Con el apoyo de la Alianza

Análisis regional y comparación metodológica del cambio en la cubierta forestal en la Región Mariposa Monarca

Informe Técnico Final

Convenio KE31

Preparado por:
Ma. Isabel Ramírez y Raúl Zubieta

Colaboradoras:
Laura Luna y Celia López

Instituto de Geografía, UNAM
Circuito Exterior s/n. Ciudad Universitaria
04510, Coyoacán, México, D.F.
Tel: 5622-4335 ext. 45459
e-mail: isabelrr@correo.unam.mx

Septiembre, 2005

Para citar este reporte:

Ramírez, M.I. y R. Zubieta. 2005. Análisis regional y comparación metodológica del cambio en la cubierta forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Reporte Técnico preparado para el Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca. México D.F. Septiembre 2005.

AGRADECIMIENTOS:

Agradecemos al Biól. Javier Medina, de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, por proporcionarnos la imagen SPOT de 2004. A todo el equipo de WWF-México por apoyar este proyecto; en especial a Carlos Galindo, Juan Antonio Reyes y Jordi Honey-Roses, por sus acertados comentarios desde la planeación del proyecto hasta la versión final del mismo.

ESTE PROYECTO SE REALIZÓ GRACIAS AL FONDO PARA LA CONSERVACIÓN DE LA MARIPOSA MONARCA Y LA ALIANZA WWF-Telcel

Resumen ejecutivo

A pesar de los tres decretos de protección que se han emitido para proteger a la mariposa monarca y su hábitat de hibernación en México, la perturbación y pérdida de los bosques que le sirven de refugio invernal no se ha frenado. Hasta antes del último decreto, de noviembre de 2000, se habían hecho estimaciones de las tasas de dicha perturbación de la cubierta forestal que, según los autores, iban desde 1.3 hasta 2.4% de promedio anual. Esos trabajos demuestran claramente la ineficiencia de los dos primero decretos para frenar el problema, aunque ninguno de ellos incluía la totalidad de la actual reserva.

Por ello, los objetivos del presente trabajo son: 1) identificar los cambios en la cubierta vegetal de la totalidad de la Reserva y su área de influencia antes y después del decreto del 2000; y, 2) comparar los métodos aplicados para la identificación de la pérdida del arbolado en el contexto del Fondo Monarca con otros propuestos para este trabajo, evaluando sus ventajas y desventajas en relación con su resolución espacial, precisión cartográfica y exactitud temática, así como el tiempo y costo para la obtención de resultados.

Respecto al primer objetivo encontramos una elevada perturbación del bosque (pérdida del arbolado sin cambio en el uso del suelo) en toda el área de estudio. La cual es mayor dentro de los límites de la Reserva y más aguda a partir del decreto del 2000. En un balance general, en el área núcleo se perdieron 641 hectáreas de bosques de 1993 a 2000, lo que representa una tasa de 0.8% anual, y 414 hectáreas de 2000 a 2003 (1.2%). En el área de amortiguamiento dicha pérdida fue de 494 hectáreas en el primer periodo y de 1,069 en el segundo, significando tasas de 0.2 y 1.2, respectivamente. Mientras que en la zona de influencia las tasas de deforestación fueron mucho menores, de 0.04 y 0.6% anual. Haciendo los cálculos por tipo de proceso y su análisis espacial esta situación de pérdida del arbolado se aprecia aún más grave.

En cuanto al segundo objetivo, los resultados muestran que la detección del cambio mediante interpretación visual ofrece una mayor exactitud global. No obstante, este método requiere una gran inversión de horas hombre, por lo se vuelve también el más caro en términos económicos. Así mismo, encontramos que los insumos de alta resolución (imágenes Ikonos y Spot 5) permiten una buena identificación temática en clasificaciones automatizadas, pero su precisión cartográfica limita considerablemente la confiabilidad de sus resultados. Por su parte, los mosaicos-FAD, sin son armados en un programa propio para ello, son buenos para el análisis visual pero no funcionan para clasificaciones digitales. Por último, las imágenes Landsat ofrecen buena exactitud cartográfica, pero debido a su resolución no permiten observar pequeños cambios de un año a otro, tanto por métodos visuales como digitales.

De tal forma, para el monitoreo del Fondo Monarca proponemos un método mixto, donde un intérprete experimentado combine las ventajas de la interpretación visual con las de las imágenes espectrales. Considerando su resolución de (10 metros), su cobertura de escena (60x60 km), su precio (3600 EUR por escena) y su disponibilidad (de 2002 a la fecha), las imágenes Spot podrían ser una buena opción. Si se requiere más detalle de observación (no de precisión) conviene seguir haciendo los vuelos aéreos, ya sea como complemento a las imágenes de satélite, o para la realización del mosaico. Pero, en cualquier caso, sugerimos revisar cuidadosamente la clasificación para que pueda ser replicable por diferentes personas o con los insumos disponibles.

CONTENIDO:

Parte 1. Análisis regional del cambio en la cubierta forestal ***5***

1. Introducción **5**

2. Objetivos **6**

3. Área de estudio **6**

4. Materiales y métodos **7**
4.1 Materiales 7
4.2 Interpretación visual interdependiente 7
4.3 Detección del cambio 8
4.4 Tasas de cambio 11

5. Resultados **11**
5.1 Cubiertas del suelo 11
5.2 Procesos de cambio 14
5.3 Tasas de cambio 21

6. Literatura citada **24**

Parte 2. Comparación metodológica del cambio en la cubierta forestal ***26***

1. Introducción **26**

2. Objetivos **26**

3. Área de estudio **26**

4. Materiales y métodos **27**
4.1 Materiales 27
4.2 Métodos 28
4.2.2 *Corrección geométrica* 30
4.2.3 *Interpretación visual en pantalla* 30
4.2.4 *Índice de vegetación* 31
4.2.5 *Clasificación digital no supervisada* 31
4.2.6 *Detección del cambio* 32
4.2.7 *Verificación de campo* 32
4.2.8 *Evaluación de los resultados* 32

5. Resultados **33**
5.1 Cubiertas del suelo 33
5.2 Detección del cambio 35
5.2.1 *Cambios 2001-2003* 35
5.2.2 *Cambios 2003-2004* 35
5.3 Evaluación de la confiabilidad 38
5.3.1 *Corrección geométrica* 38
5.3.2 *Exactitud temática* 39
5.4 Costos 41
5.4.1 *Tiempo de obtención de resultados* 41
5.4.2 *Precio de los insumos* 42

6. Discusión **43**
6.1 Los métodos aplicados 43
6.2.1 *Interpretación visual* 43
6.2.2 *Clasificación no supervisada* 44
6.2 Detección del cambio 45
6.3 Evaluación de la exactitud 46
6.4 Resumen: tablas comparativas 47

7. Literatura citada **52**

Parte 1

Análisis regional del cambio en la cubierta forestal

1. Introducción

Uno de los principales problemas ambientales de México es la deforestación, que ha llegado a alcanzar hasta 1.5 millones de hectáreas por año (Velázquez et al. 2001). Esta pérdida de bosques se presenta incluso dentro de áreas naturales protegidas (ANP) (Ramírez, 2001). En este sentido, se ha discutido la efectividad de los decretos de protección oficial en la conservación, y mientras algunos opinan que pueden representar estrategias exitosas para evitar la pérdida de bosques (Bruner et al., 2001), otros autores consideran que las amenazas pueden incrementarse después de dichos decretos (Liu et al. 2001).

En el caso del hábitat de invernación de la Mariposa Monarca, se han emitido tres decretos para protegerlo, en 1980, 1986 y 2000. Esto ha traído cambios en la figura de protección y en la delimitación, hasta reconocerse actualmente como Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) con una superficie de 56,259 hectáreas. Sin embargo, al parecer, los decretos de protección han agudizado diversos problemas, como elevadas tasas de deforestación y degradación, conflictos en el uso del suelo y tenencia de la tierra (Hoth, 1995).

Así, Brower et al. (2002) y Ramírez et al. (2003) señalan que después del decreto de 1986 la degradación del bosque se aceleró, especialmente después de 1992. Los primeros, considerando un rectángulo que incluía parte de la Sierra, su piedemonte y algo de planicies, reportaron una tasa anual de degradación (perturbación o pérdida) de 1.70% entre 1971 y 1984, la cual se incrementó a 2.41% entre 1984 y 1999. Considerando exclusivamente el conjunto montañoso (laderas con pendientes mayores de 15º y valles intermontanos), Ramírez et al. (2003) estimaron una tasa de perturbación promedio anual de 1.3% entre 1971 y 2000, más una tasa de deforestación de 0.1% para esas misma fechas. Estos autores muestran también áreas con recuperación de bosques perturbados y revegetación de áreas deforestadas, aunque con extensión mucho menor respecto a los procesos antes mencionados. Sin embargo en ninguno de esos trabajos se cubre por completo la superficie de la actual reserva. De tal forma, con el presente trabajo pretendemos identificar cuál fue la dinámica de cambio en los bosques de la RBMM 2000 antes de su decreto y cuál ha sido posterior a él. Asimismo, analizaremos su área cercana de influencia para detectar si hay más cambios dentro de los límites de protección o fuera de ellos.

Dada la superficie del área de interés, más de 3400 km^2, es recomendable realizar un estudio en escala media (1:50000 - 1:100000). Para este tipo de análisis muchos autores han recurrido al empleo de imágenes Landsat, que se han confirmado como una buena opción para estudios de caracterización, análisis y cuantificación de los cambios en la cubiertas vegetales de ecosistemas boscosos (Dirzo y García 1992, Mas y Ramírez 1996, Sánchez-Azofeifa et al. 1999, Álvarez et al. 2003, Novak y Wang 2004). Sus capacidades multiespectrales permiten la observación y medición de características biofísicas de los paisajes, mientras que las capacidades multitemporales permiten dar seguimiento al cambio de esas características en el tiempo (Novak y Wang 2004).

Otro instrumento frecuentemente utilizado para identificar tipos y procesos de usos y cubiertas del suelo son las fotografías aéreas (Blanco et al. 1996, Ramírez 2001, Song y Woodcock 2002, Brower et al. 2002, Ramírez et al. 2003).

Con base en estos dos tipos de materiales, en el presente estudio se han identificado los cambios que se han presentado sobre la cubierta vegetal de la actual RBMM y de su área de influencia antes y después del decreto del 2000. El primer periodo analizado es de marzo 1993 a enero 2000 y el segundo de enero 2000 a enero 2003.

2. Objetivos

Objetivo General:

- Identificar los cambios en la cubierta vegetal de la RBMM y su área cercana de influencia antes y después del 2000

Objetivos particulares:

- Cartografiar y cuantificar en escala media las cubiertas del suelo de la totalidad de la RBMM y su área de influencia antes y después del 2000
- Identificar espacialmente los procesos de pérdida y perturbación, así como de recuperación de la cubierta vegetal de la RBMM y su área de influencia de 1993 a 2000 y de 2000 a 2003
- Estimar tasas de deforestación, perturbación y recuperación de los bosques de la RBMM y su área de influencia antes y después del 2000

3. Área de estudio

El área de estudio comprende la totalidad de la RBMM, más el área incluida en rectángulo que la abarca junto con el conjunto de domos volcánicos forestados de su lado occidental. Se ubica entre las coordenadas 19º 17' - 20º 02' N y 100º 05' - 100º 29' W. La superficie total es de 343,192 hectáreas, 16% dentro del área protegida. Está distribuida en 20 municipios: Angangueo, Aporo, Contepec, Irimbo, Juárez, Jungapeo, Maravatio, Ocampo, Senguio, Susupuato, Tlalpujahua, Tuxpan y Zitácuaro, en el estado de Michoacán; y, Donato Guerra, Ixtapan del Oro, El Oro, San José del Rincón, Temascalcingo, Villa de Allende y Villa Victoria, en el Estado de México (Figura 1).

El área en estudio se encuentra enclavada en el Sistema Volcánico Transversal. Su rango altitudinal comprende desde los 1,700 hasta los 3,600 metros. Posee un clima predominante de tipo templado-subhúmedo. La vegetación de la zona montañosa esta compuesta por bosques de coníferas, bosques mixtos, bosques de latifoliadas y pastizales. En las partes de menor altitud, de transición hacia la Depresión del Balsas, se encuentran también matorrales subtropicales (Ramírez 2005).

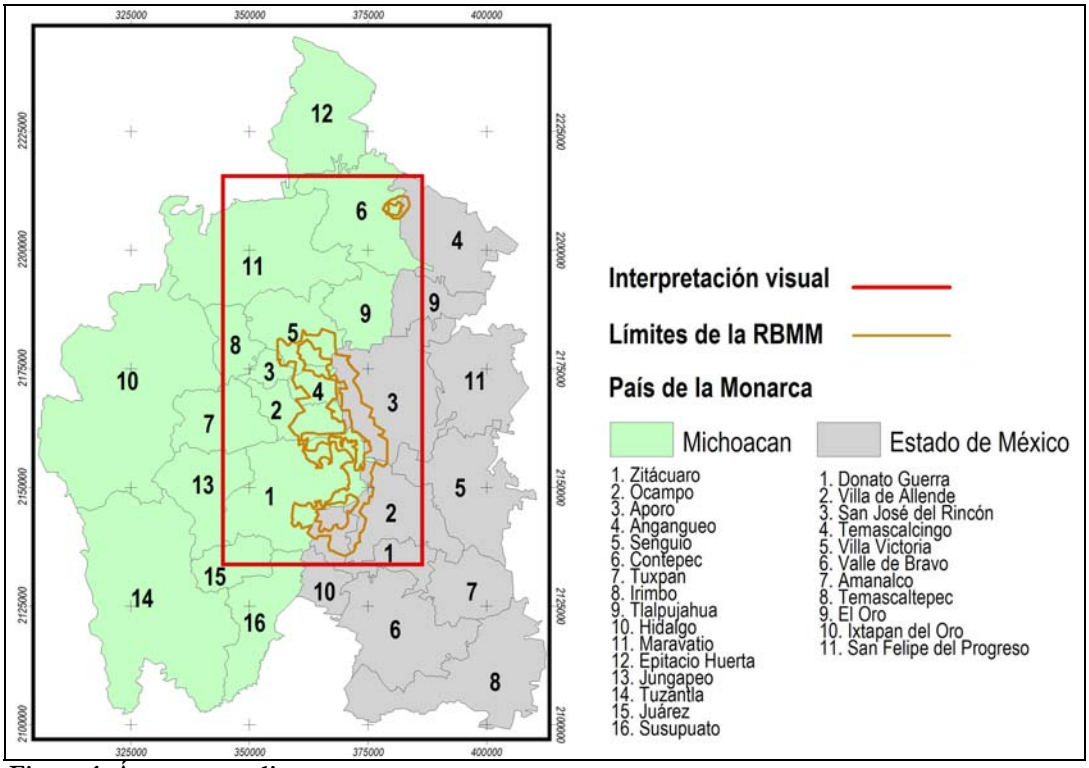


Figura 1. Área en estudio

4. Materiales y métodos

4.1 Materiales

- Cartas topográficas digitales escala 1:50,000 de INEGI: E14A15, E14A16, E14A24, E14A25, E14A26, E14A35 y E14A36
- Ortofotos escala 1:20,000 de 1994 en formato digital. Archivos E14A15-D, E14A16-B, E14A26-A, B, D y E, y E14A36-A, B, D y E
- Imagen de satélite Landsat 5 TM, resolución 28.5 metros, 25-mar-1993, Path/Row 27-46 y 27-47.
- Imagen de satélite Landsat 7 ETM+, resolución 28.5 metros, 24-ene-2000, Path-Row 27-46 y 27-47.
- Imagen de satélite Landsat 7 ETM+, resolución 28.5 metros, 16-ene-2003, Path-Row 27-46 y 27-47.
- Fotografías aéreas digitales, escala 1:10000, feb-1999, de la zona núcleo y la mayor parte de la zona de amortiguamiento
- Fotografías aéreas digitales, escala 1:10000, feb-2003, de la zona núcleo y la mayor parte de la zona de amortiguamiento

4.2 Interpretación visual interdependiente

Se recopilaron los materiales y se homogeneizaron los sistemas de coordenadas (proyección UTM Q14, datum ITRF92, elipsoide GRS80). Se corregistraron las imágenes de 1993 y 2000 con respecto a la del 2003, previamente georreferenciada y corregida geométricamente. Todo ello se llevó a cabo en el programa de procesamiento de imágenes Erdas Imagine 8.5.

Posteriormente se revisó y, en su caso, se corrigió el mapa de cubiertas del suelo generado a partir de interpretación visual de las imágenes de satélite Landsat 7 ETM+ de 2003. Una vez finalizada la revisión de dicho mapa, se procedió con la interpretación de la imagen Landsat de 2000. Y con base en este último, se interpretó la imagen de 1993. Dicha interpretación se llevó a cabo en el SIG Ilwis 3.0, empleando los compuestos de color 453, 754, 443 y 551, generando dos mapas para cada fecha, uno de segmentos y otro de etiquetas de los polígonos.

Las imágenes fueron interpretadas visualmente en pantalla, mediante el método de fotointerpretación interdependiente propuesto por la FAO (1996, 2001). Este indica que se interpreten completamente los polígonos de una primera fecha y que se empleen esos mismos polígonos para interpretar las imágenes de las demás fechas, sólo modificando los segmentos en donde se visualicen cambios. Este es un método muy efectivo porque ayuda a reducir al mínimo los errores más comunes que llevan a la detección de falsos cambios: 1) errores de posición, aunque se asume que las imágenes deben estar perfectamente corregistradas, el interprete puede identificar los posibles desplazamientos y no señalarlos como cambio; 2) errores de clasificación, el método permite moverse fácilmente de una fecha a la otra, por lo que el intérprete puede reconocer si se trata de verdaderos cambios o sólo de diferencias en la respuesta espectral de las cubiertas por condiciones particulares de la toma de la imagen. Además, en nuestro caso, al considerar imágenes de la misma resolución, también evitamos errores por diferencia de escala.

Se consideraron 13 clases de cubiertas del suelo, divididas en 23 subclases (Tabla 1). La veracidad temática de los rodales se verificaba simultáneamente con la interpretación, utilizando respectivamente las ortofotos 1994 y las fotografías aéreas digitales 1999 y 2003. Además, se llevó a cabo verificación en campo, mediante un método de muestreo dirigido, tomando puntos de control con equipos GPS Garmin eTrex Legend y Vista.

Tabla 1. Clases de cubiertas del suelo consideradas para el análisis regional

Clases	Subclases		
	Subclase 1	**Subclase 2**	**Subclase 3**
Bosque de oyamel	Denso	Abierto	
Bosque de pino-encino	Denso	Abierto	Fragmentado
Bosque de encino	Denso	Abierto	Fragmentado
Bosque de cedro	Denso	Abierto	
Vegetación arbustiva	Denso		Fragmentado
Matorral	Denso		Fragmentado
Pastizal inducido	(Única)		
Agricultura	De temporal	De regadío	
Plantaciones arbóreas	(Única)		
Zonas de transición	Agricultura-Bosque	Agricultura-Bosque-Urbano	
Urbano	(Única)		
Agua	(Única)		
Sin vegetación aparente	(Única)		

4.3 Detección del cambio

Utilizando el programa ArcInfo 8.1, se editaron y poligonizaron los mapas de las tres fechas. Se llevaron a cabo intersecciones entre los mapas de 1993 y 2000 y entre 2000 y 2003. A partir de los resultados obtenidos se generaron las matrices de transición y se identificaron los procesos de cambio.

De acuerdo con ello, mediante el programa ArcView 3.2, se reclasificaron los resultados de la sobreposición para obtener los mapas de procesos de cambio. Se identificaron 10 categorías, 6 de cambio y 4 sin cambio (Figuras 2 y 3), definidas de la siguiente manera:

1. Deforestación: Pérdida del arbolado, denso o abierto, por cambio a usos no forestales
2. Perturbación: Pérdida o aclarado del arbolado sin cambio en el uso del suelo
3. Recuperación: Restablecimiento de arbolado denso sobre áreas perturbadas, aclaradas o de vegetación arbustiva
4. Revegetación: Establecimiento de vegetación secundaria por abandono de parcelas agrícolas o pecuarias
5. Crecimiento urbano: Incremento de la superficie ocupada por áreas habitacionales o industriales
6. Cambios en el nivel de agua: Aumento o descenso en el nivel de los cuerpos de agua
7. Vegetación conservada sin cambio
8. Vegetación perturbada sin cambio
9. Usos agropecuarios sin cambio
10. Otras cubiertas sin cambio

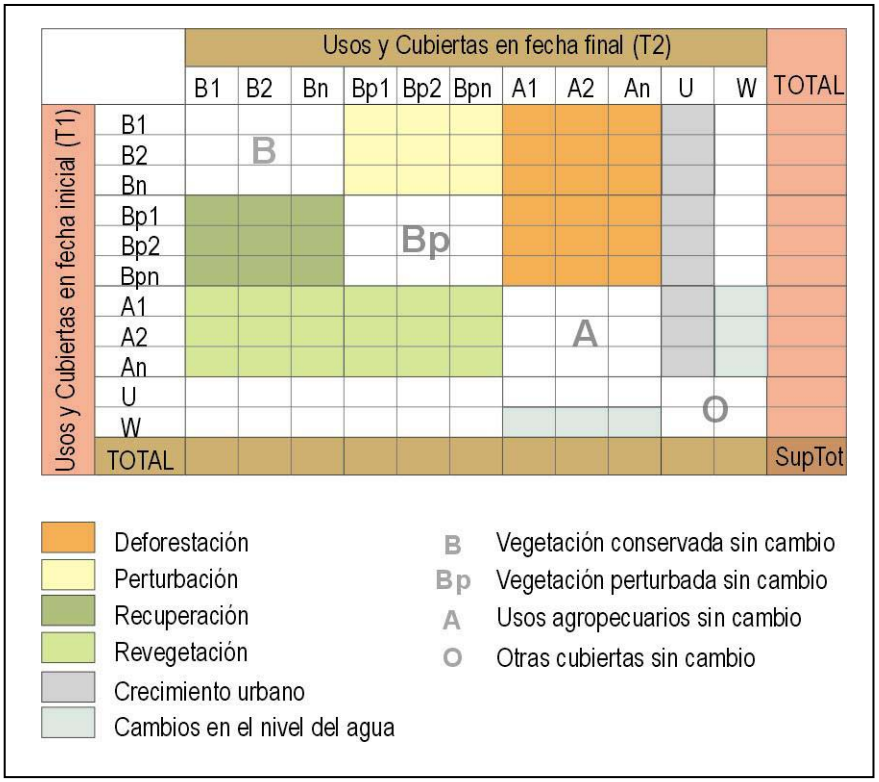
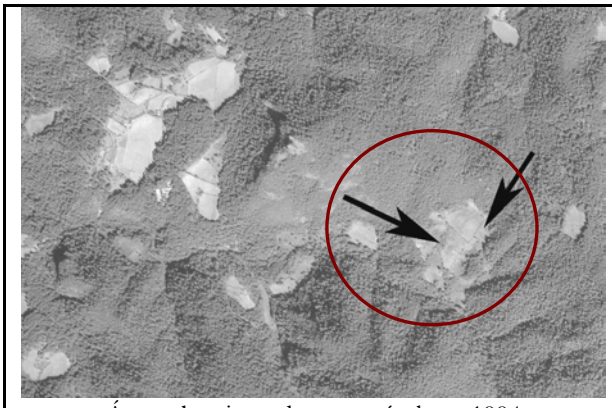


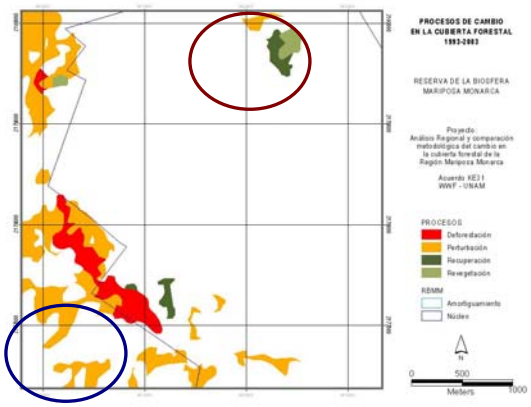
Figura 2. Diseño de la matriz de transición. Los datos se ordenan de mayor a menor grado de antropización de la cubierta, excepto el agua. B = Bosque denso, Bp = Bosque perturbado, A = Usos agropecuarios, U = Urbano, W = Agua.

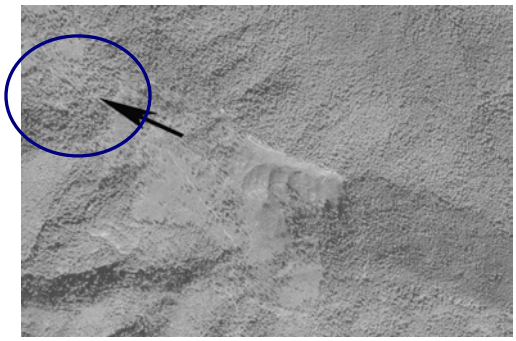
Para este informe sólo se cartografiaron las cuatro primeras, relativas a los cambios en las cubiertas forestales.



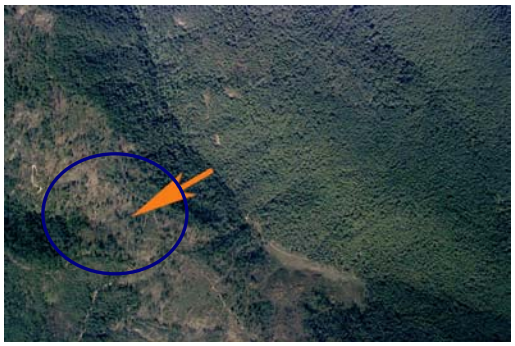
Área arbustiva y de uso agrícola en 1994

Recuperación y revegetación a bosque abierto y a arbustos secundarios en 1999

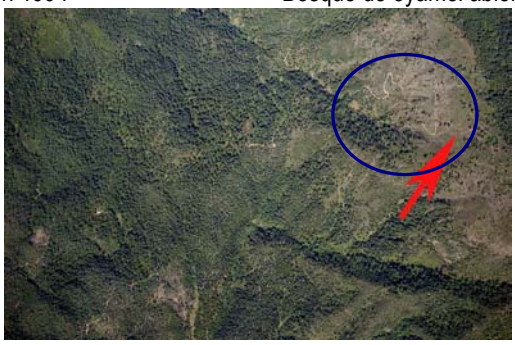




Bosque de oyamel en 1994



Bosque de oyamel abierto y arbustos secundarios en 1999



Pastizal en 2003

Figura 3. Ejemplo de la dinámica de cambio en las cercanías de El Zapatero en Sierra Chincua. Por medio de fotografías aéreas se ejemplifican los cuatro procesos principales de cambio

4.4 Tasas de cambio

La tasa de deforestación se calculó de acuerdo con la fórmula utilizada por la FAO (1996), multiplicada por 100 para obtener el valor en porcentaje:

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

Donde: t = tasa de cambio
S_1 = superficie en la fecha 1
S_2 = superficie en la fecha 2
n = número de años entre las dos fechas

Además, calculamos las tasas de los procesos de cambio obtenidos a partir de las matrices de transición. Para ello, consideramos como S_1 la suma de la superficie de las cubiertas que intervienen en cada proceso en la fecha inicial, y sustituimos el valor $S_1 - S_2$ por la sumatoria de los valores de cada clase de cambio.

5. Resultados

5.1 Cubiertas del suelo

De acuerdo con los resultados obtenidos, la cubierta del suelo de mayor representatividad en el área de estudio es la agricultura, de temporal y de regadío, con cerca del 55% de la superficie en las tres fechas consideradas. Los bosques densos ocupan en conjunto alrededor del 20% del área considerada, los bosques abiertos 8% y la vegetación arbustiva secundaria 6% (Tabla 2).

De forma general, se observa una constante pérdida de bosques densos. Según las cifras obtenidas, de 1993 a 2000 se perdieron alrededor de 1,500 hectáreas, mientras que de 2000 a 2003 dicha pérdida rebasó las 3,200 hectáreas. Esto tiene su contraparte en el incremento de áreas arbustivas, que aumentaron poco más de 1,000 hectáreas en el primer periodo y más de 1,300 en el segundo, así como de bosques abiertos, con incrementos de 1,300 y 340 hectáreas, respectivamente (Tabla 2).

Aunque en términos porcentuales la superficie urbana no tiene gran representatividad (1%), se debe resaltar el crecimiento urbano del área en estudio. Esta cubierta se extendió en 546 hectáreas de 1993 a 2000 y 56 hectáreas más de 2000 a 2003 (Tabla 2).

La mayor parte de la pérdida de bosques densos se ha dado dentro de los límites de la reserva. En lo que es la actual zona núcleo, de 1993 a 2000 la superficie ocupada por estos bosques disminuyó en 870 hectáreas, principalmente de oyamel. Situación que se intensificó a partir del decreto de 2000, ya que de esa fecha al 2003 se perdieron otras 500 hectáreas más. Por consiguiente, se presentó un aumento de la superficie de bosques abiertos, pastizales y, sobre todo, zonas de vegetación secundaria arbustiva (Tabla 3).

Tabla 2. Superficie de las cubiertas del suelo en la RBMM y su área de influencia: 1993, 2000 y 2003

Cubierta del suelo	1993		2000		2003		Cambio 1993-2000	Cambio 2000-2003
	hectáreas	%	hectáreas	%	hectáreas	%	hectáreas	hectáreas
Bosque de oyamel	19,882	5.8	18,133	5.3	16,851	4.9	-1,748	-1,281
Bosque de pino-encino	45,290	13.2	44,273	12.9	42,760	12.5	-1,017	-1,511
Bosque de encino	6,582	1.9	6,877	2.0	6,482	1.9	295	-394
Bosque de cedro	832	0.2	832	0.2	828	0.2	0	-4
Bosque de pino-encino fragmentado	1,435	0.4	1,444	0.4	1,614	0.5	9	170
Bosque de encino fragmentado	397	0.1	397	0.1	397	0.1	0	0
Bosque de oyamel abierto	2,254	0.7	2,703	0.8	2,844	0.8	450	140
Bosque de pino-encino abierto	17,134	5.0	17,977	5.2	18,181	5.3	843	203
Bosque de encino abierto	4,745	1.4	4,589	1.3	4,750	1.4	-156	161
Bosque de cedro abierto	405	0.1	405	0.1	406	0.1	0	0
Arbustos secundarios	18,128	5.3	19,180	5.6	20,544	6.0	1,052	1,362
Arbustos secundarios/Sin vegetación	93	0.0	270	0.1	985	0.3	176	715
Matorral	7,650	2.2	7,650	2.2	7,641	2.2	0	-9
Matorral fragmentado	2,627	0.8	2,627	0.8	2,625	0.8	0	-2
Pastizal inducido	11,089	3.2	11,127	3.2	11,336	3.3	38	209
Agricultura de temporal	136,610	39.8	145,486	42.4	145,332	42.3	8,876	-154
Agricultura de regadío	50,967	14.9	41,909	12.2	41,768	12.2	-9,058	-140
Plantaciones arbóreas	6,394	1.9	6,400	1.9	6,358	1.9	6	-42
Agricultura-Bosque-Urbano	2,500	0.7	2,398	0.7	2,380	0.7	-101	-19
Agricultura-Bosque	1,405	0.4	1,424	0.4	1,451	0.4	19	27
Urbano	2,883	0.8	3,429	1.0	3,485	1.0	546	56
Agua	3,710	1.1	3,429	1.0	3,957	1.2	-281	527
Sin vegetación aparente	179	0.1	231	0.1	216	0.1	53	-15
Total	**343,192**	**100.0**	**343,192**	**100.0**	**343,192**	**100.0**		

Tabla 3. Superficie de las cubiertas del suelo en Zona Núcleo de la RBMM: 1993, 2000 y 2003

Cubierta del suelo	1993		2000		2003		Cambio 1993-2000	Cambio 2000-2003
	hectáreas	%	hectáreas	%	hectáreas	%	hectáreas	hectáreas
Bosque de oyamel	6,458	47.7	5,738	42.3	5,411	39.9	-721	-327
Bosque de pino-encino	4,227	31.2	4,078	30.1	3,898	28.8	-149	-180
Bosque de cedro	12	0.1	12	0.1	12	0.1	0	0
Bosque de pino-encino fragmentado	24	0.2	24	0.2	24	0.2	0	0
Bosque de oyamel abierto	914	6.7	1,044	7.7	1,094	8.1	131	50
Bosque de pino-encino abierto	590	4.4	688	5.1	730	5.4	98	42
Bosque de encino abierto	36	0.3	36	0.3	36	0.3	0	0
Arbustos secundarios	721	5.3	1,260	9.3	1,279	9.4	540	18
Arbustos secundarios/Sin vegetación			94	0.7	471	3.5	94	377
Pastizal inducido	279	2.1	291	2.1	309	2.3	12	18
Agricultura de temporal	289	2.1	284	2.1	284	2.1	-5	0
Sin vegetación aparente	2	0.0	2	0.0	2	0.0	0	0
Total	**13,552**	**100.0**	**13,552**	**100.0**	**13,552**	**100.0**		

Una situación similar a la anterior se repite en la zona de amortiguamiento. Allí se perdieron 1,170 hectáreas de bosques cerrados en los 7 años previos al decreto y 1,480 sólo de 2000 a 2003. Esto se corresponde con el incremento de bosques abiertos, 670 hectáreas en 1993-2000 y 410 en 2000-2003; vegetación secundaria arbustiva, 410 hectáreas en el primer periodo y 990 en el segundo; así como pastizales, con cerca de 60 hectáreas en cada periodo. A diferencia del área núcleo, en esta parte de la reserva si hemos identificado expansión de la superficie agrícola, 11 hectáreas en los 7 años anteriores al 2000 y 24 hectáreas más de ese año al 2003 (Tabla 4).

Tabla 4. Superficie de las cubiertas del suelo en Zona de Amortiguamiento de la RBMM: 1993, 2000 y 2003

Cubierta del suelo	1993		2000		2003		Cambio 1993-2000	Cambio 2000-2003
	hectáreas	%	hectáreas	%	hectáreas	%	hectáreas	hectáreas
Bosque de oyamel	10,687	25.0	9,780	22.9	8,871	20.8	-907	-909
Bosque de pino-encino	14,310	33.5	14,049	32.9	13,483	31.6	-261	-566
Bosque de encino	21	0.0	21	0.0	17	0.0	0	-5
Bosque de pino-encino fragmentado	953	2.2	953	2.2	970	2.3	0	18
Bosque de oyamel abierto	1,074	2.5	1,309	3.1	1,380	3.2	235	72
Bosque de pino-encino abierto	3,589	8.4	4,029	9.4	4,350	10.2	439	321
Bosque de encino abierto	63	0.1	63	0.1	63	0.1	0	0
Arbustos secundarios	1,504	3.5	1,835	4.3	2,480	5.8	331	645
Arbustos secundarios/Sin vegetación		0.0	78	0.2	420	1.0	78	342
Pastizal inducido	949	2.2	1,015	2.4	1,071	2.5	66	57
Agricultura de temporal	8,143	19.1	8,153	19.1	8,178	19.1	11	24
Agricultura de regadío	471	1.1	469	1.1	469	1.1	-1	0
Plantaciones arbóreas	438	1.0	448	1.0	449	1.1	10	1
Agricultura-Bosque-Urbano	204	0.5	202	0.5	202	0.5	-2	0
Agricultura-Bosque	211	0.5	204	0.5	204	0.5	-7	0
Urbano	58	0.1	67	0.2	67	0.2	9	0
Agua	9	0.0	6	0.0	6	0.0	-3	0
Sin vegetación aparente	25	0.1	28	0.1	28	0.1	3	0
Total	**42,707**	**100.0**	**42,707**	**100.0**	**42,707**	**100.0**		

Aunque la imagen interpretada del 2000 corresponde al mes de marzo y el decreto se emitió hasta el mes de noviembre, la mayor parte de los procesos de pérdida del arbolado antes mencionados se han dado posteriormente a la declaración de los nuevos límites de protección. Esto último, lo corroboramos observando los polígonos de las superficies alteradas sobre una imagen Landsat ETM+ de marzo del 2001 (Figura 4).

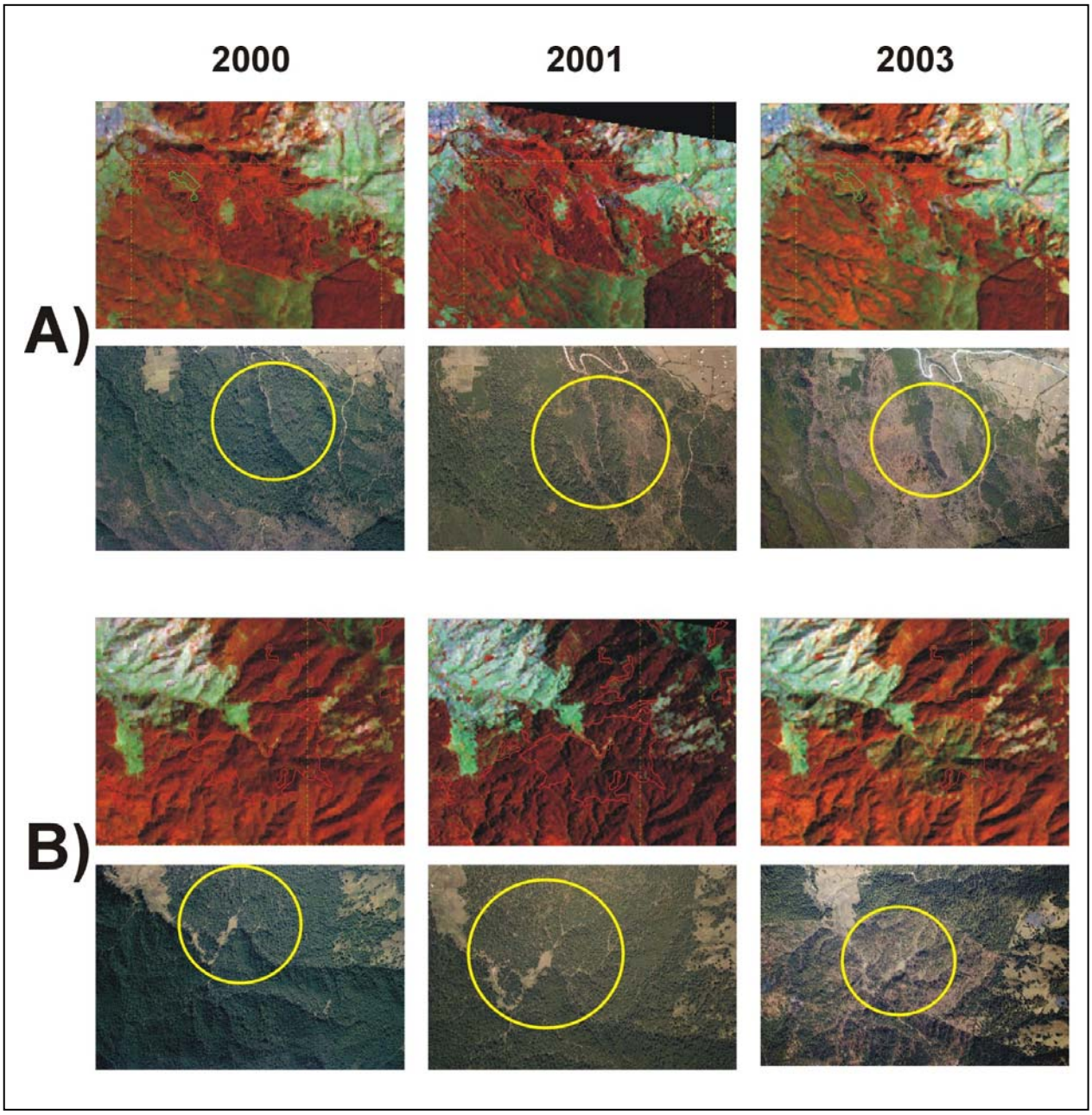


Figura 4. Pérdida del arbolado de 2000 a 2001 y 2003. A) Ejidos Emiliano Zapata y El Asoleadero, B) Ejido Francisco Serrato.

5.2 Procesos de cambio

La pérdida de superficie de algunas cubiertas y la ganancia de otras no siempre tienen un mismo origen ni destino, ni de distribuyen homogéneamente en el territorio. De tal forma, las matrices de transición son una herramienta de análisis donde se observan todas las combinaciones posibles de cambios resultantes de la sobreposición de los mapas. A través de dicha observación se identificaron y reagruparon los principales procesos de cambio de cada uno de los periodos analizados, y a partir de ello se reclasificaron los mapas para obtener la distribución espacial de dichos procesos.

Como **deforestación** agrupamos todas aquellas cubiertas que en la fecha inicial eran bosques densos, abiertos y fragmentados, y vegetación arbustiva, que cambiaron a pastizales o cubiertas agrícolas. Como **perturbación** identificamos a los bosques densos que se transformaron en bosques abiertos o fragmentados, o éstos dos últimos que perdieron más arbolado y se convirtieron en vegetación arbustiva. Clasificamos en proceso de **recuperación** a los bosques abiertos o fragmentados que están densificando su arbolado, así como a las áreas de vegetación arbustiva secundaria donde empiezas a predominar los elementos arbóreos. Y, como, **revegetación** a las superficies antes ocupadas por pastizales o cubiertas agrícolas que son abandonadas y se presenta un reestablecimiento, temporal o permanente, de la vegetación natural (Tabla 5 y 6).

En la matriz de transición de 1993 a 2000 podemos observar que la pérdida del arbolado denso señalada en el apartado anterior se debe a dos procesos de cambio. Por una parte, se presenta un proceso de perturbación, ya sea por extracción selectiva o total de los elementos arbóreos o por efectos del fuego. Por otra parte, y en menor medida, se debió a un proceso de deforestación, por expansión de usos agropecuarios y, en menor medida, crecimiento urbano (Tabla 5).

De la misma manera, en los datos del apartados anterior obtuvimos un constante incremento de los bosques perturbados, no obstante, en la matriz de transición se observa que buena parte de las cubiertas agropecuarias se incrementaron sobre bosques perturbados y otros de éstos se encuentran en proceso de recuperación (Tabla 5).

El mapa de cambios en las cubiertas forestales 1993-2000 muestra que el proceso predominante es la perturbación. El área más afectada corresponde a la vertiente norte de Cerro Pelón (alrededor de 2500 hectáreas), justamente dentro de los límites de la reserva, tanto en zona núcleo como de amortiguamiento. En menores proporciones, otras áreas de la reserva también afectadas por este tipo de desmonte son la parte norte de los cerros Chivati y Huacal (cerca de 400 hectáreas) y la occidental de Sierra Chincua (200 hectáreas aproximadamente). Fuera de la RBMM también identificamos áreas con perturbación en todas las áreas boscosas, sobresaliendo por su extensión en los cerros del norte del área en estudio (Figura 5).

1993/ 2000	11	12	14	15	22	24	31	32	34	35	81	82	41	42	51	61	63	64	65	66	71	72	73	Total 1993
11	18072	128	0	0	0	0	885	140	0	0	562	88	0	0	5	1	0	0	0	0	0	0	0	19882
12	25	43092	0	0	9	0	40	1668	0	0	350	6	0	0	29	44	0	22	0	5	0	0	0	45290
14	0	0	6441	0	0	0	0	0	120	0	14	0	0	0	6	0	2	0	0	0	0	0	0	6582
15	0	0	0	832	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	832
22	0	0	0	0	1435	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1435
24	0	0	0	0	0	397	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	397
31	18	0	0	0	0	0	1704	24	0	0	444	48	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	2254
32	0	829	0	0	0	0	18	15529	0	0	665	0	0	0	13	57	1	1	0	21	0	0	0	17134
34	0	0	361	0	0	0	0	2	4312	0	63	0	0	0	3	4	1	0	0	0	0	0	0	4745
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	405	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	405
81	16	184	71	0	0	0	56	583	158	0	16978	30	0	0	36	11	0	1	0	0	0	0	5	18128
82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	93
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7650	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7650
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2627	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2627
51	2	2	4	0	0	0	0	1	0	0	62	0	0	0	11018	0	0	0	0	0	0	0	0	11089
61	0	34	0	0	0	0	0	22	0	0	41	4	0	0	0	136360	0	0	72	0	67	10	0	136610
63	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	8814	41859	0	36	0	255	1	0	50967
64	0	4	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6376	0	0	7	0	0	6394
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2283	0	217	0	0	2500
66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	1398	0	0	0	1405
71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2883	0	0	2883
72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	195	47	0	0	0	0	3419	49	3710
73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	177	179
Total 2000	18133	44273	6877	832	1444	397	2703	17977	4589	405	19180	270	7650	2627	11127	145486	41909	6400	2398	1424	3429	3429	231	343192
%	5.3	12.9	2.0	0.2	0.4	0.1	0.8	5.2	1.3	0.1	5.6	0.1	2.2	0.8	3.2	42.4	12.2	1.9	0.7	0.4	1.0	1.0	0.1	

Cubiertas del suelo

11 Bosque de oyamel
12 Bosque de pino-encino
14 Bosque de encino
15 Bosque de cedro
22 Bosque de pino-encino fragmentado
24 Bosque de encino fragmentado
31 Bosque de oyamel abierto
32 Bosque de pino-encino abierto
34 Bosque de encino abierto
35 Bosque de cedro abierto
81 Arbustos secundarios
82 Arbustos secundarios/Sin vegetación
41 Matorral
42 Matorral fragmentado
51 Pastizal inducido
61 Agricultura de temporal
63 Agricultura de regadío
64 Plantaciones arbóreas
65 Agricultura-Bosque-Urbano
66 Agricultura-Bosque
71 Urbano
72 Agua
73 Sin vegetación aparente

Procesos de cambio en la vegetación

Deforestación
Perturbación
Recuperación
Revegetación

Tabla 5. Matriz de transición de las cubiertas del suelo de la RBMM y su área de influencia de 1993 a 2000

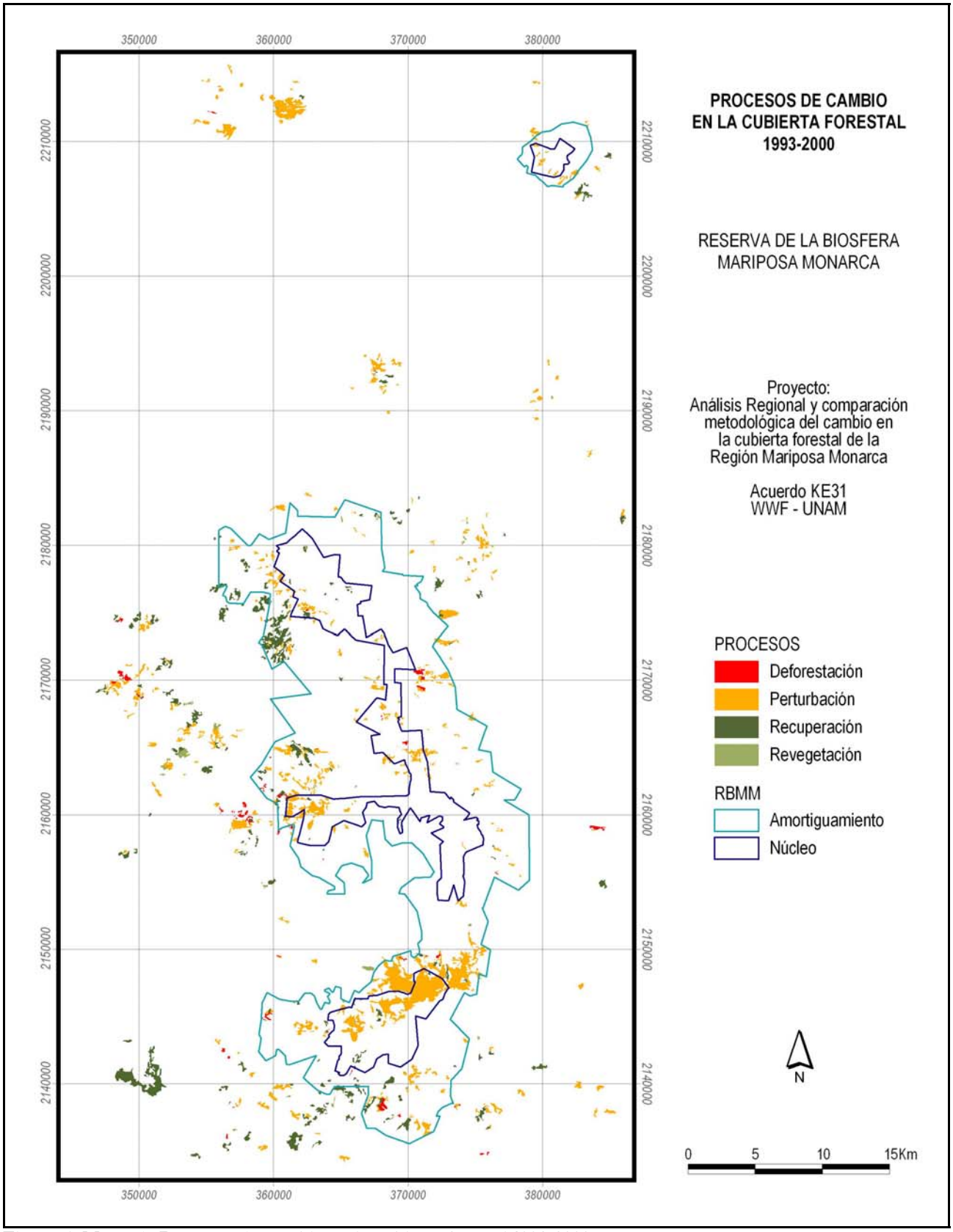


Figura 5. Mapa de Procesos de cambio en la cubierta forestal 1993-2000

El siguiente proceso de mayor extensión es la recuperación del arbolado, contraparte del anterior. Dentro de los límites de la reserva, de 1993 a 2000, se identificaron áreas en proceso de recuperación en la zona de amortiguamiento del lado michoacano, principalmente en Sierra Chincua y, en menor medida, en el área de Ocampo. Fuera de la reserva se presentaron también en todas las áreas boscosas especialmente en el suroeste del municipio de Zitácuaro (Figura 5).

Los otros dos procesos, deforestación y revegetación, se distribuyen en varios manchones de escasas dimensiones, tanto en los bosques dentro de la reserva como fuera de ella (Figura 5).

Contrario a lo que cabría esperar, la matriz de transición de 2000 a 2003 muestra valores de pérdida y perturbación de los bosques incluso más altos que de 1993 a 2000. La expansión de cubiertas de uso agropecuario casi se duplicó en ese periodo de 3 años, respecto a los 7 años anteriores. La perturbación alcanzó cifras similares a pesar de la diferencia de años de los periodos analizados. Por su parte, los procesos de recuperación y revegetación apenas se identificaron (Tabla 6).

De 2000 a 2003 las áreas perturbadas de mayor extensión se ubican de nuevo dentro de la RBMM. Durante este periodo continúo la pérdida del arbolado en la vertiente norte de Cerro Pelón (cerca de 1000 hectáreas). Asimismo se desmontaron, casi en su totalidad, dos ejidos del municipio de Ocampo (en más de 200 y 500 hectáreas). Aparte de estas tres áreas muy extensas, se detectaron numerosas superficies perturbadas de menores dimensiones, distribuidas dentro y fuera de la Reserva (Figuras 4 y 6).

El otro proceso apreciable en el mapa de este periodo es la deforestación, que se presentan mayoritariamente fuera de la reserva. Se detectaron muy pocas superficies en proceso de recuperación durante éste periodo, y prácticamente nada de revegetación (Figura 6).

2000/ 2003	11	12	14	15	22	24	31	32	34	35	81	82	41	42	51	61	63	64	65	66	71	72	73	Total 2000
11	16830	47	0	0	0	0	643	89	0	0	482	41	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		18132
12	21	42575	0	0	18	0	48	1189	0	0	320	4	0	0	39	33	6	11	0	5	0	1	1	44271
14	0	0	6482	0	0	0	0	4	290	0	45	0	0	0	10	39	0	0	0	0	0	7	0	6877
15	0	0	0	828	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	832
22	0	0	0	0	1444	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1444
24	0	0	0	0	0	397	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	397
31	0	0	0	0	0	0	2153	33	0	0	417	97	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	2704
32	0	121	0	0	152	0	0	16817	0	0	757	6	0	0	33	44	1	10	0	22	11	0	3	17978
34	0	0	0	0	0	0	0	0	4460	0	99	0	0	0	15	9	6	0	0	0	0	0	0	4589
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	402	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	405
81	0	13	0	0	0	0	1	41	0	0	18414	573	0	0	103	38	0	0	0	0	0	0	0	19182
82	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	1	264	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	270
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7639	0	0	0	3	0	0	0	0	8	0	7650
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2625	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2627
51	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	11125	0	0	0	0	0	0	0	0	11126
61	0	3	0	0	0	0	0	2	0	0	5	0	0	0	7	144964	127	3	0	0	2	372	0	145486
63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	140	41624	0	0	0	23	119	0	41909
64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	63	0	6334	0	0	1	0	1	6400
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2380	0	19	0	0	2398
66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1424	0	0	0	1424
71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3429	0	0	3429
72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	3429	0	3430
73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	209	231
Total 2003	16851	42760	6482	828	1614	397	2844	18181	4750	406	20544	985	7641	2625	11336	145332	41768	6358	2380	1451	3485	3957	216	343192
%	4.9	12.5	1.9	0.2	0.5	0.1	0.8	5.3	1.4	0.1	6.0	0.3	2.2	0.8	3.3	42.3	12.2	1.9	0.7	0.4	1.0	1.2	0.1	

Cubiertas del suelo

11 Bosque de oyamel
12 Bosque de pino-encino
14 Bosque de encino
15 Bosque de cedro
22 Bosque de pino-encino fragmentado
24 Bosque de encino fragmentado
31 Bosque de oyamel abierto
32 Bosque de pino-encino abierto
34 Bosque de encino abierto
35 Bosque de cedro abierto
81 Arbustos secundarios
82 Arbustos secundarios/Sin vegetación
41 Matorral
42 Matorral fragmentado
51 Pastizal inducido
61 Agricultura de temporal
63 Agricultura de regadío
64 Plantaciones arbóreas
65 Agricultura-Bosque-Urbano
66 Agricultura-Bosque
71 Urbano
72 Agua
73 Sin vegetación aparente

Procesos de cambio en la vegetación

Deforestación
Perturbación
Recuperación
Revegetación

Tabla 6. Matriz de transición de las cubiertas del suelo de la RBMM y su área de influencia de 2000 a 2003

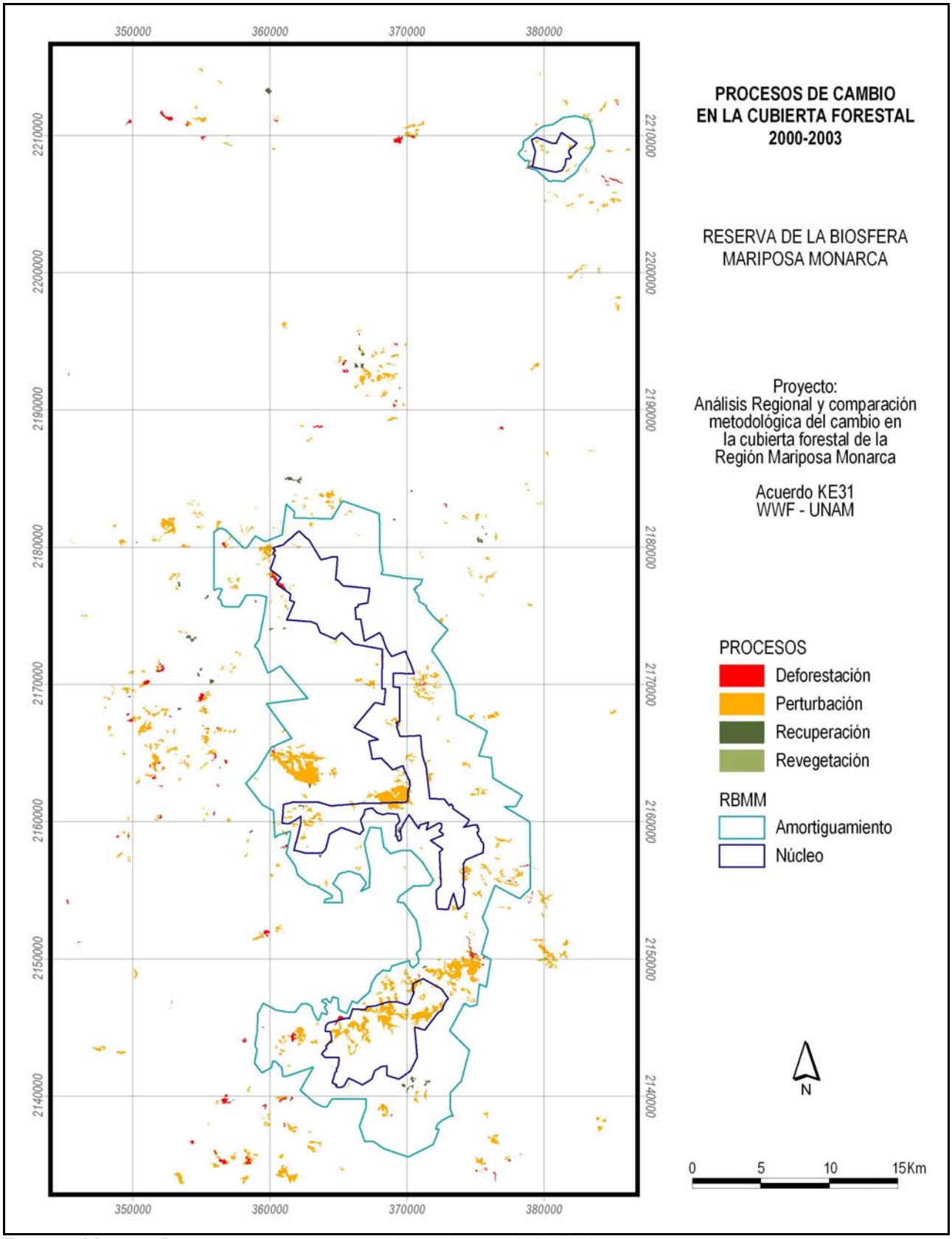


Figura 6. Mapa de Procesos de cambio en la cubierta forestal 2000-2003

5.3 Tasas de cambio

Con fines comparativos, calculamos la tasa de deforestación según la propuesta de la FAO (1996). Los resultados muestran que la tendencia de pérdida de la cubierta boscosa en la RBMM se ha incrementado notablemente después del decreto del 2000. De 1993 a 2000 se registró una tasa de deforestación promedio anual de 0.4%, la cual aumentó hasta 1.2% a partir del 2000. La pérdida afecta por igual ambas zonas de las reserva. Contrariamente a lo que cabría esperar, la tasa de deforestación es más elevada dentro de los límites del área protegida que en los bosques de sus alrededores, donde, a pesar del notable incremento que se registra entre el primer y segundo periodo, la tasa calculada es de 0.6% anual, por mitad que en la reserva (Tabla 7).

Tabla 7. Tasa de deforestación por zona de la RBMM y área de influencia, según propuesta de la FAO (1996)

	Bosques (ha)			Tasa de cambio (%)	
	1993	**2000**	**2003**	**1993-2000**	**2000-2003**
RBMM Total	42,956	41,822	40,339	-0.4	-1.2
RBMM Zona Núcleo	12,261	11,620	11,206	-0.8	-1.2
RBMM Zona Amortiguamiento	30,696	30,202	29,133	-0.2	-1.2
Área de influencia (AI)	63,651	63,458	62,415	-0.04	-0.6
RBMM+AI	106,607	105,280	102,754	-0.2	-0.8

La fórmula de la FAO (1996) considera la totalidad de los bosques en la fecha inicial y en la fecha final, de tal forma esta tasa representa la pérdida del arbolado, conservado o ya perturbado, debido a cualquier causa y sin considerar a que se transforma la cubierta del suelo. Es decir, en esta estimación queda agrupado lo que nosotros identificamos como deforestación y como perturbación, y omite la recuperación. Por ello, también calculamos las tasas de cada uno de los procesos señalados en las matrices de transición, aunque la medida sólo sea para comparar los dos periodos de este trabajo en particular.

De tal forma, considerando la deforestación como el proceso donde hay cambio a usos no forestales, también identificamos un notable incremento en los últimos 3 años respecto al periodo de 7 años anterior. En la zona núcleo pasó de 0.01% en 1993-2000 a 0.05% en 2000-2003. En la zona de amortiguamiento se mantuvo igual, 0.1%, y en el área de influencia se incrementó de 0.03% en el primer periodo a 0.1% en el segundo (Tabla 8).

Tabla 8. Tasa de deforestación por zona de la RBMM y área de influencia, según matrices de transición

	S_1* (ha)		Deforestación (ha)		Tasa de cambio (%)	
	1993	**2000**	**1993-2000**	**2000-2003**	**1993-2000**	**2000-2003**
RBMM Zona Núcleo	12,981	12,974	12	18	-0.01	-0.05
RBMM Zona Amortiguamiento	32,200	32,115	121	92	-0.1	-0.1
Área de influencia (AI)	82,274	82,268	146	322	-0.03	-0.1
RBMM+AI	127,456	127,358	279	432	-0.03	-0.1

* Bosques densos, abiertos y fragmentados, matorrales y vegetación secundaria arbustiva

Como vimos en las matrices de transición y en los mapas de cambio, el proceso predominante es la pérdida del arbolado sin cambio en el uso del suelo, por lo que las tasas de perturbación son muy elevadas. Encontramos que la perturbación en la zona núcleo fue de 1.6% de 1993 a 2000 (3 veces más que lo identificado por el método de la FAO) y que se incrementó a 2.3% de 2000 a 2003 (el doble de aquel método). En la zona de amortiguamiento pasó de 1.0 a 2.2% y en el área

de influencia de 0.5 a 1.1% (Tabla 9). Es decir, en todos los casos encontramos un incremento en la tasa de pérdida del arbolado a partir del decreto del 2000.

Tabla 9. Tasa de perturbación por zona de la RBMM y área de influencia, según matrices de transición

	S_1* (ha)		Perturbación (ha)		Tasa de cambio (%)	
	1993	**2000**	**1993-2000**	**2000-2003**	**1993-2000**	**2000-2003**
RBMM Zona Núcleo	12,261	11,620	1,296	799	-1.6	-2.3
RBMM Zona Amortiguamiento	30,696	30,202	2,018	1,966	-1.0	-2.2
Área de influencia (AI)	56,001	55,807	1,788	1,789	-0.5	-1.1
RBMM+AI	98,958	97,629	5,102	4,555	-0.8	-1.6

* Bosques densos, abiertos y fragmentados

Por el contrario, las tasas de recuperación y de revegetación han disminuido notablemente en el segundo periodo respecto al primero. La recuperación en toda el área en estudio fue de 0.7% en 1993-2000 y disminuyó a 0.1% en 2000-2003; con un descenso mayor en la zona de amortiguamiento, que pasó de 1.4 a 0.2%, respectivamente (Tabla 10). Asimismo, la revegetación, que ya era el proceso de menor presencia, ha sido casi nula en los años posteriores al decreto. En el área de estudio disminuyó de 0.1% los 7 años anteriores al 2000 a 0.002% en los 3 siguientes a esa fecha (Tabla 11). Aunque esto no significa que no la haya, sino que los método y los materiales utilizados no permiten identificarla en un lapso de tiempo tan corto.

Tabla 10. Tasa de recuperación por zona de la RBMM y área de influencia, según matrices de transición

	S_1* (ha)		Recuperación (ha)		Tasa de cambio	
	1993	**2000**	**1993-2000**	**2000-2003**	**1993-2000**	**2000-2003**
RBMM Zona Núcleo	2,284	3,147	105	12	0.6	0.1
RBMM Zona Amortiguamiento	7,183	8,265	761	52	1.4	0.2
Área de influencia (AI)	35,125	35,557	1,409	116	0.6	0.1
RBMM+AI	44,592	46,969	2,276	181	0.7	0.1

* Bosques abiertos y fragmentados y vegetación secundaria arbustiva

Tabla 11. Tasa de revegetación por zona de la RBMM y área de influencia, según matrices de transición

	S_1* (ha)		Revegetación (ha)		Tasa de cambio	
	1993	**2000**	**1993-2000**	**2000-2003**	**1993-2000**	**2000-2003**
RBMM Zona Núcleo	568	575	5	0	0.1	0.0
RBMM Zona Amortiguamiento	10416	10491	37	9	0.1	0.03
Área de influencia (AI)	197981	201040	143	3	0.01	0.001
RBMM+AI	208964	212106	185	13	0.1	0.002

* Cubiertas agrícolas y pastizales

6. Discusión

Se reconoce a la Región de la Mariposa Monarca como un área forestal, sin embargo la mayor parte de ese territorio está ocupado por terrenos agrícolas. De acuerdo con los resultados obtenidos, las cubiertas agropecuarias se distribuyen en más de la mitad del área en estudio. Los bosques se mantienen principalmente en los conjuntos montañosos de la RBMM y en los volcanes aislados del norte y occidente de dicha reserva (Figura 7).

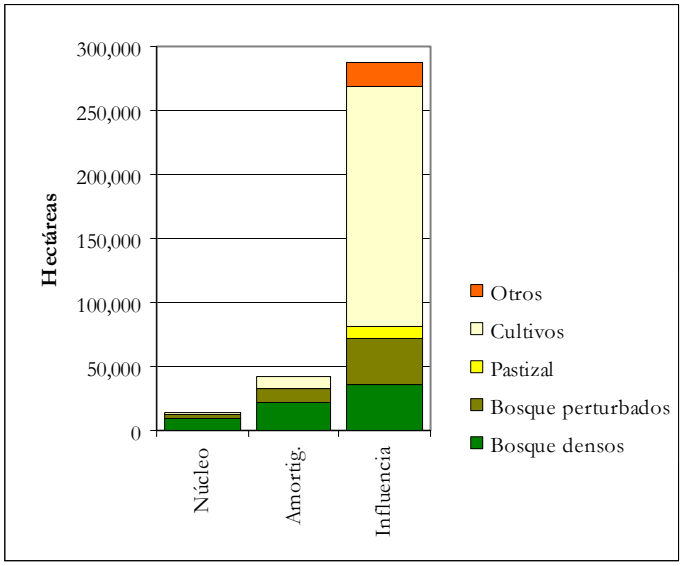


Figura 7. Superficie ocupada por cubierta del suelo por zona de la RBMM y área de influencia

Llama la atención la elevada extensión de bosques perturbados, con un notable predominio de vegetación arbustiva secundaria. Lo más grave de esta situación es que la disminución de bosques densos se ha dado principalmente dentro de los límites de la reserva, e incluso se ha visto incrementada a partir del decreto de 2000. Varios autores habían señalado que el decreto de ANP de 1986 agudizó la tala al interior de sus límites (Hoth 1995, Brower et al. 2002), pero se esperaba que con la nueva figura de protección (Reserva de la Biosfera) la declaratoria del 2000 revirtiera el proceso de degradación (Brower et al 2002, Ramírez et al 2003), sin embargo los datos señalan que, por el contrario, se ha incrementado (Figura 8).

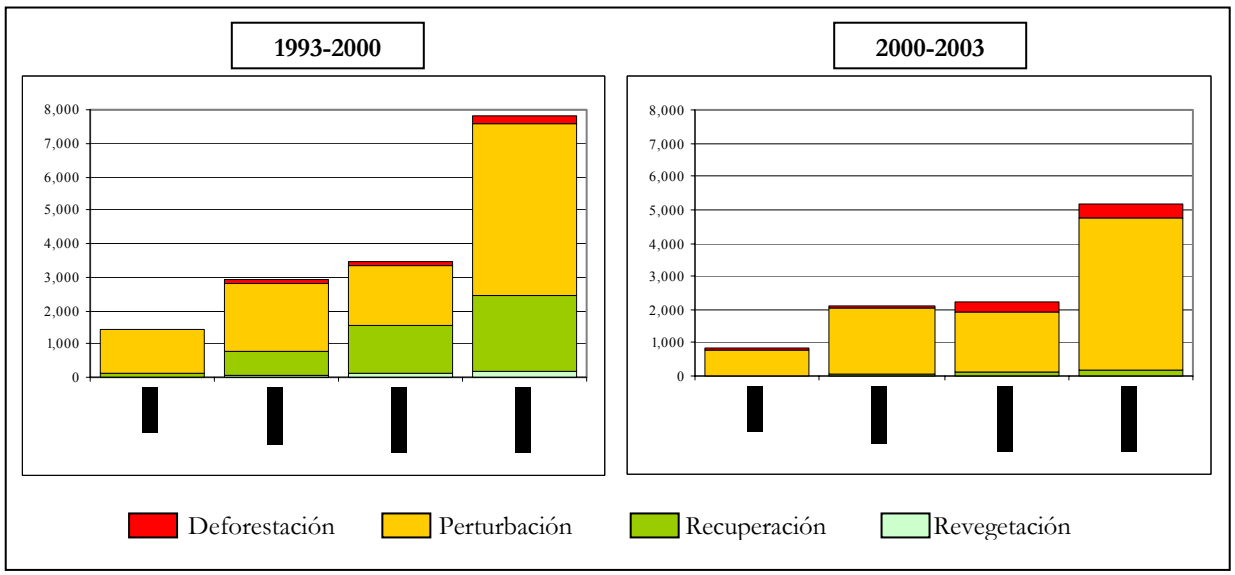


Figura 8. Procesos de cambio en las cubiertas forestales de la RBMM y su área de influencia, de 1993 a 2000 y de 2000 a 2003 (hectáreas)

No detectamos expansión de la frontera agrícola en la zona núcleo de la reserva, y el incremento en los pastizales obedece más a la propia perturbación por la extracción forestal que a un cambio en el uso del suelo. La parte más afectada en ambos periodos ha sido la zona de amortiguamiento, con más de 2000 hectáreas perturbadas en cada uno de ellos (Figura 8). Considerando la duración de cada periodo, podemos asegurar que la pérdida del arbolado en la RBMM ha sido más acelerada después del decreto del 2000 que antes de él (Figura 4).

A través del análisis de las matrices de transición y de los mapas de procesos podemos concluir que la RBMM es un área con una dinámica en sus cubiertas forestales muy acelerada y compleja, donde el balance se va inclinando cada vez más hacia la pérdida de los recursos. Aunque cabe señalar que, debido al método utilizado, 3 años es muy poco tiempo para detectar de manera fiable procesos de recuperación, que son mucho más lentos y menos claros que los de pérdida y perturbación.

También podemos ver que del lado michoacano las transformaciones de las cubiertas forestales están siendo más rápidas que del lado mexiquense de la reserva. Los predios de mayor extensión de superficie perturbada fueron dos ejidos del municipio de Ocampo: Francisco Serrato y Emiliano Zapata; así como dos comunidades indígenas del municipio de Zitácuaro: Crescencio Morales y Nicolás Romero.

Dada la demanda tan elevada de los recursos maderables, llama la atención el incremento tan reducido de plantaciones forestales que, con un manejo adecuado de agua y suelo, podrían ser una alternativa para disminuir la presión sobre los bosques nativos.

Aunque no es tema del presente trabajo y en términos porcentuales no es una cubierta dominante, debemos señalar el crecimiento de la superficie urbana de las principales cabeceras municipales, que de 1993 a 2003 se incrementaron en 600 hectáreas. Esto supone un importante aumento y concentración de la población, lo cual puede representar una mayor presión sobre los recursos naturales de la región.

6. Literatura citada

Álvarez, R., R. Bonifaz, R.S. Luneta, C. García, G. Gómez, R. Castro, A. Bernal y A.L. Cabrera. 2003. Multitemporal land-cover classification of Mexico using Landsat MSS Imagery. International Journal of Remote Sensing 24 (12). pp 2501–2514.

Blanco, J., I. Valdéz y J. Ugalde. 1996. Corrección fotogramétrica de segmentos digitalizados de fotografías áereas aplicando un SIG, para la determinación del uso del suelo en la Sierra de Quetzaltepec, México. Investigaciones Geográficas 33. UNAM. México. pp 9-30.

Brower, L., G. Castilleja, A. Peralta, J. López-García, L. Bojorquez-Tapia, S. Díaz, D. Melgarejo y M. Missrie. 2002. Quantitative changes in forest quality in a principal overwintering area of the Monarch butterfly in Mexico, 1971-1999. Conservation Biology 16 (2). pp 346-359.

Bruner, A., R. Gullison, R. Rice y G. Fonseca. 2001. Effectiveness of parks in protecting tropical biodiversity. Science 291. pp125-128.

Dirzo, R. and M. García. 1992. Rates of Deforestation in Los Tuxtlas, a Neotropical Area in Southeast Mexico. Conservation Biology 6 (1). pp 84-93.

FAO, 1996. Forest Resources Assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes. Number 130, Rome.

FAO. 2001. Global Forest Resources Assessment 2000. FAO Forestry Paper 140. Rome. [http:/www.fao.org/forestry/site/fra2000report/en]

Hoth, J. 1995. Mariposa monarca, mitos y otras realidades aladas. Ciencias 37:19-28.

Liu, J., M. Linderman, Z. Ouyang, L. An, J. Yang y H. Zhang. 2001. Ecological degradation in Protected Areas: The case of Wolong Nature Reserve for Giant Pandas. Science 292. pp 98-101.

Mas, J. e I. Ramírez. 1996. Comparison of land use classifications obtained by visual interpretation and digital processing. ITC Journal 3/4. pp 278-283.

Novak, A. y Y.Q. Wang, 2004. Efects of suburban sprawl on Rhode Island's forests: a Landsat view from 1972 to 1999. Northeastern Naturalist 11 (1). pp 67-74.

Ramírez, M.I. 2001. Cambios en las cubiertas del suelo en la Sierra de Angangueo, Michoacán y Estado de México, 1971-1994-2000. Investigaciones Geográficas 45. UNAM. pp 39-55.

Ramírez, M.I. 2005. Los espacios forestales de la Sierra de Angangueo (estados de Michoacán y México), México. Una visión geográfica. Servicio de Publicaciones. Universidad Complutense de Madrid. CD-ROM.

Ramírez, I., J. Azcárate y L. Luna. 2003. Effects of human activities on monarch butterfly habitat in protected mountain forests, Mexico. The Forestry Chronicle 79 (2). pp 242-246.

Sánchez-Azofeifa, G., C. Quesada-Mateo, P. González-Quesada, S. Dayanandan y K. Bawa. 1999. Protected Areas and Conservation of Biodiversity in the Tropics. Conservation Biology 13 (2). pp 407-415.

Song, C. y C. Woodcock. 2002. The spatial manifestation of forest sucession in optical imagery. The potential of multiresolution imagery. Remote sensing of Environment 82. pp 271-284.

Velázquez, A., J. Mas, R. Mayorga, J. Palacio, G. Bocco, G. Gómez, L. Luna, I. Trejo, J. López, M. Palma, A. Peralta, J. Prado y F. González. 2001. El Inventario Forestal Nacional 2000. Ciencias 64. pp 13-19.

Parte 2

Comparación metodológica del cambio en la cubierta forestal de predios seleccionados

1. Introducción

A pesar de ser un área natural protegida desde 1980, el área de hibernación de la mariposa monarca en México ha estado sometida a una constante dinámica de perturbación y pérdida de sus bosques. Para evitar dicha perturbación, especialmente en la zona núcleo de la Reserva decretada en noviembre de 2000, WWF-Programa México y el Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza crearon ese mismo año el Fondo de Conservación Mariposa Monarca (FCMM). Este esquema, que apoya económicamente a las comunidades que han aceptado abstenerse de aprovechar sus bosques y que realizan acciones para recuperar áreas perturbadas, requiere de un monitoreo periódico de la cubierta forestal. Hasta la fecha, se han aplicado tres monitoreos para comprobar el cumplimiento de los acuerdos alcanzados con las comunidades. El primero de ellos, 2001-2003, mediante fotointerpretación convencional de fotografías aéreas digitales (FAD); el segundo, 2003-2004, utilizando clasificación no supervisada de imágenes de satélite IKONOS; y, el tercero, 2003-2005, con la misma metodología que el primero. A pesar de que dichos monitoreos han dado, en general, buenos resultados y que representan un sistema sin precedentes en nuestro país, ambos han presentado ciertas limitaciones (Honey-Rosés et al. 2004, Fay & Olander 2004). De tal forma, en el presente trabajo se han aplicado tres métodos a tres insumos no considerados en los monitoreos anteriores, en dos áreas piloto, para tratar de identificar un método que se ajuste mejor a los requerimientos del FCMM.

2. Objetivos

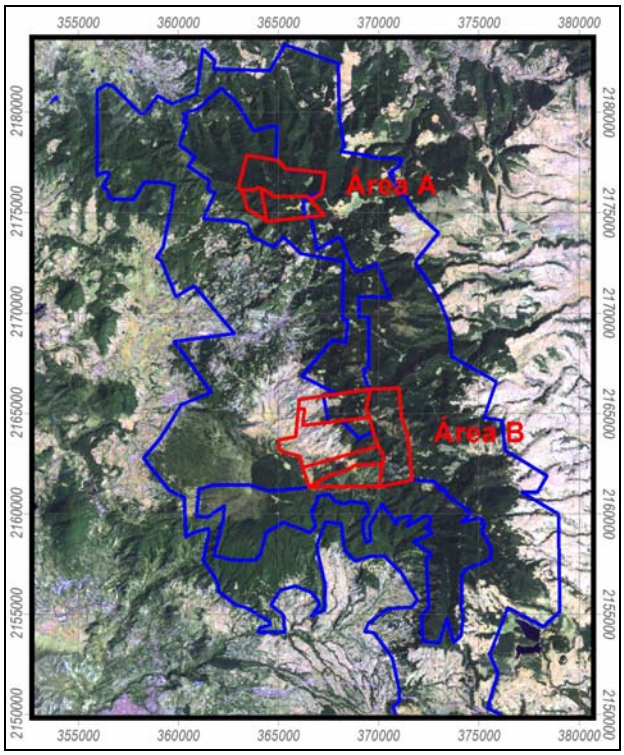
Objetivo General:
Comparar y evaluar ventajas y desventajas de diferentes métodos para el monitoreo del cambio en las cubiertas forestales, en periodos cortos de tiempo y a escala detallada (1:20000-1:50000).
Objetivos particulares:

- Generar cartografía de cubiertas del suelo y de cambios en las cubiertas del suelo con insumos no considerados en los monitoreos anteriores del Fondo Monarca
- Buscar métodos que identifiquen la pérdida anual del arbolado en escala detallada
- Proponer métodos que puedan ser fácilmente repetibles y con el menor grado posible de subjetividad por parte del ejecutor
- Comparar ventajas y desventajas de los métodos aplicados
- Realizar un análisis comparativo de los resultados anteriores, más los resultados de los monitoreos llevados a cabo para el Fondo Monarca, 2001-2003 y 2003-2004.
- Elaborar una tabla comparativa de los métodos anteriores, señalando las ventajas y desventajas de cada uno de ellos

3. Área de estudio

Para el análisis comparativo de los métodos de detección de cambio en las cubiertas forestales se determinaron dos áreas piloto. Para ello se consideraron tres aspectos: 1) la disponibilidad de los insumos necesarios; 2) que se haya presentado pérdida del arbolado, y que haya sido plenamente identificada en campo; 3) que hubiera una variación importante en las cubiertas del suelo y en la topografía del área; y, 4) que miembros del equipo de trabajo conociéramos bien el área.

El área piloto A, en Sierra Chincua, con una superficie de 1,015 hectáreas, incluye los predios de la Propiedad Federal, Propiedad Estatal y Ejido Cerro Prieto, todos en el estado de Michoacán. El área B, entre el Cerro Huacal y la Sierra el Campanario, ocupa 2,530 hectáreas pertenecientes a los ejidos Asoleadero, Rosario (dotación y una ampliación) y Francisco Serrato, de Michoacán, y La Mesa (ampliación) del Estado de México (Figura 1). Juntas suman 3,545 hectáreas, que representan el 6% de las 56,259 hectáreas que ocupa la RBMM.



Área A
Xmin = 362,000
Ymin = 2,173,500
Xmax = 368,500
Ymax = 2,179,000

Área B
Xmin = 364,000
Ymin = 2,160,500
Xmax = 372,500
Ymax = 2,167,000

Figura 1. Áreas piloto de estudio. Imagen Landsat ETM+, 16/enero/2003, RGB 321

4. Materiales y métodos

4.1 Materiales

Para llevar a cabo este trabajo utilizamos imágenes Landsat de 2001 y 2003 y Spot de 2003 y 2004, así como mosaicos elaborados a partir de fotografías aéreas digitales (mosaicos-FAD) de 2001 y 2003 (Tabla 1). No fue posible analizar las imágenes Spot para el mismo periodo que el resto, 2001-2003, ya que nos interesaba probar con las del sensor HRG-Spot 5 de 10 metros de resolución, el cual comenzó a operar en 2002.

Tabla 1. Principales características de las imágenes utilizadas

Sensor	Resolución	Path/Row	Fecha
Landsat 7 ETM+	28.5 m	27-46	31-Mar-2001
			16-Ene-2003
Spot 5 Multiespectral	10 m	586-311	06-May-2003
			19-Abr-2004
Mosaicos-FAD (5)	1 m		10-Mar-2001
Mosaicos-FAD (2)			23-Feb-2003

Se utilizó también el mapa topográfico digital Angangueo E14A26, escala 1:50000, y cuatro ortofotos de 1994, escala 1:20000 de 2 metros de resolución (E14A26a, E14A26b, E14A26d, y E14A26e), todo ello del INEGI, así como el archivo de polígonos de predios proporcionado por WWF.

Para el procesamiento de imágenes se seleccionó el programa Erdas Imagine (versión 8.6) por ser un software especializado y de amplio uso comercial. En la interpretación visual en pantalla se utilizó el programa ILWIS 3.0, cuyo módulo de digitalización es muy amigable. La edición de los segmentos interpretados se hizo en ArcInfo 8.0. Y, por último, el análisis y presentación de los datos se llevó a cabo en ArcView 3.2.

4.2 Métodos

De acuerdo con Mas (1999), los procedimientos para la detección del cambio a partir de imágenes de satélite se pueden separar en tres grandes grupos. Según las transformaciones y las técnicas de análisis aplicadas, estos son: 1) realce de imágenes, que implica la combinación matemática de bandas de diferentes fechas (substracción de bandas, cocientes, análisis de componentes principales, etc.); 2) clasificación digital de datos multitemporales, que se aplica a un conjunto de bandas de diferentes fechas; y, 3) comparación de mapas independientes, generados por clasificación digital, supervisada o no supervisada, o visual.

En el presente trabajo, para la detección del cambio se consideraron técnicas de ese tercer grupo, conocidas como post-clasificatorias, debido a que son las más frecuentemente utilizadas para este tipo de análisis, permiten conocer la naturaleza del cambio y presentan niveles de exactitud global más elevados (Mas 1999). En la figura 2 se muestra el esquema de los pasos seguidos para el presente estudio. En cada uno de ellos se tomó el tiempo requerido para su ejecución.

4.2.1 *Importación y revisión de los materiales*

Se importaron todos los materiales a formato IMG de Erdas. Se revisaron las especificaciones cartográficas de cada imagen (proyección, datum y elipsoide), la precisión geométrica de las que ya estaban georreferenciadas con respecto a las ortofotos de INEGI, y la facilidad para observar los mismos rasgos en los diferentes tipos. Se homogeneizaron los sistemas de coordenadas utilizando la proyección UTM zona 14, datum ITRF92, elipsoide GRS80.

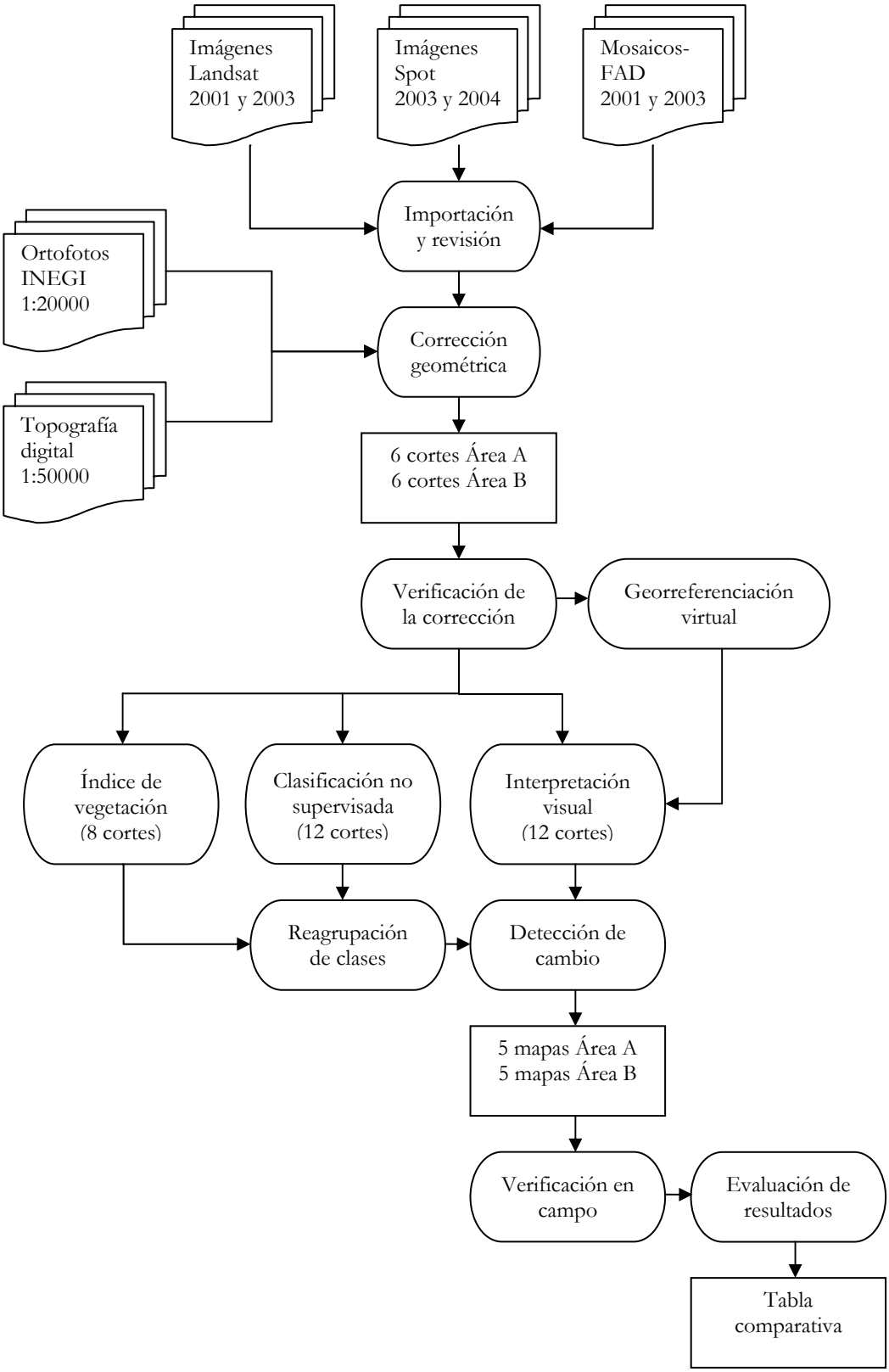


Figura 2. Esquema metodológico del análisis comparativo

4.2.2 *Corrección geométrica*
La corrección geométrica es una transformación de la posición de los píxeles en una imagen, que permite modificar flexiblemente su geometría, para convertirla en un documento cartográfico o para superponer dos o más imágenes entre si. Se basa en funciones numéricas, donde se relacionan las coordenadas columna-línea de la imagen de entrada con coordenadas cartográficas x-y dadas por el usuario, para establecer la relación de la imagen con el SIG. La parte fundamental de dicha corrección es el establecimiento de puntos de control (Chuvieco 1990, Janssen and Weir 2001, Lillesand and Kiefer 2001).

a) Establecimiento de puntos de control
Para la corrección geométrica se tomaron como base las ortofotos digitales del INEGI, 1:20000, ya que es el material disponible de mayor precisión. Además, a pesar de que corresponden a 1995, presentan muchos rasgos que se han mantenido sin cambio y permiten la obtención de numerosos puntos de control. De tal forma, primero se realizaron los cortes de la escena que cubría las dos áreas piloto, luego se ubicaron los puntos de control (entre 35 y 95 según el corte y el tipo de imagen) hasta encontrar un error medio cuadrático (RMS) lo más cercano a un píxel de la imagen en cuestión. Se aplicaron las correcciones geométricas que Erdas 8.6 propone específicamente para Landsat, Spot y cámaras fotográficas, y que se basan en las características particulares de cada sensor. Se aplicaron transformaciones de tercer grado mediante el método de interpolación bilineal. Posteriormente se hicieron los cortes correspondientes a las Áreas A y B.

b) Verificación de la corrección
Se llevó a cabo una valoración visual de los resultados de la corrección anterior, comparando mediante transparencias cada imagen con las ortofotos. Se midió manualmente el desplazamiento entre rasgos claramente identificados en todas las imágenes y en las ortofotos (básicamente pastizales), considerando una red de 34 puntos de verificación para todos los cortes del Área A y 62 para los del Área B.

c) Georreferenciación virtual
Para la interpretación visual fue necesario agregar más puntos de control (*tiepoints*) en algunos cortes y aplicar una georreferenciación virtual, mediante transformación de tercer grado, que permitiera un mejor ajuste de los segmentos interpretados visualmente. Esto se llevó a cabo en ILWIS 3.0, donde se establecieron entre 70 y 100 puntos, tomando también como base las ortofotos de INEGI. Sin embargo, al ser una georreferenciación virtual, sin remuestreo (*resample*) de píxeles, el programa no permite la exportación de la imagen corregida, ni la sobreposición entre imágenes de dos fechas diferentes.

4.2.3 *Interpretación visual en pantalla*
Es un proceso similar a la interpretación de fotografías aéreas, donde a través de las características visuales de la imagen (tono, textura, estructura, sombras, contexto, etc.) se delimitan los elementos temáticos de interés (Chuvieco 1990, Janssen 2001). Se aplicó la metodología de interpretación visual interdependiente propuesta por la FAO (1996, 2001). La cual se basa en el corregistro de las imágenes que conforman cada serie espacio-temporal y en una interpretación visual donde se comparan continuamente las imágenes involucradas, con el objeto de no señalar falsos cambios.

En la revisión de los materiales se identificaron elementos, básicamente pastizales y parcelas de cultivo, presentes desde las ortofotos de 1995 y que se observaban en todas las imágenes. Estos

elementos se digitalizaron sobre las ortofotos para servir de control de la corrección geométrica de cada corte. Se aplicó la georreferencia virtual a los cortes que lo requerían.

Para definir las clases a fotointerpretar, se sobrepusieron los segmentos del monitoreo 2001-2003 (Honey et al. 2004) sobre los mosaicos-FAD 2003 (por ser los de mayor resolución). Como dicho monitoreo se llevó a cabo por fotointerpretación estereoscópica, al observarse en pantalla no fue posible distinguir tantas categorías, por lo que las reagrupamos en tres clases de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 2. Reagrupación de las 11 clases de cobertura arbórea del monitoreo 2001-2003 (Honey et al. 2004), según los patrones de los mosaicos-FAD observados en pantalla

Interpretación convencional FAD 2001 y 2003 impresas		**Interpretación de mosaicos-FAD en pantalla**
Clases	**Apariencia según los mosaicos digitales 2003**	**Clases**
Cerrado	Bosque cerrado muy homogéneo. Todas las copas se tocan siempre	Bosque
Semicerrada	Bosque cerrado con ciertos puntos donde las copas no se tocan	
Semiabierta	Bosque cerrado o semicerrado con varios claros arbustivos	
Abierta	Predominan los arbustos y permanecen manchones de arbolado semicerrado o cerrado	Arbustivo
		Bosque
Muy abierta	Vegetación arbustiva con escasos árboles aislados. No se puede considerar bosque	Arbustivo
Matorral	Vegetación arbustiva predominante	
Regeneración	Es un proceso, no una cubierta. Según la altura, puede parecer como pastizal, arbustos o bosque cerrado	Arbustivo (puede variar)
Agrícola	Parcelas sin árboles ni arbustos de límites regulares y claros	Pastizal/Cultivo
Pastizal	Parcelas sin árboles ni arbustos de límites irregulares, claros o no	
Pastizal natural	No se distingue del anterior	
Deforestado	Es un proceso, no una cubierta. Según el grado de perturbación o el tiempo transcurrido de ella, puede parecer como bosque abierto, muy abierto, vegetación arbustivas o pastizal	Pastizal/Cultivo (puede variar)

Una vez definida la clave, y considerando la resolución de las imágenes, se interpretaron las Landsat a escala 1:60000, para obtener un mapa final adecuado a 1:75000; las Spot a 1:20000 para generar cartografía 1:25000; y, los mosaicos-FAD se interpretaron a 1:10000 para obtener cartografía a 1:20000. Debido a que fueron armados y georreferenciados con las ortofotos de INEGI, escala 1:20000, a pesar de la resolución de 1 metro no se puede mejorar más su precisión.

4.2.4 *Índice de vegetación*

Con las imágenes Landsat y Spot corregidas se generó el índice de vegetación (*Normalized Digital Vegetation Index* -NDVI), debido a su reconocida utilidad para discriminar áreas de vegetación vigorosa, senescente o sin vegetación, así como para reducir el efecto del relieve (Chuvieco 1990, Lillesand and Kiefer 2001). Los mosaicos-FAD no contaban con la banda infrarroja por lo que no se pudo obtener este producto.

4.2.5 *Clasificación digital no supervisada*

La clasificación no supervisada es un proceso mediante el cual los datos de una imagen forman agrupaciones (*clusters*) de igual respuesta espectral (Lillesand and Kiefer 2001). Aunque estos *clusters* tienen que ser posteriormente asignados a clases de cubiertas o usos del suelo, este método se puede aplicar sin tener un conocimiento previo del terreno (Rogan and Chen 2004). Las

variables para la clasificación pueden ser las bandas originales o las resultantes de alguna transformación (Chuvieco 1990). Existen varios procedimientos, más o menos exitosos, para obtener clasificaciones a partir del procesamiento digital de imágenes (Treitz and Rogan, 2004). Pero, de acuerdo con nuestros objetivos, optamos por métodos muy simples, de escaso preprocesamiento, para evitar añadir subjetividad por parte del ejecutante.

Se llevaron a cabo las clasificaciones no supervisadas de los 12 cortes, por el método de ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Análisis Technique*). Este algoritmo utiliza el método de mínima distancia espectral para formar las clases. Se hicieron varios ensayos para decidir el número óptimo de *clusters*, con el fin de incluir las variaciones espectrales debidas a cambios en las distintas condiciones de iluminación, humedad, topografía, etc. Se consideraron, por una parte, las bandas originales de cada imagen (excepto térmica) y, por la otra, el NDVI. Se establecieron 2, 3, 5 y 7 clases. A los resultados obtenidos se les sobrepusieron los segmentos del mapa de cubiertas del suelo generado en el convenio QR29 (Ramírez, 2004), prestando especial atención en los sitos que los autores conocemos bien en campo. A partir de ello, se determinó que la clasificación de 5 clases, a partir de las bandas originales, reagrupada en tres (bosque, arbustivo y pastizal/cultivo), se ajustaba mejor a la realidad de campo.

4.2.6 *Detección del cambio*

Se llevó a cabo la sobreposición de 10 pares de cortes clasificados: Landsat 2001-2003, clasificación automática e interpretación visual, para Área A y B (4); Spot 2003-2004, automático y visual, para Área A y B (4); mosaico FAD visual 2003-2004 (2). Se obtuvieron para cada uno de los cruces las matrices de cambio a nivel de área piloto y de predio. A la tabla de atributos resultante de la sobreposición se le aplicó una reclasificación para identificar y cartografiar los procesos de cambio entre cada par de imágenes, según el procedimiento señalado en el Anexo 2: Detección del cambio.

Este proceso no se aplicó a las clasificaciones no supervisadas de los mosaicos-FAD, debido a que su conformación requiere un alto grado de procesamiento que hace que los histogramas de cada toma se encuentren muy modificados. Además, las uniones entre una foto y otra son muy notorias y afectan los resultados, mostrando numerosas áreas transformadas que evidentemente se deben a cambios en las tonalidades entre las uniones de las fotos.

4.2.7 *Verificación de campo*

A partir de los resultados obtenidos del proceso anterior, se identificaron sitios dudosos que fueron verificados en campo del 2 al 5 junio de 2005. Además, se tomó una muestra aleatoria de puntos de control para evaluar la exactitud de las clasificaciones digitales y de la interpretación visual. En total se obtuvieron 119 puntos (30 x 30 metros), 36 para el Área A y 83 para la B. Para este proceso se consideraron las mismas tres clases: bosque, arbustivo y pastizal/cultivo.

4.2.8 *Evaluación de los resultados*

Los puntos obtenidos en campo se convirtieron a formato de celdas y se sobrepusieron con los diversos mapas de cubiertas. Para evaluar los mapas del 2004 se usaron los todos los puntos tomados en 2005. Para los mapas de 2001 y 2003 se modificaron sólo aquellos tomados en las áreas deforestadas de Ej. Francisco Serrato y Propiedad Federal, que en el respectivo año todavía eran bosques. A partir de ello, se generaron matrices de confusión con las que se calculó la confiabilidad global y otros índices de exactitud. La exactitud del mapa de cambios es el producto de la confiabilidad de cada clasificación individual (Mas 1999, Rogan y Chen 2004).

5. Resultados

5.1 Cubiertas del suelo

Para llevar a cabo la detección del cambio mediante técnicas post-clasificatorias, primero obtuvimos los mapas de cubiertas del suelo de cada fecha independiente. Debido a los años disponibles de las imágenes, sólo contamos con datos de 2003 para los tres tipos considerados. En esta fecha, los resultados de la interpretación visual muestran una notable correspondencia, a pesar de la diferencia en la escala de análisis (Figura 3). Para el Área A, los mapas generados a partir de Spot y mosaicos-FAD muestran exactamente las mismas proporciones: 84% de bosques, 10% de áreas arbustivas y 6% de pastizales y cultivos. La interpretación de Landsat varía un poco, 4% menos de bosque que se cuantifica como arbustivo, el pastizal ocupa el mismo porcentaje. Por el contrario, las clasificaciones no supervisadas, tanto de Landsat como de Spot, reportaron más superficie como bosque, 88 y 92% respectivamente, con la consecuente disminución de arbustivo y pastizal/cultivos. Aunque también hay una similitud aceptable comparando las dos imágenes clasificadas digitalmente, ya que no superan el 4% de diferencia entre una misma categoría (Tabla 3).

Tabla 3. Cubiertas del suelo en 2003 mediante interpretación visual y clasificación digital no supervisada de imágenes de satélite Landsat, Spot y mosaicos-FAD (en hectáreas, porcentaje entre paréntesis)

	Interpretación Visual						**Clasificación Digital**			
	Landsat 1:60000		Spot 1:20000		Mosaicos-FAD 1:10000		Landsat 1:60000		Spot 1:20000	
ÁREA A										
Bosque	810	*(80)*	854	*(84)*	858	*(84)*	897	*(88)*	941	*(92)*
Arbustivo	141	*(14)*	98	*(10)*	101	*(10)*	75	*(7)*	48	*(5)*
Pastizal/Cultivos	64	*(6)*	63	*(6)*	56	*(6)*	43	*(4)*	26	*(3)*
Total	1015	*(100)*	1015	*(100)*	1015	*(100)*	1015	*(100)*	1015	*(100)*
ÁREA B										
Bosque	964	*(38)*	905	*(36)*	975	*(39)*	1716	*(68)*	1207	*(48)*
Arbustivo	563	*(22)*	582	*(23)*	582	*(23)*	395	*(16)*	901	*(36)*
Pastizal/Cultivos	1003	*(40)*	1043	*(41)*	973	*(38)*	419	*(17)*	422	*(17)*
Total	2530	*(100)*	2530	*(100)*	2530	*(100)*	2530	*(100)*	2530	*(100)*

Por su parte, en la interpretación visual del Área B la discrepancia respecto a la misma clase entre Landsat, Spot y mosaicos-FAD es apenas de 1 a 3%: cerca de 40% de bosques, poco más de 20% de arbustos y 40% de pastizal cultivos. No obstante, la clasificación digital presentó una diferencia muy amplia respecto al análisis visual y, sobre todo, entre los propios resultados obtenidos con Landsat y con Spot. En el caso de los bosques, mientras que en la interpretación visual no superaron el 40% del área, en la clasificación no supervisada se registraron 48% y 68%. Cifras, estas dos últimas, que representan una diferencia de más de 500 hectáreas usando el mismo método aplicado a dos tipos de imágenes. Asimismo, la superficie de áreas predominantemente arbustivas descendió entre 150 y 200 hectáreas en la clasificación digital de Landsat y se incrementó en más de 300 hectáreas con la Spot. Lo cual significa más de 600 hectáreas clasificadas de forma diferente. Sólo los pastizales/cultivos se clasificaron de forma muy similar a partir de ambas imágenes, aunque muy por debajo de la interpretación visual (Tabla 3).

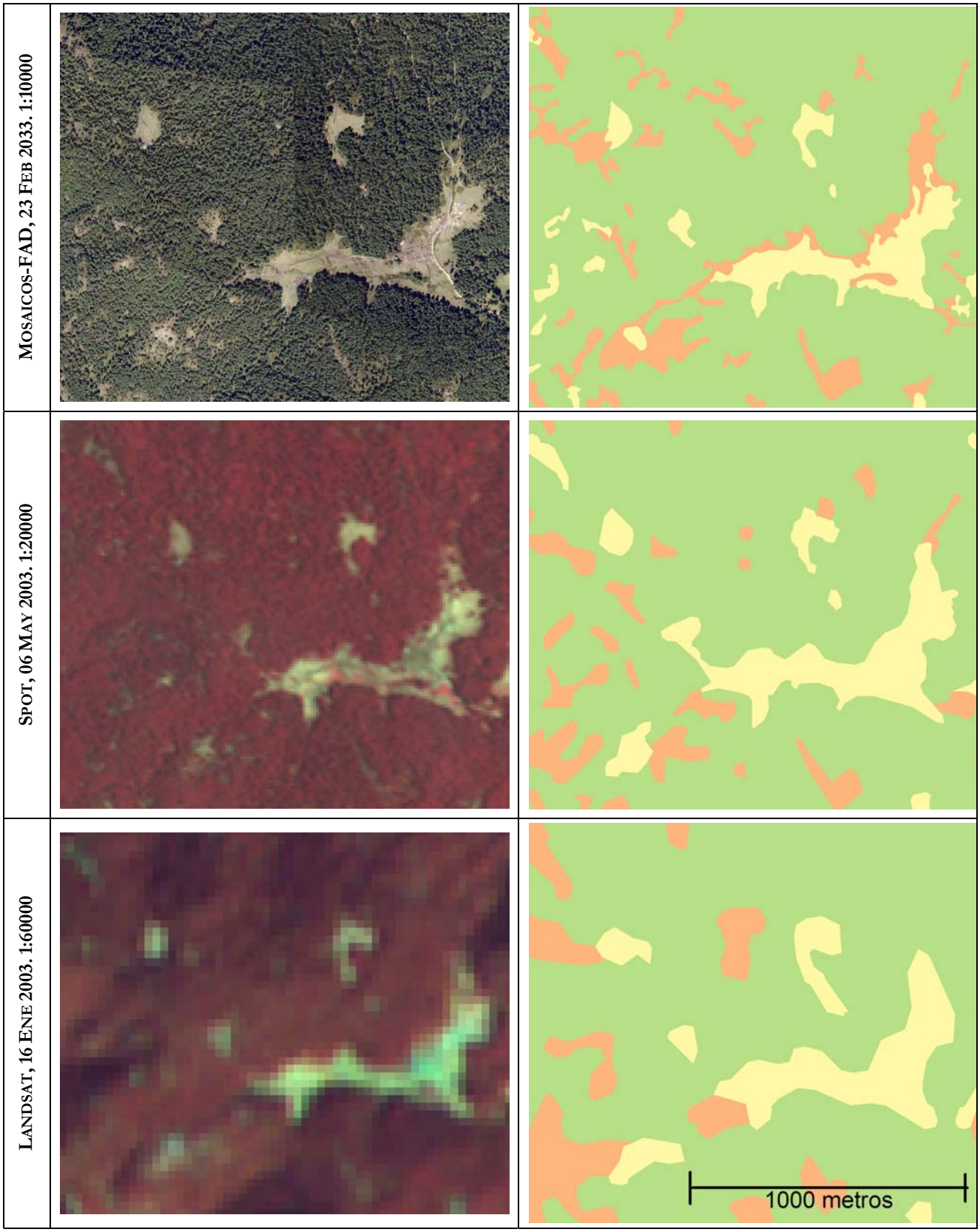


Figura 3. Ejemplo de interpretación visual con los tres tipos de imágenes. Llano de Villalobos, Ej. Cerro Prieto (Sierra Chincua). Los tres están ampliados a la misma escala para hacer notar el efecto de la resolución de las imágenes y del detalle de la interpretación. Verde = Bosques; Naranja = Arbustivo; Amarillo = Pastizal/Cultivos.

5.2 Detección del cambio

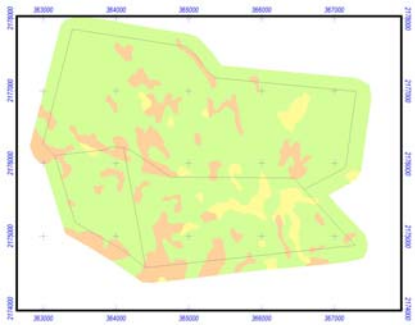
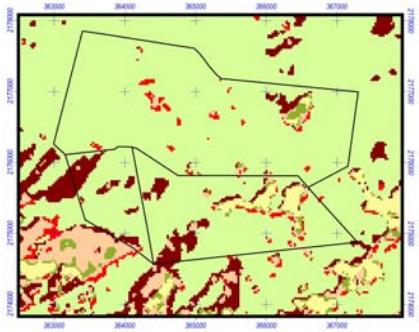
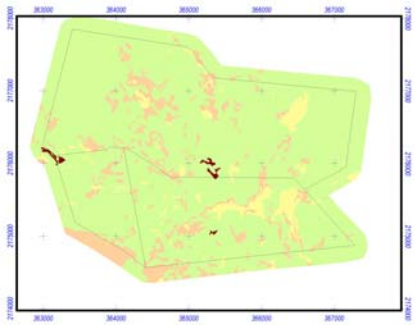
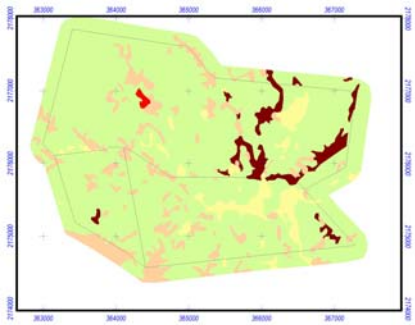
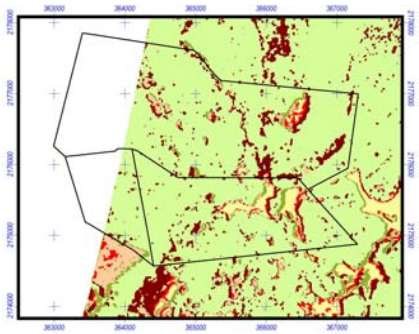
5.2.1 *Cambios 2001-2003*
A partir de la sobreposición de cada par de mapas de cubiertas del suelo de dos fechas distintas (mismo tipo de imagen y mismo método) obtuvimos datos de la superficie transformada en cada periodo. Considerando las fechas de obtención de las imágenes con que trabajamos, sólo son comparables los resultados obtenidos con Landsat y mosaicos-FAD, ambas de 2001 y 2003. Aunque debido a la diferencia de escalas (1:60000 y 1:10000 aproximadamente) es normal que los resultados no coincidan en su totalidad.

En el Área A, según la interpretación visual, no detectamos ningún cambio en las cubiertas del suelo utilizando Landsat, y sólo 3 hectáreas de pérdida del arbolado a partir de los mosaicos-FAD (Figura 4). Por su parte, en el Área B identificamos una pérdida de 218 hectáreas de bosque con Landsat y 228 hectáreas con mosaicos-FAD, todas ellas pertenecientes al Ejido Francisco Serrato. En su informe sobre la tala ilegal, WWF-México (2004) reportó que se habían deforestado aproximadamente 250 hectáreas en ese ejido durante ese mismo periodo. Con los mosaicos-FAD también registramos 15 hectáreas de vegetación arbustiva que se transformaron en pastizal o áreas de cultivos (Figura 5).

Por otro lado, el mapa de cambios resultante de las clasificaciones digitales no supervisadas de Landsat 2001 y 2003 muestra numerosas transformaciones. No obstante, la mayoría de ellas son falsos cambios debidos a diferencias en las condiciones de la toma de la imagen y a desplazamientos en el corregistro de las dos fechas. Lo anterior se aprecia en las áreas clasificadas como arbustivas en 2003 que corresponden a bosques de las zonas sombreadas de la vertiente NW de la sierra (clasificadas como bosque en 2001) y en los aparentes procesos paralelos de pérdida y ganancia en ambos lados de los pastizales o áreas de cultivo (Figura 4). En el Área B es aún más notorio, ya que, además de lo anterior, el método automatizado aplicado no fue adecuado para identificar cambios conocidos en el terreno y que la interpretación visual si reconoció (Figura 5).

5.2.2 *Cambios 2003-2004*
En cuanto a los cambios 2003-2004 obtenidos mediante interpretación visual de las imágenes Spot, destaca la identificación de una pérdida de 42 hectáreas de bosque del Área A, casi en su totalidad dentro de la Propiedad Federal. Aunque no se hace la comparación de los datos arrojados por los dos métodos, debido a que la imagen del 2004 disponible no cubre toda el área de interés, cabe hacer notar que a través de las clasificaciones digitales también se reconoce la perturbación que tuvo lugar en ese predio federal (Figura 4).

Por su parte, en el Área B la interpretación visual identificó que el proceso de pérdida de bosque continúa, ya que de 2003 a 2004 se destruyeron otras 19 hectáreas de bosque en el Ejido Francisco Serrato y, en menor medida, Ejido La Mesa. También se registraron alrededor de 80 hectáreas que recuperaron su cubierta arbustiva y, opuestamente, 50 hectáreas donde se revirtió ese proceso de recuperación, pasando de arbustivo a pastizal (Figura 5). Al igual que en Área A, los valores entre ambos métodos son muy diferentes, sobre todo debido a los falsos cambios ocasionados por los problemas en el corregistro de las imágenes de las dos fechas.

	Mapas resultantes		Matrices de cambio	
	Interpretación visual	Clasificación digital	Interpretación visual	Clasificación digital
Landsat 2001-2003				
Mosaicos FAD 2001-2003				
Spot 2003-2004				

Matrices de cambio – Interpretación visual

2001 / 2003	Bos.	Arb.	P/C	**Total 2001**
Bos.	810			**810**
Arb.		141		**141**
P/C			64	**64**
Total 2003	**810**	**141**	**64**	**1015**

Matrices de cambio – Clasificación digital (Landsat 2001-2003)

2001 / 2003	Bos.	Arb.	P/C	**Total 2001**
Bos.	886	56	1	**943**
Arb.	9	18	19	**46**
P/C	2	1	23	**26**
Total 2003	**897**	**75**	**43**	**1015**

Matrices de cambio – Interpretación visual (Mosaicos FAD 2001-2003)

2001 / 2003	Bos.	Arb.	P/C	**Total 2001**
Bos.	857	3		**860**
Arb.		98		**98**
P/C	0	0	56	**57**
Total 2003	**857**	**101**	**56**	**1015**

Matrices de cambio – Interpretación visual (Spot 2003-2004)

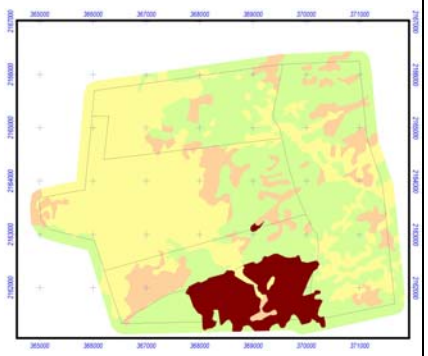
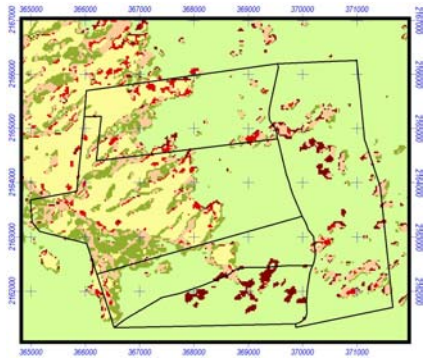
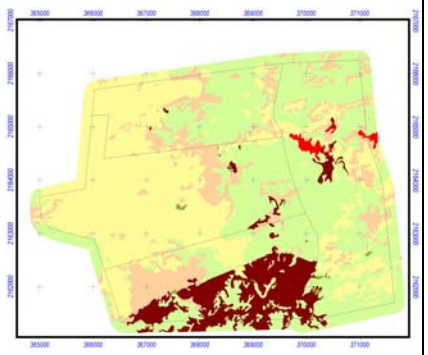
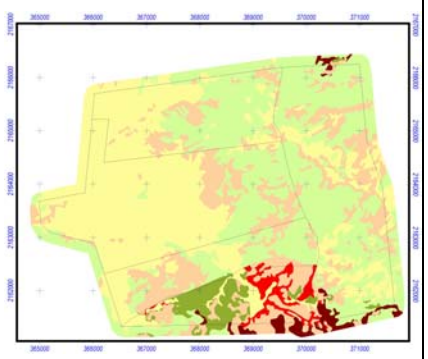
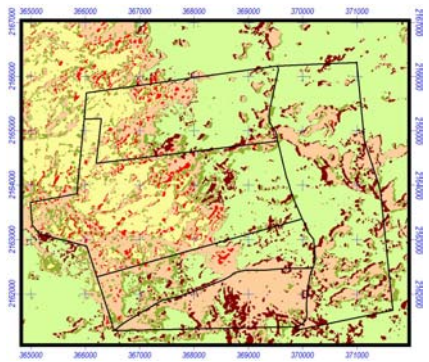
2003 / 2004	Bos.	Arb.	P/C	**Total 2003**
Bos.	812	42		**854**
Arb.		95	3	**98**
P/C			63	**63**
Total 2004	**812**	**137**	**66**	**1015**

Matrices de cambio – Clasificación digital (Spot 2003-2004)

2003 / 2004	Bos.	Arb.	P/C	**Total 2003**
Bos.	668	58	8	**734**
Arb.	14	19	10	**43**
P/C	3	4	20	**26**
Total 2004	**684**	**81**	**38**	**1015**[1]

[1] Incluye 212 hectáreas sin datos en 2004 que no se compararon

Figura 4. Mapas de cambios y matrices de transición del Área A. Bos. = Bosques; Arb. = Arbustivo; P/C = Pastizal/Cultivo

	Mapas resultantes		Matrices de cambio	
	Interpretación visual	Clasificación digital	Interpretación visual	Clasificación digital
Landsat 2001-2003				
Mosaicos FAD 2001-2003				
Spot 2003-2004				

Interpretación visual – Landsat 2001-2003

2001/ 2003	Bos.	Arb.	P/C	**Total 2001**
Bos.	964	218		**1182**
Arb.		345		**345**
P/C			1003	**1003**
Total 2003	**964**	**563**	**1003**	**2530**

Clasificación digital – Landsat 2001-2003

2001 / 2003	Bos.	Arb.	P/C	**Total 2001**
Bos.	1610	81	3	**1694**
Arb.	94	197	48	**339**
P/C	12	117	368	**498**
Total 2003	**1716**	**395**	**419**	**2530**

Interpretación visual – Mosaicos FAD 2001-2003

2001 / 2003	Bos.	Arb.	P/C	**Total 2001**
Bos.	974	228	10	**1212**
Arb.	1	349	15	**365**
P/C	0	5	948	**953**
Total 2003	**975**	**582**	**973**	**2530**

Interpretación visual – Spot 2003-2004

2003 / 2004	Bos.	Arb.	P/C	**Total 2003**
Bos.	886	17	2	**905**
Arb.	4	528	50	**582**
P/C	4	77	962	**1043**
Total 2004	**893**	**622**	**1015**	**2530**

Clasificación digital – Spot 2003-2004

2003 / 2004	Bos.	Arb.	P/C	**Total 2003**
Bos.	991	214	1	**1207**
Arb.	152	671	78	**901**
P/C	1	95	326	**422**
Total 2004	**1144**	**980**	**405**	**2530**

Figura 5. Mapas de cambios y matrices de transición del Área B. Bos. = Bosques; Arb. = Arbustivo; P/C = Pastizal/Cultivo

5.3 Evaluación de la confiabilidad

En cada mapa o imagen clasificada existen dos tipos de errores: 1) geométricos, o de posición de los elementos; y 2) temáticos, o de atributo de clase. Ambos están muy relacionados entre sí, por lo que su separación es difícil. Al hacer evaluación de exactitud un tercer error se relaciona con la heterogeneidad que puede haber dentro de un polígono (Mas et al. 2003), aunque ésta depende de la escala de análisis.

5.3.1 *Corrección geométrica*

Se considera que la corrección geométrica de una imagen es correcta cuando el valor RMS es menor que la resolución de la imagen en cuestión (Chuvieco 1995, Janssen and Weir 2001). De acuerdo con esto, la corrección geométrica de las imágenes Landsat es la de mayor exactitud, ya que el RMS fue de 22 y 28 metros, ambos menores que los 28.5 metros de resolución de la imagen. Les siguen las Spot con RMS de 14 y 21 metros, poco más de 1 y 2 píxeles, respectivamente. Y por último los mosaicos 2001, con RMS equivalente a 4 píxeles (Tabla 4).

Tabla 4. Exactitud de la corrección geométrica y verificación de la corrección

Imagen			Corrección geométrica		Verificación de la corrección		
	Año	**Corte**	**Puntos control**	**RMS error**	**No. Puntos verificados**	**Error promedio**	**Error máximo**
LANDSAT 28.5 m	2001	Área A	78	28	33	30 m	68 m
		Área B			58	8 m	54 m
	2003	Área A	68	22	33	13 m	68 m
		Área B			62	12 m	85 m
SPOT 10 m	2003	Área A	79	21	33	53 m	163 m
		Área B			61	38 m	143 m
	2004	Área A	36	14	27	21 m	44 m
		Área B			56	17 m	57 m
MOSAICOS -FAD 1 m	2001	Área A	72	4	32	16 m	53 m
		Área B	95	4	59	27 m	152 m
	2003	Área A	*		34	4 m	26 m
		Área B			60	3 m	80 m

* No fue necesario. Los mosaicos 2003 están bien alineados a las ortofotos, ya que se elaboraron con base en ellas mismas y utilizando el mismo software (Erdas 8.6).

Incluso después de las correcciones aceptables según el RMS, en la mayoría de los cortes se observaron desplazamientos de diferentes magnitudes y distribuidos de forma irregular. De tal forma, llevamos a cabo una verificación manual de cada corte en relación a las ortofotos de INEGI. Así, para las imágenes Landsat, encontramos un valor promedio de desplazamiento entre 8 y 30 metros, con un máximo de 85 metros (3 pixeles) en un punto del Área B 2003. En las Spot, a pesar de su mayor resolución, el valor promedio de desplazamiento fue incluso mayor, de 17 a 53 metros, llegando a medir un desfase máximo de 163 metros (16 pixeles) en el Área A 2003, es decir 16 píxeles (Tabla 4).

Por su parte, los mosaicos del 2001 y 2003 presentan valores muy diferentes, debido al método con que fue construido cada uno de ellos (armado manual en Adobe Photoshop y construcción de mosaicos en Erdas, respectivamente). Los puntos verificados en el Área A 2001 tienen un desplazamiento promedio de 13 metros, con un máximo de 53 metros (53 píxeles), mientras que

el Área B 2001 el promedio es de 27 metros y el máximo de 152 metros (152 píxeles). Por el contrario, los mosaicos 2003 presentan los errores de desplazamiento más bajos de todos, con promedios de 3 y 4 metros, y máximos de 26 y 85. Aunque se debe señalar que este último valor es un caso único, debido a un error muy evidente del montaje de una de las fotos de la parte sureste del corte Área B 2003 (Tabla 4).

Mediante el método anterior, analizamos la exactitud cartográfica de los predios coincidentes de los monitoreos previos y nuestro trabajo. Los puntos verificados del mapa de cambios del monitoreo 2001-2003, llevado a cabo por fotointerpretación convencional, presentan un error promedio de 50 y 80 metros, alcanzado desplazamientos de más de 150 metros en varios sitios. Por su parte, los mapas del monitoreo 2003-2004, elaborado por clasificación no supervisada de imágenes Ikonos, se alinean bien a las ortofotos, con valores promedio de 2 y 5 metros para las Áreas A y B, respectivamente, y desplazamientos máximos de 4 y 11 metros para esos mismos lugares (Tabla 5).

Tabla 5. Verificación manual de la corrección geométrica de los monitoreos previos, 2001-2003 y 2003-2004

Monitoreo	Corte	No. Puntos verificados	Error promedio	Error máximo
Interpretación convencional FAD 2001-2003	Área A	10	49	90
	Área B	12	82	170
Clasificación no supervisada Ikonos 2003-2004	Área A	6	2	4
	Área B	19	5	11

5.3.2 *Exactitud temática*

La exactitud temática se refiere a la probabilidad de que una clase asignada en el mapa corresponda a esa misma clase en el terreno. De tal forma, a través de la sobreposición de los puntos obtenidos en campo con cada uno de los mapas, se generaron las matrices de confusión y se estimó la exactitud global cada mapa (Anexo 1: Matrices de confusión).

Dicha exactitud global representa el porcentaje de puntos de campo correctamente clasificados en el mapa en relación al total de la muestra, es decir la suma de la diagonal de la matriz (Janssen and Gorte 2001, Mas et al. 2003). Así, para los mapas generados por interpretación visual encontramos valores entre 61 y 78% de confiabilidad. Los más altos, 78%, corresponden a los de Landsat Área A, 2001 y 2003; los del Área B es estas mismas imágenes sólo alcanzaron 63 y 64% de exactitud (Tabla 6).

Los siguientes valores más elevados son de los mapas de interpretación visual de los de mosaicos-FAD 2003, con 69 y 72% de confiabilidad, Áreas A y B, respectivamente. Los de mosaicos-FAD 2001 presentan una exactitud de 63 y 67%. Por su parte, para los mapas obtenidos de las imágenes Spot Área A la evaluación estimó en 68 y 66% su confiabilidad, 2003 y 2004, en ese orden. Y, valores ligeramente más bajos para los de Spot Área B, con 61 y 64% (Tabla 6).

En cuanto a la evaluación de los mapas obtenidos por clasificación digital no supervisada, los valores de exactitud son considerablemente más bajos, oscilando entre 42 y 72%. El porcentaje más elevado corresponde a la clasificación de Spot 2004 Área B. El resto no supera el 60% de confiabilidad (Tabla 6).

Tabla 6. Porcentaje estimado de exactitud global y coeficiente de Kappa de cada mapa independiente

Imagen			Interpretación visual		Clasificación no supervisada	
	Año	Corte	Exactitud global	Coef. de Kappa	Exactitud global	Coef. de Kappa
LANDSAT 1:75000	2001	Área A	78	0.66	52	0.12
		Área B	64	0.46	58	0.27
	2003	Área A	78	0.66	44	0.08
		Área B	63	0.46	49	0.14
SPOT 1:25000	2003	Área A	68	0.49	50	0.13
		Área B	61	0.42	42	0.04
	2004	Área A	66	0.49	52	0.28
		Área B	64	0.45	72	0.55
MOSAICOS -FAD 1:20000	2001	Área A	63	0.41		
		Área B	67	0.49		
	2003	Área A	69	0.50		
		Área B	72	0.58		

Se calculó también el coeficiente de Kappa, el cual evalúa un mapa en relación a uno teórico al cual se le hubieran asignado las clases al azar. Por ello, más que para evaluar la exactitud de cada mapa, se recomienda para comparar los resultados obtenidos por diferentes métodos o insumos (Janssen and Gorte 2001, Mas et al. 2003). En los mapas obtenidos por interpretación visual los valores de Kappa van de 0.41 a 0.66, lo que significa que son, respectivamente, 40 o 66% mejores que un mapa clasificado de forma aleatoria. Por su parte, en las clasificaciones no supervisadas los valores de Kappa son muy inferiores oscila entre 0.04 y 0.55. Estos valores extremos corresponden a las imágenes Spot de Área B, 2003 y 2004, lo cual es un reflejo del desfase en la corrección geométrica, más que de una asignación incorrecta de clase.

Por último, se considera que la exactitud general de un mapa de cambio obtenido por métodos postclasificatorios equivale al producto de la exactitud de cada clasificación individual (Mas 1999). Así, los mapas de cambio generados a partir de mapas interpretados visualmente presentan valores de exactitud entre 63 y 78%. Y, los obtenidos por la sobreposición de clasificaciones digitales muestran valores de 51 a 57%.

Tabla 7. Porcentaje estimado de exactitud global de los mapas de cambio

	Corte	Interpretación visual	Clasificación no supervisada
Landsat 2001-2003	Área A	78	48
	Área B	64	54
Spot 2003-2004	Área A	67	51
	Área B	63	57
Mosaicos-FAD 2001-2003	Área A	66	
	Área B	70	

5.4 Costos

Dado que el monitoreo del Fondo Monarca se pretende realizar anualmente, los costos en tiempo y dinero son elementos importantes a considerar.

5.4.1 *Tiempo de obtención de resultados*
En todos los procesos que llevamos a cabo registramos el tiempo requerido para su ejecución. Para llevar a cabo la corrección geométrica de las imágenes, que incluyó establecimiento de puntos de control, corte por área de estudio y verificación de la corrección, requerimos 4.5 horas efectivas por cada una. Dichas horas efectivas significan sin contar descansos, comidas o cualquier tipo de interrupción, por lo que georreferenciar cada imagen nos llevó un día completo de trabajo de una persona (Tabla 8).

Tabla 8. Tiempo aproximado de ejecución de procesos aplicados (horas)

Imagen			**Corrección Geométrica**		**Interpretación visual**		**Detección de cambio**		**Eval. Exactitud**
	Año	Corte	EPC	VC	GRV	IVIS	DCIV	DCCD	
LANDSAT	2001	Área A	3.0	0.5		2.0	2.0	1.5	1.0
		Área B		1.0		1.5	1.5	1.5	1.0
	2003	Área A	3.0	0.5		1.5	1.5	1.5	1.0
		Área B		1.0		3.0	1.5	1.5	1.0
SPOT	2003	Área A	3.0	0.5	1.0	8.5	1.5	1.5	1.0
		Área B		1.0	1.5	5.0	1.5	1.5	1.0
	2004	Área A	3.0	0.5		5.0	1.5	1.5	1.0
		Área B		1.0		8.5	1.5	1.5	1.0
MOSAICO -FAD	2001	Área A	3.0	0.5	1.0	7.0	1.5	-	0.5
		Área B	3.0	1.0	1.0	10	1.5	-	0.5
	2003	Área A	-	0.5		14	1.5	-	0.5
		Área B		1.0		10	1.5	-	0.5
	Total		**18 hrs**	**9 hrs**	**4.5 hrs**	**76 hrs**	**18.5 hrs**	**12 hrs**	**10 hrs**

EPC = Establecimiento de puntos de control
VC = Verificación de la corrección
GRV = Georreferenciación virtual
IVIS = Interpretación visual en pantalla
DCIV = de interpretación visual para la detección del cambio
DCCD = Preparación de los mapas de clasificación digital para la detección del cambio

Por otra parte, la interpretación visual (delimitación y edición de los polígonos) fue el proceso donde se invirtió más tiempo, más a mayor resolución de las imágenes. Para interpretar los mosaicos-FAD de las dos fechas ocupamos 43 horas efectivas, para las Spot 29.5 horas y para las Landsat 8 horas (Tabla 8). Esto significa cerca de 7, 5 y 1 días de trabajo intensivo para una sola persona, considerando 6 horas efectivas por día. Si lo extrapolamos a la totalidad de la RBMM, tenemos que un sólo interprete habría requerido 6 meses (23 semanas) para realizar este mismo análisis con los mosaicos-FAD (o imágenes de resolución similar) 4 meses para las Spot y 1 mes con las Landsat.

En la detección del cambio, la mayor parte del tiempo se requiere en la preparación de las tablas de atributos para realizar la sobreposición y en la limpieza y reclasificación de los resultados de estas. Así, estimamos un promedio de 1.5 horas por cada mapa generado. Por lo tanto este proceso nos ocupó más de 30 horas efectivas de trabajo. La evaluación de la exactitud de cada

mapa individual, que incluye la elaboración de la matriz de confusión y el cálculo de los índices nos llevó en promedio media hora por mapa (Tabla 8).

En la tabla anterior no se señala el tiempo requerido para el cálculo del NDVI ni de las clasificaciones no supervisadas, ya que fueron los procesos que menos tiempo consumieron. El procesamiento en sí, dependiendo de la capacidad del equipo de cómputo con que se cuente, requiere de unos pocos a un par de decenas de minutos. Para este trabajo calculamos que todo el proceso (aplicación del programa, revisión y clasificación de los resultados) nos llevó un promedio de 40 minutos efectivos por corte. Aunque no cuantificamos el tiempo invertido en ensayar el cálculo con los diversos parámetros que ofrecía el programa (Anexo 3: Archivos y tiempos de procesamiento).

En estos tiempos no consideran el empleado en el diseño y discusión de cada proceso, ni el invertido para la presentación de los resultados, que en la mayoría de los casos fue casi igual o superior que el proceso mismo.

5.4.2 *Precio de los insumos*

Aunque no es un resultado propio de nuestro trabajo, presentamos la siguiente tabla por considerar que hace una comparación muy actualizada de los costos de las principales imágenes obtenidas por sensores remotos (ver http://edc.usgs.gov/products/satellite.html, y http://www.spotimage.com). En gris resaltamos los costos de las imágenes utilizadas en el presente trabajo y en los monitoreos llevados a cabo para el Fondo de Conservación Mariposa Monarca (FCMM) en 2001-2003 y 2003-2004 (Tabla 9).

Tabla 9. Comparación de costos promedio por km², para productos corregidos de diferentes tipos de imágenes de sensores remotos (tomado de: Rogan and Chen 2004)

Resolución espacial	Sensor	Cobertura de cada escena (km²)	Costo estimado de adquisición por km² (USD)	Costo estimado de preprocesamiento por km² (USD)
Baja (>250 m)	MODIS	5,428,900	0.00000	0.000050
	Orbview-1	3,750,000	0.00013	0.000060
	NOAA AVHRR	5,760,000	0.00015	0.000078
Media (20–250 m)	Landsat MSS	34,000	0.00880	0.004400
	Landsat TM 4–5	34,000	0.01620	0.008100
	Landsat ETM 7	**34,000**	**0.02130**	**0.010650**
	IRS (XS)	21,900	0.11400	0.028000
	SPOT 1-3	3,600	0.41600	0.150000
	ASTER	3,600	0.01520	0.007600
	RADARSAT	1,000	2.53000	1.200000
Alta (<20 m)	**IKONOS**	**121**	**29.00000**	**14.500000**
	SPOT 5	**3,600**	**0.73000**	**0.270000**
	IRS (Pan.)	4,900	0.33000	0.080000
	Quickbird	400–1,600	39.00000	19.500000
	Fotografía Color-IR de archivo (1:40000)	83	0.50000	0.175000
	Fotografía Color-IR nueva (1:40000)	**83**	**5.50000**	**2.750000**
	Imágenes aéreas digitales (1 m)	Variable	50.00000	25.000000
	AVIRIS (20 m)	99	5.00000	2.500000
	LIDAR	Variable	74.00000	37.000000

Los autores de la tabla anterior señalan en menos de 9 dólares el costo de adquisición y procesamiento de fotografías aéreas en color nuevas, escala 1:40000. Pero, según los proveedores locales el costo de las fotografías aéreas digitales y el mosaico de estas, que se han venido usando para los monitoreos del FCMM, es de 25 dólares en promedio por km^2 (Armando Peralta com pers.).

6. Discusión

6.1 Los métodos aplicados

6.2.1 *Interpretación visual*
Teniendo en cuenta los datos generados en la evaluación de la exactitud (entre 60 y 80%) y lo reportado en otros trabajos (Mas y Ramírez 1996), podemos afirmar que los resultados obtenidos por fotointerpretación son más confiables que los de clasificaciones digitales. Para este análisis comparativo elegimos tres clases de cubiertas del suelo que se ajustaron bien tanto a las imágenes de 28.5 metros de resolución como a las de 1 metro. Aunque, para la totalidad de la Reserva tal vez convendría considerar alguna, o algunas, más.

Respecto a los dos métodos de fotointerpretación, convencional o en pantalla, ésta última presenta dos ventajas: 1) al interpretar y digitalizar directamente en pantalla, se evitan varios pasos en los que se pueden acumular errores; 2) se puede trabajar simultáneamente sobre varios compuestos de color u otros tratamientos digitales (índices, filtrados, etc.), que ayudan a distinguir mejor unas clases de otras. Pero tiene también una desventaja muy importante: la falta de estereoscopía (Chuvieco 1990).

Para llevar a cabo la fotointerpretación se deben considerar tres aspectos: 1) experiencia profesional del intérprete, tanto en el método como en tema y sitio a fotointerpretar; 2) las limitaciones que puedan tener los insumos para mostrar los elementos de interés; y 3), la calidad de los lineamientos de interpretación (claridad de la diferencia de las categorías). En el caso de programas de monitoreo, esos tres puntos son fundamentales para asegurar la replicabilidad de un trabajo (Janssen 2001).

Teniendo en cuenta eso último, consideramos que las clases utilizadas para el monitoreo 2001-2003 (Honey et al 2004) no son replicables por diferentes personas o a partir de diferentes insumos. Eso puede ser un problema serio para la continuidad del monitoreo del FCMM, ya que en caso de cambiar de intérprete o de insumos los resultados no serían comparables a los años anteriores. (De hecho esto ya ha sucedido: el monitoreo 2003-2004 (Fay and Olander 2004) no tiene relación alguna con el 2001-2003). Incluso al sobreponer los segmentos del mapa de cobertura arbórea del 2003 sobre el mosaico-FAD 2003, hecho con las mismas fotos usadas para generar dicho mapa, no encontramos la diferencia entre las clases delimitadas, salvo los pastizales (que, por otra parte, aparecen irregularmente desfasados) (Figura 6).

De tal forma, recomendamos revisar esa clasificación y describir claramente los lineamientos objetivos que deberían seguir otros posibles intérpretes. Aunque por el mismo hecho de ser "interpretación" siempre existe cierto grado de subjetividad, el cual, al igual que la complejidad del proceso, es mayor a mayor número de clases.

.

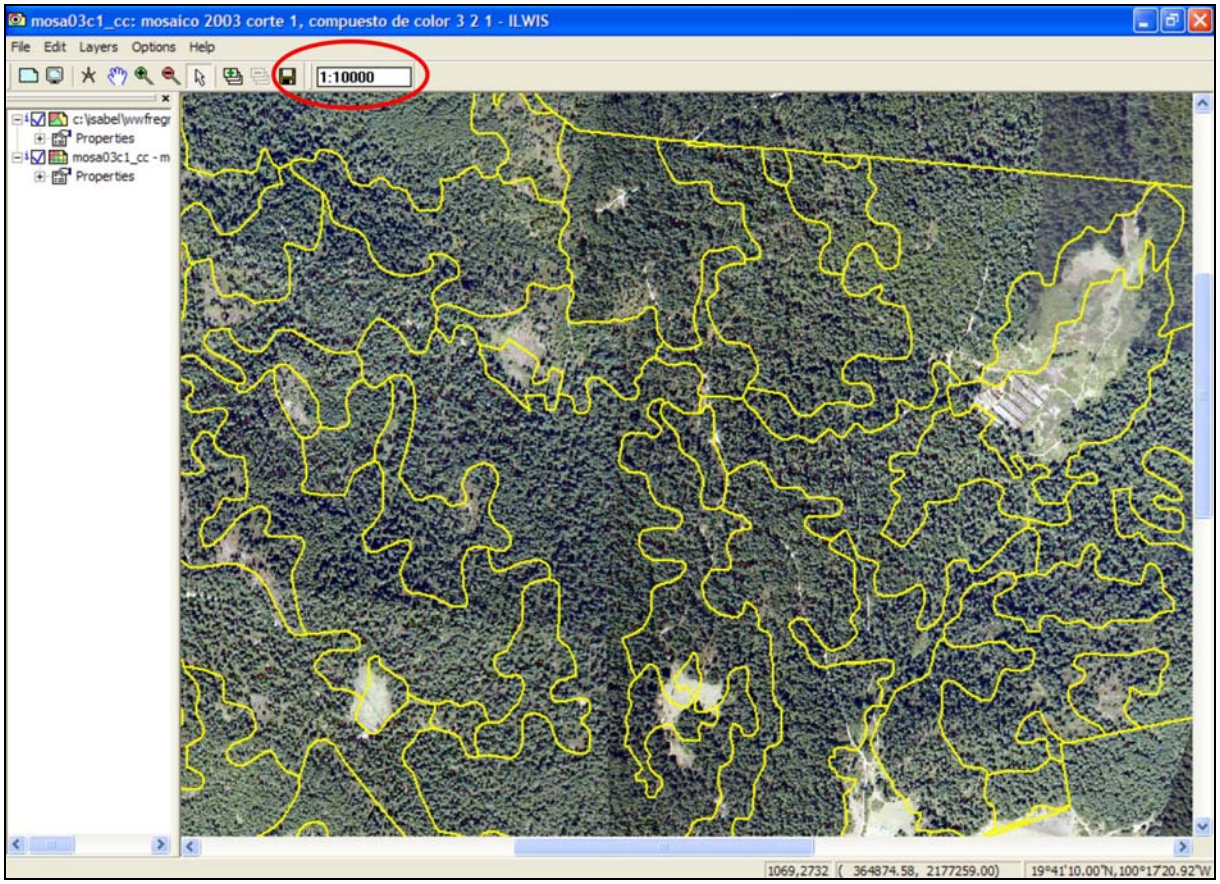


Figura 6. Segmentos del mapa de cobertura arbórea 2003 del monitoreo 2001-2003 (Honey et al. 2004), sobre el mosaico FAD de esa misma fecha

6.2.2 *Clasificación no supervisada*

Este es método de clasificación menos subjetivo, ya que no depende de categorías ni de campos de entrenamiento decidas por un usuario, las cuales con cualquier variación pueden modificar los resultados. Sin embargo, se reconoce que éste método tiene la desventaja de que los *clusters* identificados no tienen una relación directa con las categorías reales (un mismo tipo de cubierta del suelo puede separarse en varios grupos, o varios tipo de cubierta incluirse en uno sólo). (Chuvieco 1990, Janssen and Gorte 2001).

Los resultados obtenidos no fueron muy satisfactorios. Aunque los valores de exactitud global no fueron del todo malos (entre 40 y 72%), se en los mapas se detectan fácilmente varios errores de clasificación. Por ejemplo, en las imágenes Landsat del 2003 se confunden los bosques de pino-encino de las laderas W con áreas arbustivas. En el área de alta fragmentación de cubiertas del suelo, muy frecuentes en el Área B, hay mucha confusión en la clasificación. Lo anterior sugiere que sería conveniente aplicar procedimientos diferenciados según la variabilidad y complejidad de las cubiertas reales del terreno. Pero ello implica cierto grado de subjetividad al decidirse por un corte u otro, o por más o menos clases, y requeriría del conocimiento del terreno por parte de quien lleve a cabo la clasificación.

Aunque se aplicó la clasificación no supervisada a los mosaicos-FAD no cuantificamos sus estadísticas, ya que los errores debidos al procesamiento de las fotos y al armado de los mosaicos eran muy evidentes y la confusión entre bosques y arbustos elevada (el lado con más luz de los bosques densos se clasifica como arbustivo, así como sombras de áreas claramente arbustivas se clasificaron como bosques) (Figura 7). Con lo cual podemos concluir que los mosaicos-FAD son útiles para el análisis visual pero no para clasificaciones espectrales.

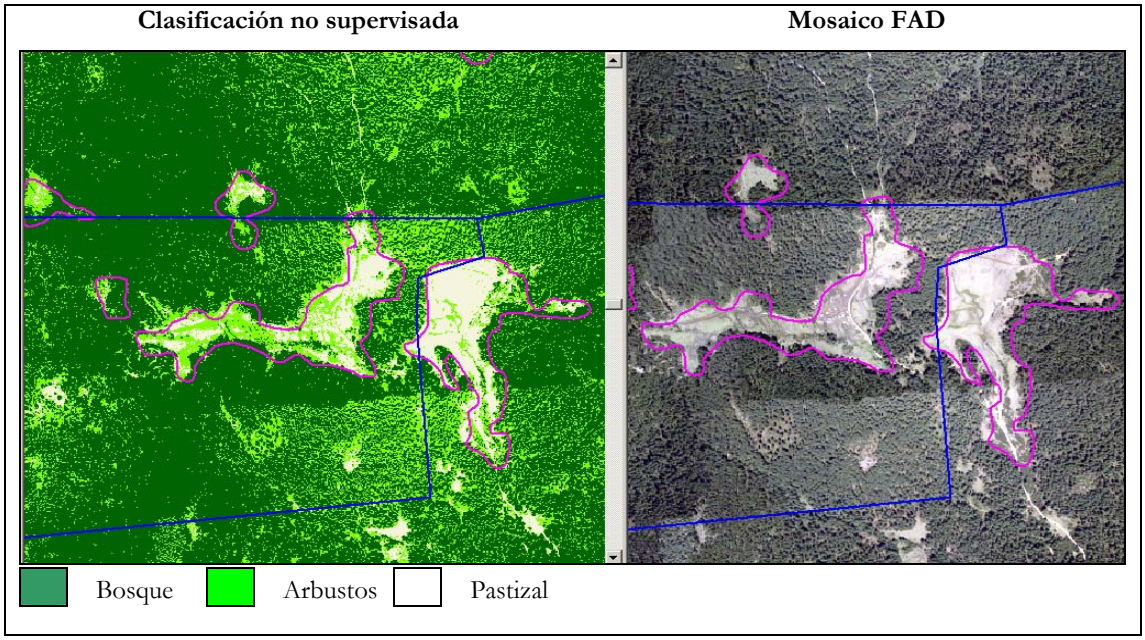


Figura 7. Ejemplo del resultado de la clasificación no supervisada de mosaico FAD

6.2 Detección del cambio

El método de interpretación interdependiente ha demostrado su utilidad para evitar errores de clasificación, tanto en las estimaciones de estado en cierta fecha como de detección de cambio. Dicho método reduce considerablemente los errores causados por las diferencias geométricas de las imágenes de dos o más fechas, así como aquellos que se desprenden de los cambios en los contrastes entre escenas o a cambios estacionales de la vegetación. Pero, tiene la desventaja de que requiere gran cantidad de tiempo para su aplicación (FAO 2001).

Por el contrario, la detección de cambio con las clasificaciones digitales fue muy rápida, pero presenta una notable confusión en categorías de características heterogéneas, como son las áreas arbustivas, y si no hay una alineación perfecta entre las imágenes de las dos fechas se generan numerosos falsos cambios. Esto último documentado también por Fay and Olander (2004) para el monitoreo 2003-2004.

Por otra parte, los resultados de cada uno de los métodos aplicados, 5 de este estudio comparativo y dos de los monitoreos anteriores, muestran valores muy diversos. En las tablas 10 y 11 mostramos los datos de detección de cambio arrojados por los diferentes procedimientos para los Ejidos Cerro Prieto y La Mesa (únicos dos que coinciden en todos). De esas tablas la única

conclusión que podemos extraer es la baja correlación entre cifras, excepto las 21 hectáreas perdidas de bosque en La Mesa, según la fotointerpretación tanto de los mosaicos-FAD como de las fotografías áreas impresas.

Tabla 10. Comparación de los resultados obtenidos por 7 métodos para el Ejido Cerro Prieto, Senguio, Michoacán

Clase de cambio	2001-2003				2003-2004		
	Landsat (digital)	**Landsat** (visual)	**Mosaico-FAD**	*FAD* [1]	**Spot** (digital)	**Spot** (visual)	*Ikonos* [2]
Pérdida bosque	28		0		21	5	*4.6*
Pérdida arbustivo	7				5		
Recuperación arbustivo	6				11		*7.3* [3]
Bosque sin cambio	230	214	237	*204*	241	225	*232.9*
Arbustivo sin cambio	10	46	33	*20*	7	33	
Pastizal sin cambio	19	40	30	*18*	16	37	*25.8*
Sin datos				*58*			
Total	300	300	300	*301*	301	300	*270.6*

(1) Honey et al. 2004, mapas SHP reagrupados según Tabla 2
(2) Fay and Olander, 2004. Nótese que estiman el tamaño del predio en 30 hectáreas menos.
(3) Considerado como "error" del método

Tabla 11. Comparación de los resultados obtenidos por 7 métodos para el Ejido La Mesa (Ampl.), San José del Rincón, Estado de México

Clase de cambio	2001-2003				2003-2004		
	Landsat (digital)	**Landsat** (visual)	**Mosaico-FAD**	*FAD* [1]	**Spot** (digital)	**Spot** (visual)	*Ikonos* [2]
Pérdida bosque	34	12	22	*21*	84	13	*39*
Pérdida arbustivo	6		15		1	5	
Recuperación arbustivo	17		3		50	5	*3* [3]
Bosque sin cambio	619	422	445	*511*	447	407	*389*
Arbustivo sin cambio	49	108	85	*53*	145	161	
Pastizal sin cambio	2	186	157	*142*	1	136	*222*
Sin datos							
Total	727	727	727	*727*	727	727	*659*

(1) Honey et al. 2004, mapas SHP reagrupados según Tabla 2
(2) Fay and Olander, 2004a (Informe preliminar. El informe final señala una superficie total para este ejido casi 200 hectáreas menos que en nuestro cálculos y en los reportes de WWF)
(3) Considerado como "error" del método

6.3 Evaluación de la exactitud

Tomando en cuenta los problemas metodológicos del diseño de la muestra y toma de puntos de verificación señalados por Mas et al. (2003), consideramos que la evaluación de nuestros mapas subestima su confiabilidad. Ya que la mayoría de los puntos fueron tomados muy cerca de los límites entre clases, por lo que su fallo se debe más a la corrección geométrica de las imágenes que a la correcta delimitación de categorías de cubiertas (Figura 8).

Por otra parte, aunque los valores de exactitud global (menores de 80%) y de coeficiente Kappa (menores de .70) no parecen muy satisfactorios, si se encuentran en el orden de los reportados en la bibliografía (Mas y Ramírez 1996, Mas 1999).

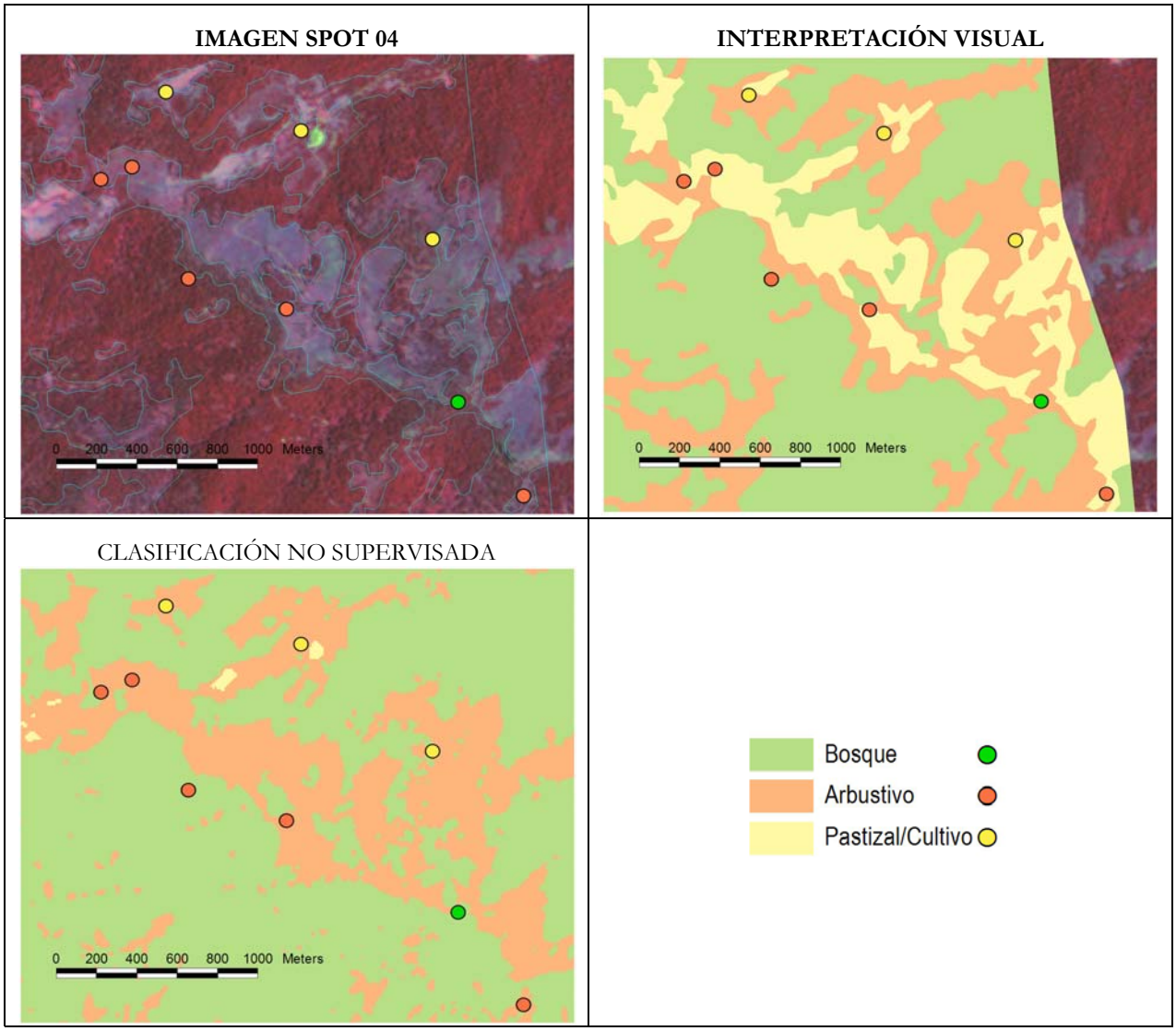


Figura 8. Puntos de verificación en campo 2005 en relación a la imagen Spot 2004, su interpretación visual y su clasificación no supervisada. En el ejemplo (en Ej. La Mesa) ninguno de los 9 puntos de campo coincide con la interpretación visual y sólo 4 con la clasificación digital.

6.4 Resumen: tablas comparativas

Después llevar a cabo este análisis comparativo y de revisar los trabajos que se han llevado a cabo para el monitoreo del FCMM, sigue siendo difícil señalar un método específico como el más adecuado para satisfacer los requerimientos del Fondo. Todos los métodos presentan ventajas y desventajas. Por lo cual recomendamos evaluar la posibilidad de un método mixto, donde se combinen las ventajas de la interpretación visual y de las imágenes espectrales, en función de la escala de interés y de los recursos que se puedan destinar a ello.

A modo de resumen de estas, presentamos las siguientes tablas comparativas:

PRECISIÓN CARTOGRÁFICA (CORRECCIÓN GEOMÉTRICA)			
Insumos	**Ventajas**	**Desventajas**	**Resultado**
LANDSAT 2001 y 2003 Resolución 28.5 m Escena 185x185 km	- El tamaño de la escena permite encontrar numerosos puntos de control para su corrección geométrica (cruces de carreteras, de ríos, construcciones, etc.) - El error medio cuadrático (RMS) obtenido fue de 28 y 22 metros, menor que el tamaño del píxel, que es técnicamente lo óptimo. - El error promedio de desplazamiento medido manualmente fue siempre menor que el tamaño del píxel. - Coinciden bien las imágenes de las dos fechas.	- Sólo se identifican claramente elementos de dimensiones mayores de 4 píxeles (1.5 ha) - Aunque el RMS fue inmejorable se encontraron desplazamientos de hasta 70 y 85 metros (casi 4 píxeles) en los cortes del 2004.	**Bueno**
SPOT 2003 y 2004 Resolución 10 m Escena 60x60 km	- El tamaño de la escena permitió encontrar numerosos puntos de control para su corrección geométrica.	- El mejor RMS que pudo obtenerse fue de 21 y 14 m, mayor que el tamaño del píxel. - No coinciden bien las imágenes de las dos fechas. - Aunque el valor en metros del RMS no fue tan alto, se encontraron numerosos desplazamientos de 17 a 53 m en promedio. - Se encontraron desplazamientos máximos de 140 y 160 metros en los cortes del 2003 y de 40 y 60 en los del 2004.	**Regular**
MOSAICOS FAD 2001 y 2003 Resolución 1 m Escena variable	- El tamaño de la escena permitió encontrar numerosos puntos de control para su corrección geométrica. - RMS de 4 metros en los del 2001. Aunque es mayor que el tamaño del píxel, el valor en metros es bajo. - El mosaico 2003 se ajusta muy bien a las ortofotos de INEGI sobre las que fue construido, no fue necesaria la corrección geométrica. - El error promedio de desplazamiento medido manualmente fue igual que el RMS para los mosaicos del 2003.	- Aunque la resolución es muy alta, la precisión depende de los insumos utilizados para la georreferenciación y corrección geométrica. - No coinciden bien las imágenes de las dos fechas. - A pesar de la mejor resolución espacial, la precisión cartográfica es similar a la de Spot y Landsat. - Aunque el valor en metros del RMS no fue tan alto, se encontraron numerosos desplazamientos de 16 y 27 m en promedio para los cortes del 2001. - Se encontraron desplazamientos máximos de 53 y 162 metros en los cortes del 2001 y de 26 y 80 en los del 2003.	**Malo** para 2001 **Bueno** para 2003
Resultados de monitoreos aplicados para el Fondo Monarca			
2001-2003 (FAD), Honey et al. 2004. Resolución 1m Foto 3x2 km (aprox.)	- Coinciden muy bien los mapas de las dos fechas.	- La fotointerpretación se restituyó sobre una base 1:15000, resultado de una ampliación del mapa 1:50000, por lo que es muy baja la correspondencia entre rasgos. - Se encontraron desplazamientos promedio de 49 y 82 m, respectivamente, para los cortes A y B. - Se encontraron desplazamientos máximos de 90 y 170 metros en esos cortes.	**Malo**
2003-2004 (Ikonos), Fay y Olander 2004. Resolución 4 m. Escena 11x11 km	- El error promedio de desplazamiento medido manualmente fue de 2 y 5 metros para las Áreas A y B. - Se encontró un error máximo de desplazamiento de 11 metros.	- No coinciden bien las imágenes de las dos fechas (según sus autores, y por los falsos cambios observados).	**Bueno**

EXACTITUD TEMÁTICA (CLASIFICACIÓN)					
	INTERPRETACIÓN VISUAL		**CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA**		**Resultado**
	Ventajas	**Desventajas**	**Ventajas**	**Desventajas**	
LANDSAT 2001 y 2003 Resolución 28.5 m Escena 185x185 km	- Separación clara entre bosques y cubiertas agropecuarias. - Interviene el conocimiento del terreno que tenga el intérprete.	- Falta de estereoscopía. - Subjetividad para definir los límites entre clases (mayor subjetividad a mayor número de clases). - Confusión con las áreas arbustivas. - Polígono mínimo cartografiado de 3600 m2. - Exactitud global* de cada mapa entre 63 y 78%.	- No existe subjetividad en la clasificación. - Para llevar a cabo el proceso no es necesario un conocimiento previo del terreno.	- Los *clusters* son sensibles a la variabilidad de valores del corte elegido. - Confusión de áreas arbustivas con bosques o con pastizales. - La exactitud global entre 49 y 58%.	**Bueno** para visual **Regular** para digital
SPOT 2003 y 2004 Resolución 10 m Escena 60x60 km	- Separación clara entre bosques, áreas arbustivas y cubiertas agropecuarias. - Interviene el conocimiento del terreno que tenga el intérprete. - Polígono mínimo cartografiado de 400 m2.	- Falta de estereoscopía. - Subjetividad para definir los límites entre clases. - Exactitud global de cada mapa entre 61y 68%.	- No existe subjetividad en la clasificación. - Para llevar a cabo el proceso no es necesario un conocimiento previo del terreno.	- Los *clusters* son sensibles a la variabilidad de valores del corte elegido. - Confusión de áreas arbustivas con bosques o con pastizales. - La exactitud global fue de 42 a 72%.	**Bueno** para visual **Regular** para digital
MOSAICOS FAD 2001 y 2003 Resolución 1 m Escena variable	- Separación clara entre bosques, áreas arbustivas y cubiertas agropecuarias. - Interviene el conocimiento del terreno que tenga el intérprete. - Polígono mínimo cartografiado de mayor detalle, 100m2.	- Falta de estereoscopía. - Subjetividad para definir los límites entre clases. - Carencia de bandas multiespectrales - Exactitud global de cada mapa ente 63 y 72%	- No existe subjetividad en la clasificación. - Para llevar a cabo el proceso no es necesario un conocimiento previo del terreno	- Cada unión entre fotos se clasifica como cambio de clase. - Gran confusión entre bosques y áreas arbustivas. - No se evaluó la exactitud, debido a la notoriedad de la confusión entre clases.	**Bueno** para visual **Malo** para digital
Resultados de monitoreos aplicados para el Fondo Monarca					
2001-2003 (FAD), Honey et al. 2004. Resolución 1m Foto 3x2 km (aprox.)	- Interpretación con estereoscopía - Interviene el conocimiento del terreno que tenga el intérprete.	- Confusión en la clasificación, se señalan cubiertas junto con procesos. - 5 clases de densidad del arbolado, lo que hace muy subjetiva la interpretación. - No reportan exactitud de la clasificación.			
2003-2004 (Ikonos), Fay y Olander 2004. Resolución 4 m. Escena 11x11 km			- No existe subjetividad en la clasificación. - Para llevar a cabo el proceso no es necesario un conocimiento previo del terreno	- Falta de conocimiento de campo para determinar los *clusters* que mejor reflejaran la realidad. - No reportan exactitud de la clasificación.	

* La exactitud global está afectada tanto por la exactitud temática como por la precisión cartográfica. Se usaron los mismos puntos tomados en campo para evaluar la exactitud, por lo que a mayor resolución espacial de la imagen mayor sensibilidad a los desplazamientos de la corrección geométrica.

DETECCIÓN DEL CAMBIO					
	INTERPRETACIÓN VISUAL		**CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA**		**Resultado**
	Ventajas	**Desventajas**	**Ventajas**	**Desventajas**	
LANDSAT 2001 y 2003 Resolución 28.5 m Escena 185x185 km	- La experiencia del intérprete y su conocimiento en campo evita la detección falsos cambios. - Disminuye el error por desplazamientos entre las imágenes de cada fecha.	- Sólo se identifican cambios mayores de 3600 m2.	- Muy fácil aplicación.	- Falsos cambios por diferencias en las condiciones de la toma de la imagen. - Falsos cambios por errores de desplazamiento entre las imágenes	**Bueno** para visual **Regular** para digital
SPOT 2003 y 2004 Resolución 10 m Escena 60x60 km	- Se evita la detección falsos cambios. - Disminuye el error por desplazamientos. - Identificación de cambios desde 400 m2.		- Muy fácil aplicación.	- Falsos cambios por diferencias en las condiciones de la toma de la imagen. - Falsos cambios por errores de desplazamiento entre las imágenes	**Bueno** para visual **Regular** para digital
MOSAICOS FAD 2001 y 2003 Resolución 1 m Escena variable	- Se evita la detección falsos cambios. - Disminuye el error por desplazamientos. - Identificación de cambios desde 100 m2.		(No aplica)		**Bueno** para visual
Resultados de monitoreos aplicados para el Fondo Monarca					
2001-2003 (FAD), Honey et al. 2004. Resolución 1m Foto 3x2 km (aprox.)	- Se evita la detección falsos cambios. - Disminuye el error por desplazamientos.				
2003-2004 (Ikonos), Fay y Olander 2004. Resolución 4 m. Escena 11x11 km				- Falsos cambios por diferencias en las condiciones de la toma de la imagen. - Falsos cambios por errores de desplazamiento entre las imágenes.	

Costo promedio de la imagen y tiempo para la de obtención de los resultados de cambio

	Cobertura por escena (km²)	Costo promedio por km² (USD)	Tiempo aproximado para la obtención de resultados (horas x km2)	
			Interpretación Visual	Clasificación digital*
LANDSAT 2001 y 2003	34,225	0.03	0.3	0.1
SPOT 2003 y 2004	3,600	1.00	0.8	0.1
MOSAICOS FAD 2001 y 2003	depende del acuerdo	25.00	1.3	0.1
Monitoreos aplicados para el Fondo Monarca				
2001-2003 (FAD), Honey et al. 2004.	6	15		
2003-2004 (Ikonos), Fay y Olander 2004.	121	43.50		

* Señalamos los tiempos de proceso requeridos en el presente trabajo, pero puede ser un dato muy variable. Depende de la capacidad del hardware y sofware, así como de la experiencia técnica y en campo del usuario.

7. Literatura citada

Chuvieco, E. 1990. Fundamentos de teledetección espacial. Ed. Rialp. Madrid.

Honey Rosés, J, E. Rendón Salinas, J. López García, A. Peralta, I. Contreras, P. Ángeles, C. Galindo-Leal. 2004. Monitoreo Forestal del Fondo Monarca 2003. WWF-México. [http://www.wwf.org.mx/monarca/archivos_foro/Rep_Monitoreo_Forestal.pdf]

FAO, 1996. Forest Resources Assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes. Number 130, Rome.

FAO. 2001. Global Forest Resources Assessment 2000. FAO Forestry Paper 140. Rome. [http:/www.fao.org/forestry/site/fra2000report/en]

Fay, John P. and Lydia P. Olander. 2004. IKONOS Satellite Change Analysis 2003-2004 Monarch Butterfly Reserve. Final report. WWF-Programa México. Documento interno.

Fay, John P. and Lydia P. Olander. 2004a. Preliminary IKONOS Change Detection results for Monarch Butterfly Reserve. WWF-Programa México. Documento interno.

Lunetta, R. S. and C. D. Elvidge. 1998. Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Applications. Ann Arbor Press. Chelsea MI.

Janssen, L. 2001. Visual image interpretation (Cap 11). In: Principles of remote sensing. ITC Educational Textbook Series. Enschede. pp 135-149.

Janssen, L. and B. Gorte. 2001. Digital image classification (Cap. 12). In: Principles of remote sensing. ITC Educational Textbook Series. Enschede. pp 151-164.

Janssen, L. and M. Weir. 2001. Geometric Aspects (Cap. 9). In: Principles of remote sensing. ITC Educational Textbook Series. Enschede. pp 109-117.

Lillesand, T. and R. Kiefer. 2001. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley and Sons, Inc. USA.

Mas, J.F. 1999. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. International Journal of Remote Sensing 20. pp 139–152.

Mas, J.F. and I. Ramírez. 1996. Comparision of land use classifications obtained by visual interpretation and digital processing. ITC Journal 1996-3/4. pp 278-283

Mas, J.F., J. Reyes, A. Perez. 2003. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o imágenes clasificadas: una revisión. Investigaciones Geográficas 51. pp 53-72.

Ramírez, M.I. 2004. Influencia de la red de caminos en la perturbación forestal de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca, Informe técnico. WWF-Programa México. [http://www.wwf.org.mx/monarca/index.php]

Rogan, J. and D.M. Chen. 2004. Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change. Progress in Planning 61. pp 301–325.

Treitz, P. and J. Rogan. 2004. Remote sensing for mapping and monitoring land-cover and land-use change-an introduction. Progress in Planning 61. pp 269–279.

WWF-México. 2004. La tala ilegal y su impacto en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Informe. WWF-Programa México. [http://www.wwf.org.mx]