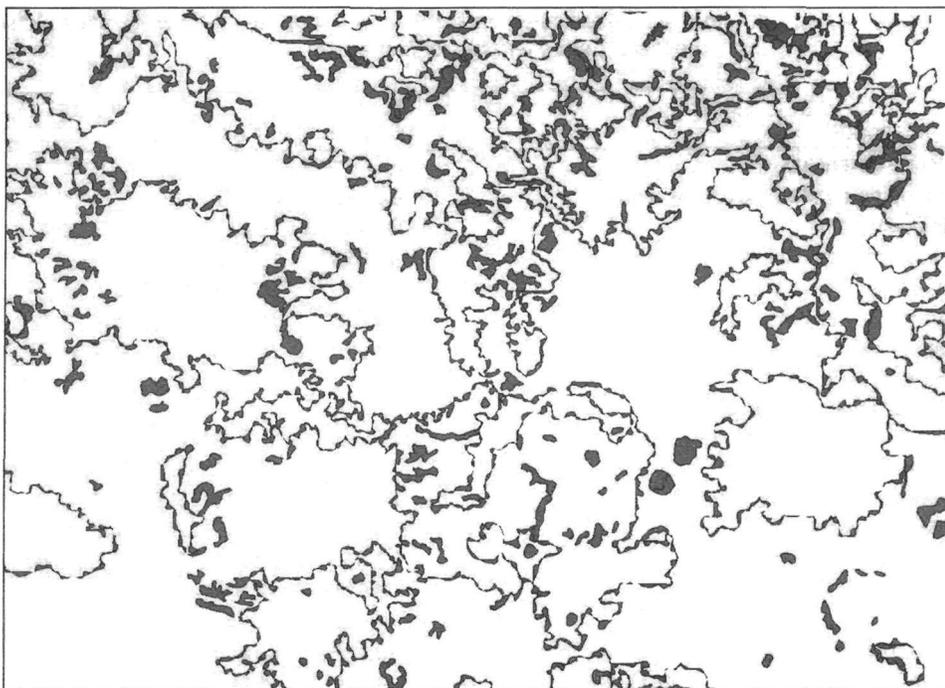


Figura 7. Mapa de (falsos) cambios resultado de la diferencia de escala.

Se calculó el coeficiente de correlación de Spearman entre la amplitud de estos errores y las características espaciales de cada cobertura (Tabla 3). La superficie total de la cobertura y la superficie promedio de los polígonos (SPP) de cada clase presentan una correlación negativa ($r_s = -0.765$ y $r_s = -0.764$, respectivamente) con la variación de superficie total (VarS) entre las dos escalas y una correlación positiva ($r_s = 0.849$ y $r_s = 0.856$) con la coincidencia espacial (CE). El cociente perímetro/superficie (CPS) presenta valores de correlación de 0.335 y -0.299 con la variación de superficie y la coincidencia espacial respectivamente; por lo tanto, las coberturas menos afectadas son las que presentan polígonos grandes, ya que en general mantienen su forma y superficie sin cambiar significativamente al cambiar la escala. Las clases con polígonos más pequeños o más alargados son más afectados por estos errores.

Problemas debidos a la captura en formato digital

Se utilizaron dos versiones de la Serie I del INEGI. Esta cartografía fue digitalizada de las cartas originales de uso de suelo y vegetación, generando errores de índole geométrica y temática. Los primeros se refieren a polígonos cuyos límites no son exactamente iguales a la carta original (error de localización). El segundo error se refiere al atributo (etiqueta) con el que está identificado el polígono. Estos errores se originan al interpretar las cartas, ya que la similitud de los colores, las pantallas y las claves, puede crear confusión. Generalmente, los errores geométricos generan áreas pequeñas de falsos cambios y de forma alargada que siguen el contorno de los polígonos, mientras que los errores de atributo corresponden a todo el polígono.

Tabla 3. Superficies, características espaciales y discrepancias en la representación espacial según la escala para diferentes cubiertas del suelo

Categorías	S(ha) 1,000,000	S(ha) 250,000	SPP (ha)	CPS	CE (%)	VarS (%)
Bosque de encino	1,411,411	1,460,587	757	39.8	82.4	3.4
Bosque de coníferas distintas a pinus	34,290	33,097	1951	24.9	88.0	3.6
Bosque de pino	1,785,415	1,716,847	1723	32.3	92.1	4.0
Bosque mesófilo de montaña	19,053	20,878	773	30.2	74.1	8.7
Chaparral		143	143	34.1	0.0	100.0
Mezquital-Huizachal	6,983	15,321	247	41.3	38.9	54.4
Matorral sarcocrasicaule	62,980	74,899	512	34.2	70.1	15.9
Matorral rosetofoilo		182	183	38.8	0.0	100.0
Matorral espinoso tamaulipeco, submontano y subtropical	829,769	855,289	1041	33.7	81.0	3.0
Palmar	2,778	3,671	524	31.8	56.7	24.3
Vegetación halófila y gipsófila	22,627	26,910	626	41.6	70.0	15.9
Pastizal natural	219,198	207,012	2203	37.3	87.8	5.9
Sabana	24,050	24,571	1365	25.7	79.6	2.1
Popal y tular	8,071	11,700	344	49.5	58.6	31.0
Manglar	2,751	3,133	540	33.4	74.4	12.2
Selva mediana subcaducifolia y caducifolia	240,669	243,464	899	33.0	84.5	1.1
Selva baja perennifolia, subperennifolia y espinosa	8,097	10,694	535	40.1	65.5	24.3
Selva baja caducifolia y subcaducifolia	3,123,177	2,934,758	1714	34.2	93.5	6.4
Vegetación de galería	6,192	12,163	762	44.1	34.9	49.1
Manejo agrícola, pecuario y forestal (plantaciones)	5,317,578	5,461,060	754	46.6	87.3	2.6
Zonas urbanas	25,390	29,569	986	28.8	79.1	14.1
Cuerpos de agua	225,696	230,225	3437	38.7	91.4	2.0

S: superficie total de la categoría, SPP: Superficie promedio del polígono, CPS: Cociente perímetro / superficie, CE : Coincidencia espacial, VarS: Variación de la superficie total entre escalas.

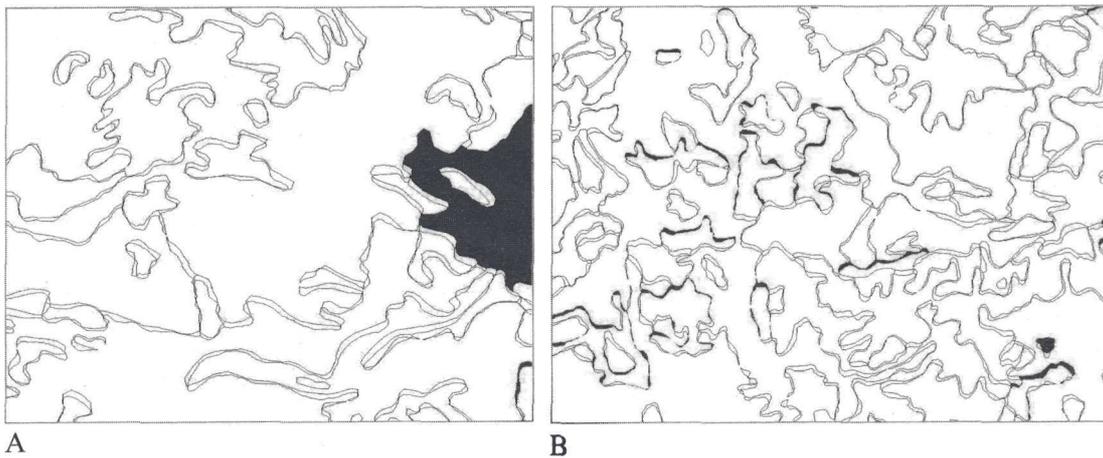


Figura 8. Falsos cambios debido a errores temáticos (a) y geométricos (b).

En la Figura 8 se representan las inconsistencias en el mapa de cambio generadas por errores temáticos (a) y geométricos (b).

Los errores geométricos y temáticos representaron en su conjunto casi 10% de la superficie total del área en estudio. La coincidencia espacial es superior a 85% para 80% de las categorías, y a 70% para 91% de las coberturas. Con base en el índice de forma y del área de los polígonos de cambio, y de un examen visual de la imagen de cambios, se separaron ambos errores. Los errores geométricos y temáticos representan respectivamente 86.5% y 13.5% del error total. Los errores geométricos están relacionados con los patrones de distribución de la cobertura. La proporción de la superficie de cada cobertura afectada por los errores geométricos presenta una correlación significativa con la superficie de la cobertura ($r_s = -0.471$), la superficie promedio de los polígonos ($\bar{s} = -0.731$), el cociente perímetro/superficie ($r_s = 0.326$). Por tanto, los errores geométricos que están relacionados con el perímetro de los polígonos afectan más a las categorías de superficie reducida, con polígonos más pequeños y más alargados o de forma más compleja. En cambio, los errores temáticos no presentan ninguna correlación con las características espaciales de las coberturas y corresponden a categorías cuya representación en el mapa se puede prestar a confusión. Estos errores afectan la matriz de confusión y la representación espacial de los cambios, que tienden a ser sobreestimados. Sin embargo, los errores geométricos tienden a compensarse, de manera que las estadísticas de superficie presentan variaciones moderadas entre las dos versiones digitales. Para 65% de las categorías, estas variaciones son inferiores a 5%, para 80% están por debajo de 10%. El porcentaje de error presenta una correlación significativa con la superficie de la categoría ($r_s = -0.548$), la superficie promedio de los polígonos ($r_s = -0.398$), pero no con el cociente perímetro/superficie ($\bar{s} = 0.113$). Son, en

consecuencia, errores menos importantes que en el caso de la comparación de dos escalas diferentes, sobre todo si se toma en cuenta que en esta comparación se consideran categorías en un nivel más detallado que en la comparación de escalas. Sin embargo, para algunas categorías los errores tienen una amplitud similar o superior a los cambios reales que se observan en el territorio.

Comparación de cartografía con diferentes sistemas clasificatorios

Se cruzaron los mapas de uso del suelo serie II (1993) y los del inventario nacional forestal (INF) de 1994 para generar una matriz de cambio. La Tabla 4 muestra a que clases de la cartografía de la serie II corresponden algunas clases del INF 1994. En esta matriz de confusión se observa que algunas clases, equivalentes en ambos sistemas clasificatorios, como la agricultura de riego, tienen una alta coincidencia en las dos cartografías. Sin embargo, generalmente hay muy poca coincidencia entre ambas cartografías. Las incongruencias se deben, en parte, a diferencias en la delimitación de los polígonos y en la interpretación de las imágenes. Las categorías que presentan mayor confusión son aquellas que en el INF 1994 fueron caracterizadas como cerradas, abiertas o fragmentadas y no tienen equivalencias perfectamente transparentes en el sistema de clasificación de la serie II. Todos estos elementos vuelven imposible interpretar una matriz de cambio basada en sistemas de clasificación diferentes.

Problemas relacionados con la fecha de los insumos

Se analizaron los procesos de cambio entre la Serie I y el INF 2000, únicamente con base en tres hojas, para las cuales se contaba con las fechas de toma de las fotografías aéreas en las cuales se elaboraron. Las fechas de las tres hojas son 1971, 1974

y 1984, asignando una fecha promedio para la información de la serie I de 1976. Se calculó la tasa de cambio para algunas coberturas del suelo con los dos métodos descritos anteriormente. Los resultados se presentan en las Tablas 5 y 6. Para la zona en estudio, no se encontraron diferencias importantes entre las tasas de cambio derivadas de los dos métodos, excepto para las zonas urbanas.

Tabla 4. Matriz de cambio entre la cartografía del INEGI-serie II y del INF 1994. La matriz de cambio está representada parcialmente

		INEGI Serie II																	
INF 1994		A.R.	A.T.	A.P.	Qa	Qc	Pa	Pc	PQa	PQc	B.F.	M.S.	Pz	S.A.M.	S.B.	S.F.	Z.U.	Otros	Total
Agricultura de riego		74.5	12.7	4.4	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.1	1.1	3.3	0.0	1.3	0.3	0.0	1.5	100.0
Agricultura de temporal		2.9	64.3	9.2	0.8	0.2	0.1	0.5	1.5	1.7	2.6	3.4	6.2	0.1	2.4	2.4	0.0	1.5	100.0
Asentamiento humano		23.0	38.6	4.4	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	0.1	0.1	1.8	7.3	0.0	0.7	0.1	21.9	1.3	100.0
Bosque de encino		0.2	3.0	25.3	18.1	9.5	0.5	0.3	3.8	5.7	13.4	1.8	4.8	0.4	5.5	7.4	0.0	0.4	100.0
Bosque de pino		0.1	1.5	9.0	0.8	0.5	7.7	15.4	7.8	40.8	7.6	0.1	0.2	1.4	4.4	1.2	0.0	1.5	100.0

A.R.: agricultura de riego, A.T.: agricultura de temporal, A.P.: área perturbada, Qa: bosque de encino abierto, Qc: bosque de encino cerrado, Pa: bosque de pino abierto, Pc: bosque de pino cerrado, PQa: bosque de pino/encino abierto, PQc: bosque de pino/encino cerrado, B.F.: bosque fragmentado, M.S. Matorral subtropical, Pz: Pastizal, S.A.M.: Selva alta y mediana, S.B.: selva baja, S.F.: selva fragmentada, Z.U.: zona urbana, Otros: otras categorías.

Tabla 5. Cálculo de las tasas de cambio para los cultivos

	Sup. Serie I (ha)	Sup. INF 2000 (ha)	Tasa de cambio (%/año)
Método 1	1879676	2267980	0.80
Método 2			
CARTA			Tasa de cambio por hoja
Hoja F13_12 (1984)	932890	1033179	0.64
Hoja E14_1 (1974)	695431	816160	0.62
Hoja E14_4 (1971)	251355	418641	1.77
Mapa			(promedio ponderado) 0.78

Tabla 6. Tasas de cambio derivadas de los dos métodos. Las tasas de cambio se expresan en %/año

Clase	Método 1	Método 2
Cultivos	-0.80	-0.78
Bosque	0.55	0.57
Selvas	0.82	0.79
Zonas urbanas	-6.23	-8.00

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

En este estudio se evaluaron los errores que se producen cuando se generan mapas y matrices de cambio y se calculan tasas de conversión con base en la comparación de mapas. La comparación de mapas representados en escalas diferentes afecta de manera significativa la fiabilidad de la matriz y del mapa de cambio, así como la tasa de cambio, en particular para las categorías poco representadas o cuya distribución es más fragmentada. Sin embargo, es común encontrar reportes de cambio derivados de la comparación entre mapas de escalas muy distintas y los resultados deben tomarse con mucho cuidado. De la misma manera, la comparación entre mapas basados en sistemas de clasificación diferentes se vuelve muy difícil de interpretar. Aún cuando se utiliza el mismo sistema clasificatorio es importante asegurarse que la definición de las categorías y los criterios para cartografiarlas fueron los mismos. La comparación de mapas a escalas diferentes o basados en sistemas clasificatorios diferentes se debe por lo tanto evitar.

En este trabajo, sólo interesa en los errores geométricos y temáticos introducidos en la digitalización de la cartografía. Sin embargo, existen fuentes adicionales de error: los errores geométricos se deben también al mal registro de las imágenes o fotografías utilizadas para el mapeo. Durante la interpretación de las imágenes, la delimitación de ciertos tipos de cobertura puede también ser difícil y subjetiva. De la misma manera, los errores temáticos pueden resultar de una clasificación errónea de las imágenes. Estos errores pueden por lo tanto cobrar más importancia que en el presente estudio. Por ejemplo, el error temático que se midió fue únicamente el error introducido en la captura de la cartografía en formato digital y fue inferior a 1%, generando en el mapa de cambio un error de 1 a 2% aproximadamente. Sin embargo, los errores de clasificación son generalmente

más importantes y pueden ser más perjudiciales para la evaluación de los cambios, como se analiza más adelante.

En cuanto a los errores relacionados con la dificultad para asociar una fecha a un mapa, se observó que, en este caso, no afectaban mucho el cálculo de las tasas de cambio. Sin embargo, eso depende de la distribución de los tipos de cobertura en el mapa. Este problema resulta también en una cierta ambigüedad al interpretar el mapa y la matriz de cambio, ya que éstos representan juntos cambios que ocurrieron durante periodos diferentes.

Aún cuando se comparan mapas basados en el mismo sistema clasificatorio y a la misma escala, los datos sobre cambio pueden verse afectados por errores de tipo temático y geométrico. Existen diferentes estrategias para medir o aminorar estos errores.

Para evitar problemas de índole geométrica la FAO (FAO, 1996) desarrolló un método de interpretación interdependiente para generar los mapas involucrados en la comparación. El mapa de la fecha 1 se sobrepone sobre la imagen reciente, con el fin de modificarlo únicamente donde se presentan los cambios, evitando falsos cambios debidos a dos capturas diferentes de un mismo polígono sin cambio. En el caso de la comparación de dos mapas ya elaborados en forma independiente, este método no puede aplicarse.

Los errores temáticos pueden tener un grave efecto sobre la evaluación de cambios. Singh (1989) subraya que si el error es aleatoriamente distribuido en el mapa, la confiabilidad del mapa de cambio es igual al producto de las confiabilidades de los mapas involucrados. Informes recientes sobre la confiabilidad de cartografía derivada de imágenes de satélite revelan que, en muchos casos, la confusión entre categorías es grande y los valores de confiabilidad bajos. Por ejemplo, estudios recientes (Franklin *et al*, 2000; Zhu

et al., 2000) reportan confiabilidad entre 30 y 100%, según las clases en las cartografías de uso del suelo y vegetación derivadas del análisis de imágenes de satélite. La confiabilidad de un mapa de cambio derivado de dos mapas con una confiabilidad de 70% es solamente de 49%. Si el estudio de cambio involucra tres fechas, solamente 34% del mapa presenta la secuencia correcta de las coberturas. Es, por tanto, muy importante conocer la confiabilidad de los mapas utilizados en la comparación. Ya que las confusiones entre categorías se dan en general entre clases afines, estos errores desaparecen al manejar categorías más generales. Por ejemplo, las confusiones entre bosque de pino, de pino encino y de encino, se absorben al juntarlas en una sola clase "bosque templado". Es entonces preferible manejar categorías menos detalladas pero más confiables, para llevar a cabo un monitoreo de los cambios.

Recientemente, se desarrollaron algunos métodos para medir y aminorar los errores en los mapas de cambios. Pontius (2000 y 2002) desarrolló índices de confiabilidad enfocados a la medición de los errores geométricos y temáticos en la comparación de mapas. Aspinal y Person (1995) y Green y Hartley (2000) utilizan una banda alrededor de los límites de los polígonos (banda epsilon) para identificar los falsos cambios que resultan de los errores geométricos. Carmel et al. (2001) desarrollaron un modelo que estima el error en una base de datos multifecha resultante de los errores geométricos y temáticos. Para ello, simulaban el error geométrico y lo combinaron con el error temático para evaluar la confiabilidad de cada tipo de conversión que presenta el mapa de cambio. El modelo se desarrolló para clasificaciones digitales, pero podría adaptarse a la comparación de mapas vectoriales. Es necesario desarrollar modelos que permitan evaluar la confiabilidad de bases de datos multifecha derivadas de cartografía de uso del suelo y vegetación, como

aquéllas del INEGI o del Inventario Forestal Nacional. Estos modelos deben tomar en cuenta algunas características de estas cartografías, como el hecho de que son derivadas de interpretación visual y que se trata de actualizaciones de la cartografía previa, y que, en consecuencia, el error temático no es independiente entre las diferentes fechas.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se desarrolló en el ámbito del proyecto *Regionalización ecológica a nivel regional: Análisis del cambio de uso del suelo*, que se llevó a cabo en el Instituto de Geografía de la UNAM -Sede Morelia, con el financiamiento y la colaboración del Instituto Nacional de Ecología (INE).

Los autores agradecen al Dr. Gerardo Boceo y a los dos dictaminadores encargados de la revisión de este artículo por sus comentarios.

REFERENCIAS

- Aspinal, R. J. y D. M. Pearson (1995), "Describing and managing uncertainty of categorical maps in GIS", in Fisher, P., *Innovations in Gis 2*, Ed. Taylor & Francis, Londres, U.K., pp. 71-83.
- Blakemore, M. (1984), "Generalization and error in spatial databases", *Cartographica* (21), pp. 131-139.
- Boceo, G., M. Mendoza y O. Masera (2001), "La dinámica del cambio del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para los estudios de deforestación", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 44, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 18-38.
- Carmel, Y., D. J. Dean y C. H. Flather (2001), "Combining location and classification error sources for estimating multi-temporal database accuracy", vol. 67(7), *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, pp. 865-872.
- Elkie, P. C., R. S. Rempel y A. P. Carr (1999), *Patch Analyst User's Manual, A Tool for Quantifying Landscape Structure*, Ont. Min. Natur. Resour. Northwest Sci. & Technol. Thunder Bay, Ont. TM-002, Canadá. Disponible en: <http://flash.lakeheadu.ca/~rrempe/patch/>.

- FAO (Food and Agriculture Organization; 1995), *Evaluation des ressources forestières 1990, pays tropicaux*, Etude FAO Forêts 112.
- FAO (Food and Agriculture Organization; 1996), *Forest resources assessment 1990, Survey of tropical forest cover and study of change processes*, FAO Forestry Paper 130.
- Franklin, J., C. E. Woodcock y R. Warbington (2000), "Multi-attribute vegetation maps of forest service lands in California supporting resource management decisions", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 66(10), pp. 1209-1218.
- Green, D. R. y S. Hartley (2000), "Integrating photointerpretation and GIS for vegetation mapping: some issues of error", in Alexander, R. and A. C. Millington. *Vegetation Mapping: from Patch to Planet*, John Wiley & Sons Ltd., pp. 103-134.
- INEGI (1980), *Sistema de Clasificación de tipos de agricultura y tipos de vegetación de México para la Carta de Uso del Suelo y Vegetación del INEGI*, escala 1:250 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes, México.
- Lambin, E. F., B. L. Turner, J. Helmut, S. B. Geist et al. (2001), "The causes of land-use and land-cover change. moving beyond the myths", *Global Environmental Change* 11, pp. 261-269.
- Mas, J. F., J. L. Palacio-Prieto, A. Velásquez y J. Boceo (2001), "Evaluación de la confiabilidad temática de bases de datos cartográficas", *Memoria Digital CD interactivo, I Congreso Nacional de Geomática*, Guanajuato, 26-28/8/2001. Disponible en: <http://indy2.igeograf.unam.mx/dote/publicaciones.htm>
- Mas, J. F., A. Velásquez, J. L. Palacio-Prieto, J. Boceo, A. Peralta y J. Prado (2002). "Assessing forest resources in México: wall-to-wall land use/cover mapping", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 68, no. 10, pp. 966-968. Disponible en: <http://asprs.org/asprs/publications/pe&rs/2002journal/october/highlight.html>.
- Mas, J. F., A. Velásquez, J. L. Palacio-Prieto y J. Boceo, (2003), "Cartographie et inventaire forestier au Mexique", *Bois et Forêts des Tropiques*, no. 275, pp. 5-15.
- Nascimento, R. J. (1991), "Discutendo números do desmatamento", *Interciencia*, vol. 16, núm. 5, pp. 232-239.
- Palacio-Prieto, J. L., G. Boceo, A. Velásquez, J. F. Mas et al. (2000), "La condición actual de los recursos forestales en México resultados del inventario forestal nacional 2000". *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 43, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 183-203. Disponible en: <http://indy2.igeograf.unam.mx/dote/publicaciones.htm>.
- Pontius, R. G. (2000), "Quantification error versus location error in comparison of categorical maps", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 66(8), pp. 1011-1016.
- Pontius R. G. (2002), "Statistical methods to partition effects of quantity and location during comparison of categorical maps and multiple resolutions", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 68(10), pp. 1041-1049.
- Revel-Mouroz, J. (1980) *Aprovechamiento y colonización del trópico húmedo mexicano. La vertiente del golfo y del caribe*, Fondo de Cultura Económica, México.
- SARH (1994), *Inventario Nacional Forestal Periódico. Memoria Nacional*, Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre, SARH, México.
- Singh, A. (1989), "Digital change detection techniques using remotely-sensed data", *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), pp. 989-1003.
- Sorani, V. y R. Álvarez (1996), "Hybrids maps a solution for updating of forest cartography with satellite images and existing information", *Geocarto International* 11(4), pp. 17-23.
- Turner, B. L. y W. B. Meyer (1994), "Global land-use and land-cover changes: an overview," in Meyer, W. B. y B. L. Turner II (eds), *Changes in Land-Use and Land-Cover: a Global Perspective*, University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Velásquez, A., J. F. Mas, J. R. Díaz et al. (2002), "Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México", *Gaceta ecológica, INESEMARNAT*, núm. 62, pp. 21-37. Disponible en: <http://www-ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/>
- Velásquez, A., J. F. Mas, R. Mayorga-Saucedo et al. (2001), "El Inventario Forestal Nacional 2000: Potencial de Uso y Alcances", *Ciencias*, núm. 64, pp. 13-19.
- Zhu, Z., L. Yang, S.V. Stehman y R. L. Czaplewski (2000), "Accuracy assessment for the U.S. Geological Survey Regional Land-Cover Mapping Program: New York and New Jersey Region", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 66(12), pp. 1425-1438.