



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

FACULTAD DE CIENCIAS

ECOLOGÍA

**“ANÁLISIS DE LA DINAMICA ESPACIAL Y TEMPORAL DEL CAMBIO DE USO
DE SUELO Y VEGETACIÓN EN LA PARTE OAXAQUEÑA DEL ISTMO DE
TEHUANTEPEC, MÉXICO”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

(BIOLOGÍA AMBIENTAL)

P R E S E N T A

LEOPOLDO GÓMEZ CAUDILLO

TUTOR PRINCIPAL:

**DR. JORGE ARTURO MEAVE DEL CASTILLO
(FACULTAD DE CIENCIAS)**

COMITÉ TUTORIAL:

**DR. ARTURO FLORES MARTÍNEZ
(SEMARNAT)**

**DR. JORGE LÓPEZ BLANCO
(INSTITUTO DE GEOGRAFÍA)**

MÉXICO, D.F., SEPTIEMBRE 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

OFICIO FCIE/DEP/405/13

ASUNTO: Oficio de Jurado

Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día **26 de noviembre de 2008**, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA AMBIENTAL)** del (la) alumno (a) **GÓMEZ CAUDILLO LEOPOLDO** con número de cuenta **84348203** con la tesis titulada **"Análisis de la dinámica espacial y temporal del cambio de uso de suelo y vegetación en la porción oaxaqueña de Istmo de Tehuantepec, México"**, realizada bajo la dirección del (la) **DR. JORGE ARTURO MEAVE DEL CASTILLO**:

Presidente: DR. ROBERTO ANTONIO LINDIG CISNEROS
Vocal: DRA. ROSA IRMA TREJO VAZQUEZ
Secretario: DR. ARTURO FLORES MARTINEZ
Suplente: DR. ROBERTO BONIFAZ ALFONZO
Suplente: DR. EDUARDO ALBERTO PEREZ GARCIA

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 14 de agosto de 2013.

DRA. MARÍA DEL CORO ARIZMENDI ARRIAGA
Coordinadora del Programa



MCAA/MJFM/ASR/ipp

Agradecimientos

Al Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme las puertas para poner mi granito de arena al conocimiento de la metodología y estadística aplicados a las ciencias naturales

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca (200119) que me otorgaron para llevar a concretar mi idea de investigación.

A mi tutor principal, Dr. Jorge Arturo Meave del Castillo por su intento y buena voluntad.

A los miembros del comité tutorial: Dr Jorge López Blanco y Dr. Arturo Flores Martínez por su tiempo y asesorías.

A los miembros del jurado: Dr. Arturo Flores Martínez, Dr. Roberto Bonifaz Alfonzo, Dr. Roberto Antonio Lindig Cisneros, Dr. Eduardo Alberto Pérez García por su tiempo y disposición para revisar mi trabajo.

Y muy especialmente a la Dra. Rosa Irma Trejo Vázquez por su dedicación, entrega y respeto por su trabajo.

Agradecimientos personales

A todos aquellos que han hecho de la Universidad Nacional Autónoma México un espacio libre y revolucionario, ¡mi casa! Especialmente a Rafael Roldán, Roberto Monroy, Adriana Mercado, Alejandra Merino, Cecilia Castro, Isis Yolotzin Alvarado, Fernando Minauro, Victor Mejía, Hugo Nájera, Gerardo Pérez, Jorge Calónico, Alfredo Saynes, José Blancas.

a Erika; mi impulso, mi motivo, mi futuro...

*Porque sólo puede existir duda donde existe una pregunta,
una pregunta, sólo donde existe una respuesta, y ésta,
sólo donde algo puede ser dicho.*

Wittgenstein.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	II
ABSTRACT	IV
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 CAMBIOS EN LA COBERTURA DEL SUELO.....	2
1.1.1 <i>A nivel mundial</i>	2
1.1.2 <i>A nivel nacional</i>	3
1.1.3 <i>A nivel estatal</i>	4
1.2.1 <i>Modelos espacio-temporales</i>	6
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
2 OBJETIVOS	9
3 ÁREA DE ESTUDIO	10
3.1 EL ISTMO DE TEHUANTEPEC (ENTORNO GEOGRÁFICO)	10
3.2 ZONA DE ESTUDIO	11
3.2.1 <i>Geología</i>	11
3.2.2 <i>Edafología</i>	12
3.2.3 <i>Geomorfología</i>	12
3.2.4 <i>Clima</i>	13
3.2.5 <i>Hidrología</i>	13
3.2.6 <i>Vegetación</i>	14
3.2.6.1 Descripción de las coberturas del suelo con las que se trabajó en el estudio.....	15
4 MÉTODOS Y DATOS	26
4.1 MAPAS DE LA COBERTURA DEL SUELO	26
4.3.1 <i>Procedimiento para detectar el cambio de la cobertura del suelo</i>	28
4.3.2 <i>Método estadístico para describir la dinámica del cambio de la cobertura del suelo espaciotemporalmente</i>	29
4.3.2.1 <i>Análisis de la velocidad del cambio</i>	31
4.3.2.2 <i>Análisis de la tasa de cambio por cobertura para cada intervalo de tiempo</i>	32
4.3.2.3 <i>Análisis de la dirección de sustitución de las coberturas del suelo</i>	33
4.3.3 <i>Método espacial y análisis estadístico para conocer las variables ligadas a la deforestación y a la reforestación</i>	34
4.3.3.1 <i>Método estadístico para determinar las variables que condicionan la deforestación y la reforestación</i>	35
5 RESULTADOS	39
5.1 TASA DE CAMBIO POR INTERVALO.....	39
5.2 ANÁLISIS DEL CAMBIO POR COBERTURA DEL SUELO DENTRO DE CADA PERÍODO.....	40
5.3 ANÁLISIS DEL CAMBIO DE LA COBERTURA DEL SUELO EN FUNCIÓN DE LA PÉRDIDA Y GANANCIA DE SUPERFICIE.....	47
5.4 ANÁLISIS DE TRANSICIÓN DE LA SUPERFICIE DE LA COBERTURA DEL SUELO	51
5.5 ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA DEFORESTACIÓN Y RECUPERACIÓN CON LOS FACTORES BIOFÍSICOS Y ANTRÓPICOS DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	54
5.5.1 <i>Modelo para la deforestación</i>	55
5.5.2 <i>Modelo para la recuperación</i>	56
6 DISCUSIÓN	59
6.1 CAMBIO DE LA COBERTURA DEL SUELO	59
6.2 MODELO EXPLICATIVO DEL CAMBIO DE LA COBERTURA DEL SUELO	64
6.3 EVALUACIÓN DEL MODELO	64
7 CONCLUSIONES	67
8 REFERENCIAS	69

RESUMEN

El cambio de cobertura en el Istmo de Tehuantepec es un fenómeno multivariado muy complejo, en el que están involucrados tanto, factores ecológicos, como económicos y culturales.

Esta tesis presenta un método cuantitativo anidado para analizar y describir la dinámica del cambio de cobertura del suelo en la porción oaxaqueña del Istmo de Tehuantepec (México), con datos obtenidos de mapas de cambio de tres o más puntos en el tiempo y con base en matrices de cambio (tablas de contingencia), en la que cada matriz resume el cambio en cada periodo de tiempo.

El método consiste en tres niveles de análisis, del más general al más específico. El primer nivel evalúa como varía entre intervalos de tiempo la cantidad y la tasa de cambio. El segundo nivel compara como varía entre coberturas para cada periodo de tiempo la tasa de pérdida y ganancia de superficie anual. El tercer nivel examina hacia qué categorías se va y de qué categorías procede la superficie que intercambian las coberturas.

El método anterior se complementa con un análisis de regresión logística para conocer las variables biofísicas y antrópicas están relacionadas con la dinámica de la deforestación y de la recuperación de la cubierta natural en esta parte del Istmo de Tehuantepec.

Como resultado del análisis se pudo conocer que la dinámica del cambio en la cobertura del suelo en la porción oaxaqueña del Istmo de Tehuantepec es un proceso que ocurre a una tasa de cambio que no es estable ni espacial ni temporalmente. La deforestación afecta principalmente a la selva baja caducifolia y a la selva baja espinosa y a la sabana. Mientras que sólo la selva baja espinosa mostró signos de recuperación significativos en el segundo periodo de estudio. Con respecto a las variables biofísicas y antrópicas relacionadas con el cambio de cobertura, los asentamientos humanos, los cuerpos de agua, la accesibilidad y la poca pen-

diente del terreno son factores que propician la deforestación de la vegetación natural en el Istmo de Tehuantepec.

Este método de evaluación es un excelente modelo de análisis descriptivo y explicativo, ya que logra un entendimiento completo e integral de los la dinámica espacial y temporal del cambio de la cobertura del suelo.

ABSTRACT

The land cover change in the Isthmus of Tehuantepec is a very complex multivariate phenomenon, which involves both, ecological, economic and cultural factors.

This thesis presents a nested quantitative method to analyze and describe the dynamics of land cover change in the southern portion of the Isthmus of Tehuantepec, with maps data obtained of three or more points in time and based on cross tabulation matrices (contingency tables), in which each matrix summarizes the change in each time period.

The method consists of three levels of analysis, starting from the most general to the most detailed. The first level evaluates how the size and rate of change vary across time intervals. The second level analyzes how the size and the rate of loss and gain of annual surface vary across categories. The third level examines to which categories goes and from which categories comes the surface that categories exchanges.

The above method is complemented by a logistic regression analysis for bio-physical and anthropogenic variables are related to the dynamics of deforestation and recovery of natural cover in this part of the Isthmus of Tehuantepec.

The dynamics of land cover change in the Southern portion of the Isthmus of Tehuantepec, México, is a process that occurs at a rate of change that is not stable, neither spatially nor temporally. Deforestation affects mainly the deciduous forest and low thorny jungle and savannah. While only low thorny jungle showed signs of significant recovery in the second study period. With respect to the biophysical and anthropogenic variables related to the coverage change, human settlements, water bodies, accessibility and the low slope of the terrain are factors to deforestation of natural vegetation in the Isthmus of Tehuantepec.

This method of evaluation is an excellent model of descriptive and explanatory analysis, as it achieves a complete and comprehensive understanding of the spatial and temporal dynamics of land cover change.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos dos siglos, el cambio en la cobertura del suelo (atributos biofísicos de la superficie terrestre) y en el uso del suelo (utilidad que tiene la cobertura para el hombre) se ha intensificado (Leemans y Seernels 2004, Ramankutty et al 2006). Esto supone que el ritmo, la magnitud y la expansión espacial de las alteraciones antropogénicas en la superficie terrestre se han acelerado considerablemente en muchas regiones del mundo (Evangelista et al 2009). Los cambios en la cobertura del suelo han cobrado especial interés porque son los factores más importantes de la degradación ambiental en las regiones tropicales (Lambin et al. 2001). Estos cambios impactan directamente a la diversidad biológica e intervienen en el cambio climático local y regional (Lambin et al. 2003). Además, son los principales causantes de la degradación, la deforestación y la fragmentación, procesos que influyen significativamente en la pérdida de servicios ambientales (protección de cuencas hidrológicas, reciclaje de nutrientes, establecimiento y mantenimiento de hábitats para plantas y animales, entre otros) esenciales para sustentar la vida en la Tierra y satisfacer las necesidades humanas (Lambin et al. 2001, DeFries y Bounoua 2004).

Hasta el momento no se ha podido generalizar el proceso de cambio de uso de suelo y vegetación a gran escala debido a la heterogeneidad espacial y temporal de los factores biofísicos propios de los ecosistemas, y a que la relación entre el proceso de cambio de la cobertura del suelo con factores socioeconómicos, tecnológicos, políticos y culturales que los desencadenan no está bien documentada a escalas locales (Turner 1989, Bürgi et al. 2004). Actualmente se reconoce que el cambio en la cobertura del suelo es uno de los principales factores que modifican los procesos ecológicos y que generan dicha heterogeneidad (Veldkamp y Lambin

2001). Sin embargo, no se ha desarrollado un marco conceptual universal que permita analizar las causas de los patrones espaciales de los fenómenos ecológicos en escalas geográficas amplias, es decir; cómo es el intercambio de superficie entre las coberturas del suelo (¿aumentan o disminuyen?), a qué velocidad lo hacen y qué características biofísicas lo determinan.

Por otro lado, los estudios sobre dinámica espacial y temporal (ubicación, dirección y velocidad) de los cambios en la cobertura del suelo son importantes y necesarios, ya que proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación ambiental como: desertificación, pérdida de biodiversidad, modificación de ciclos hidrológicos, pérdida de hábitats y de cambio climático a nivel regional y global (Lambin et al. 2001), lo cual pone de manifiesto la necesidad de cuantificar el grado de conversión de la cubierta vegetal a través del estudio de la dinámica espacial y temporal del cambio la cobertura del suelo y su relación con los factores biofísicos y antrópicos.

1.1 Cambios en la cobertura del suelo

1.1.1 A nivel mundial

La agricultura se ha extendido hacia casi todos los ecosistemas naturales del planeta (FAO 2001). El área de cultivo en el mundo se incrementó de 1,800 millones de hectáreas en 1900 a 6,000 millones a finales del siglo XX y la superficie de pastoreo actualmente ocupa alrededor de 4,000 millones de hectáreas (Goldewijk y Ramankutty 2004). Esto ha provocado que, actualmente, sólo 46% de la superficie terrestre se mantenga, al menos parcialmente, inalterada (Mittermeier et al. 2003) y que los bosques y selvas hayan disminuido su cobertura a un 30% de la superficie continental (Ball 2001, FAO 2010).

Estimaciones hechas por la FAO (2001) señalan que durante la década de los noventa la superficie de vegetación natural disminuyó a una veloci-

dad de 16 millones (0.5%) de hectáreas al año, mientras que en las regiones tropicales fue de 15.2. Estos datos indican que a finales del siglo XXI la superficie que ocuparán los bosques y las selvas en Latinoamérica será de 336 millones de hectáreas; es decir, 58% de la superficie original (693×10^6 ha).

Aunque en 2010 ésta misma institución reportó que la pérdida de la cobertura natural en regiones tropicales y templadas del planeta en el periodo 2000–2005 fue menor (0.4%) que la reportada para la década de los noventas, aún existe un déficit muy importante entre la deforestación y la recuperación de la vegetación natural (FAO 2010).

1.1.2 A nivel nacional

México es el cuarto país más rico en especies vegetales del planeta, y el quinto en biodiversidad total, por lo que está considerado como un país megadiverso (Mittermeier y Mittermeier 1992). Alberga desde bosques tropicales húmedos hasta matorrales desérticos y paisajes alpinos en las cimas de sus montañas más altas, que forman un mosaico de ecosistemas muy heterogéneo (Meave 2012). Sin embargo, está sujeto a cambios muy drásticos en la cobertura del suelo de su territorio debido principalmente a las actividades agropecuarias y al establecimiento y crecimiento de asentamientos humanos (Landa et al. 1997, Mas et al. 2004, Sánchez Colón et al. 2008, Evangelista et al. 2009). Varios estudios han demostrado que el proceso de cambio de uso/cobertura del suelo en el país se está dando en zonas de alta diversidad, sobre todo en los estados de Michoacán, Guerrero y Oaxaca (Lorence y García-Mendoza 1989, Velázquez et al. 2003).

Se estima que las selvas mexicanas, que originalmente cubrían alrededor de 26% de la superficie nacional, actualmente sólo cubren 16%, y todas ellas presentan altas tasas de deforestación (Sánchez-Colón et al. 2008). Los bosques también están sufriendo una rápida disminución en su su-

perficie y se calcula que han perdido 24% de su cobertura original en un periodo de 30 años (Palacio-Prieto et al. 2000).

En estudios del cambio de uso del suelo en el territorio mexicano hechos por Velázquez et al. (2002) y Sánchez-Colón et al. (2008), se señala que las coberturas de vegetación primaria disminuyeron desde 1970 hasta el 2002 a una tasa de cambio creciente, sobre todo en el periodo 1993-2000. En consecuencia, las coberturas resultantes de la acción humana (agricultura, ganadería y asentamientos humanos) se incrementaron.

En el periodo 1970-1993 el área correspondiente a bosques, selvas, matorrales y pastizales naturales se perdió a una tasa anual de -1.5%, -1.4%, -0.7% y -0.8%, respectivamente, mientras que los pastizales inducidos y cultivados, cultivos y asentamientos humanos se incrementaron a velocidades de 1.7%, 0.9% y 6.0%, respectivamente. En el periodo de 1993 a 2000 estas tasas de cambio se incrementaron notablemente: la superficie ocupada por los bosques se perdió a una tasa de -3.7%, la de las selvas a -2.8%, la de los matorrales a -1.7% y la de los pastizales naturales a -2.0%, mientras que los pastizales inducidos y cultivados aumentaron a una tasa de 4.6%, la de los cultivos a 2.0% y la de los asentamientos humanos a 4.1% Velázquez et al (2002).

1.1.3 A nivel estatal

El estado de Oaxaca ocupa el 5% (93,793 km²) del territorio nacional, García-Mendoza (2004) lo considera el estado con más diversidad biológica y uno de los estados con mayor endemismos del país; alberga prácticamente todos los tipos de vegetación descritos para México y están representadas 70% de las comunidades vegetales presentes en el país (Velázquez et al. 2003) en un paisaje muy heterogéneo (Torres Colín 2004). García-Mendoza y Meave (2011) publicaron un inventario que incluye 8,903 especies de plantas vasculares para el estado y De la Maza et al. (1989) menciona que podrían ser hasta 15,000 especies vegetales.

Al inicio de la década del 2000 cerca de 40% del territorio estatal estaba cubierto por bosques templados y alrededor de 30% por selvas que se distribuyen en mosaicos en el paisaje montañoso del estado. Poco menos de la mitad de su superficie estaba ocupada por vegetación primaria, 24% por vegetación secundaria y el resto por coberturas antropogénicas (Velázquez et al. 2003).

De 1976 al 2000 se perdió 8% (750,000 ha) de la superficie que ocupaba la vegetación primaria y secundaria del estado, y sólo se ha recuperado un 2.6%. Adicionalmente, 11% (1,002,723 ha) del área cubierta por vegetación primaria se ha convertido en vegetación secundaria, y sólo 251.032 ha de vegetación secundaria se ha convertido en primaria (Velázquez et al. 2003).

En Oaxaca, como en el resto de México y el mundo, los principales factores del cambio de uso del suelo y vegetación son la agricultura, la ganadería y la urbanización (Landa et al. 1997, Challenger 1998, Lambin et al. 2003, García Romero et al. 2005, Sánchez Colón et al. 2008, Evangelista et al. 2009). Sin embargo, se sabe poco de la dinámica espacial de los cambios de uso/cobertura del suelo en Oaxaca y de su relación con los procesos ecológicos a nivel regional en las selvas y los bosques (Gómez-Mendoza et al 2006). Por lo tanto, es necesario desarrollar modelos espaciales y temporales de los cambios de la cobertura del suelo en Oaxaca, sobre todo para áreas críticas del estado, con el fin de generar mejores estrategias de conservación de sus bosques y selvas y hacer un manejo apropiado de sus recursos.

1.2 Análisis de cambio de la cobertura del suelo

Dada la necesidad entender la dinámica espacial y temporal de los patrones del cambio de cobertura del suelo a nivel de paisaje, desde 1990 se ha desarrollado un gran número de modelos temporales para evaluar y predecir los cambios en la cobertura de los sistemas terres-

tres. La gran mayoría de estos modelos se han enfocado en cuantificar y predecir el cambio del uso del suelo temporalmente, pero muy pocos lo ha hecho tomando en cuenta la heterogeneidad espacial, es decir, cuáles son las características biofísicas del área donde ocurre el cambio, a qué velocidad está ocurriendo y en qué dirección (Turner 1989, Irwin y Geoghegan 2001).

1.2.1 Modelos espacio-temporales

Una herramienta adecuada para abordar este problema y conocer la localización, la intensidad y la dirección del cambio de la cobertura del suelo, así como entender su relación con los factores biofísicos, son los modelos espaciotemporales, ya que estos permiten analizar la relación entre parámetros específicos y el cambio de la cobertura del suelo (Lambin 1994, Irwin y Geoghegan 2001, Serneels 2001, Bürgi et al. 2004). Una de las características fundamentales de estos modelos es que incorporan los factores que generan heterogeneidad espacial como una variable explicativa de la distribución de los usos y coberturas del suelo. Además, permiten evaluar la sensibilidad de los patrones del cambio de la cobertura del suelo a cambios causados por factores específicos en sistemas ecológicos donde interviene el hombre. También, incorporar la heterogeneidad espacial como variable explicativa permite enriquecer el análisis de la dinámica espacio-temporal al considerar situaciones como la fragmentación o diferentes cualidades y calidades del hábitat (Lambin 1994, Irwin y Geoghegan 2001, Bürgi et al. 2004).

Como ya se mencionó, el cambio de en la cobertura del suelo es causado, en su mayor parte, por actividades humanas. Sin embargo, los factores biofísicos (como el tipo de suelo, la morfología y la pendiente); climáticos (como la temperatura y la precipitación) y los antrópicos (como la infraestructura y los asentamientos humanos) determinan la ubicación espacio-temporal de la cobertura del suelo. Por lo tanto, es imperativo des-

cribir el cambio de la cobertura del suelo cualitativa y cuantitativamente y conocer las características biofísicas y antrópicas que están relacionadas con este cambio para explicar la dinámica espacial y temporal del cambio de la cobertura del suelo a nivel de paisaje. Además, la utilización de herramientas como los sistemas de información geográfica ha permitido abordar los patrones y procesos ecológicos en diferentes escalas espaciales y temporales (Chuvienco 2002).

1.3 Planteamiento del problema

En la porción oaxaqueña del Istmo de Tehuantepec se llevan a cabo importantes actividades de producción agrícola y ganadera, lo que implica una presión de deterioro constante de esta zona (Challenger, 1998). A pesar del inminente riesgo que esto representa para la conservación de la biodiversidad del estado y los servicios ambientales que presta esta región, no existe información sobre la dinámica espacial y temporal de los cambios de la cobertura del suelo, ni de cómo ésta se relaciona con los factores biofísicos y antropogénicos de la zona. Además, esta región presenta una gran heterogeneidad de los factores biofísicos que determinan la distribución de los usos y coberturas del suelo, lo que la hace una zona de estudio apropiado para generar un modelo a escala regional (Gómez-Mendoza et al. 2006).

Aunado a esta problemática, en esta región no hay trabajos en los que se haya analizado y cuantificado la distribución espacial de la pérdida de la vegetación y de su relación con los factores bióticos y abióticos. Además, un gran número de modelos de cambio de la cobertura del suelo se enfocan en determinar las causas del cambio, evaluar el impacto del cambio y predecir los patrones del cambio bajo diversos escenarios, pero la eficiencia y consistencia de estos modelos depende de la pertinencia y cali-

dad de las técnicas empleadas para describir y explicar el cambio de la cobertura del suelo (Pontius et al. 2004).

Por tales motivos, en esta tesis se presenta un modelo cuantitativo para caracterizar, describir y evaluar los patrones de cambio de la cobertura del suelo en la porción oaxaqueña del Istmo de Tehuantepec, México; para ayudar a identificar eficientemente los patrones y procesos que intervienen en la dinámica del cambio de la cobertura vegetal de esta región.

En general, en esta investigación se intentó conocer cómo fue la dinámica espacial y temporal del cambio de la cobertura del suelo en la porción oaxaqueña del Istmo de Tehuantepec de 1970 a 1983 y de 1983 al 2003. Específicamente se abordaron los siguientes puntos: 1.- Cuál fue la velocidad del cambio de la cobertura del suelo en esos intervalos de tiempo, 2.- Cuáles fueron las categorías más dinámicas con respecto a las otras coberturas del suelo dentro de cada intervalo, 3.- Cómo fue la transición o la dirección del cambio entre categorías y si es constante entre intervalos y 4.- Cuáles son las características biofísicas y antrópicas que parecen condicionar la dinámica del cambio de la cobertura vegetal dentro de la región de estudio.

2 OBJETIVOS

Para responder a las preguntas planteadas al final de la sección anterior se plantearon los siguientes objetivos:

- 1.- Determinar el cambio de la cobertura del suelo por intervalo de tiempo para evaluar cómo varía la tasa de cambio anual entre los periodos analizados.
- 2.- Dada la tasa de cambio por intervalo, determinar que coberturas son las que más cambian (ganan y/o pierden) su superficie.
- 3.- Dado un contexto de ganancia y otro de pérdida, determinar de qué coberturas proviene la superficie que se gana y a qué coberturas va la superficie que se pierde.
- 4.- Identificar las características biofísicas y antrópicas que condicionan la dinámica espacio-temporal de la deforestación y la recuperación en el área.

3 ÁREA DE ESTUDIO

3.1 El Istmo de Tehuantepec (entorno geográfico)

La zona de estudio se encuentra en la parte sureste del Istmo de Tehuantepec oaxaqueño, Toledo (1995) delimitó el istmo al noroeste por el volcán San Martín en los Tuxtlas, Veracruz y al sureste por el volcán Chichonal, localizados en las cañadas del río Tonalá, en la Selva Zoque de Chiapas. En el centro del Istmo de Tehuantepec, desde Asunción Ixtepec, el oriente de los Chimalapas hasta las montañas de Ocozocuatla en Chiapas, se extiende la Sierra Atravesada.

Por el Istmo de Tehuantepec transitaban los primeros pobladores de América, desde hace 3000 años es punto de encuentro de las culturas más antiguas de Mesoamérica; encontraron sus valles aptos para la agricultura y fundaron ciudades que actualmente son puntos de comunicación a nivel mundial por tierra, mar y aire. Debido a que el Istmo de Tehuantepec es, junto con el canal de Panamá, una de las regiones más angostas entre el Océano Atlántico y el Océano Pacífico; ha sido una región de tránsito, migración y comercio entre comunidades nacionales y extranjeras; hace 2500 años ya había relaciones comerciales entre el Soconusco y Nochixtlan. Actualmente es innegable la importancia ecológica, económica y cultural que tiene esta región para México (Winter 1990, Gómez 2005).

Esta región del país es muy rica culturalmente, estuvo y está influenciada por las culturas olmeca, maya, náhuatl y zapoteca; se habla náhuatl, zapoteco, mixe, zoque, chontal, entre otras lenguas (de la Vega 2004). Es una zona en la que se hace evidente como la diversidad cultural está fuertemente ligada con la biodiversidad (Toledo et al. 2001) a través de los usos y formas de manejo de la vegetación por diferentes culturas y contextos (Moerman et al 1999).

En el Istmo de Tehuantepec confluyen los reinos biogeográficos Neártico y Neotropical, además presenta una gran heterogeneidad geológica y fisiográfica de la región; también es una de las regiones más húmedas de México, ya que su sistema de cuencas incluye algunos de los ríos más caudalosos del territorio nacional: Papaloapan, Coatzacoalcos, Grijalva y Usumacinta. Tan solo en los chimalapas nacen arroyos que forman ríos, cuyo caudal representa el 40% del agua dulce de todo México (VECH 1986), razones que la hacen una de las zonas más biodiversas de México y del planeta (Velázquez et al 2003, García-Mendoza 2004).

3.2 Zona de estudio

Sus coordenadas extremas son 17º y 16º latitud norte y 95º 15' y 94º 52' 30" longitud oeste (figura 3.1). El intervalo de altitud va desde el nivel del mar en la planicie costera, hasta los 1550 msnm en el Cerro El Campanario, ubicado en la noroeste de la zona de estudio.

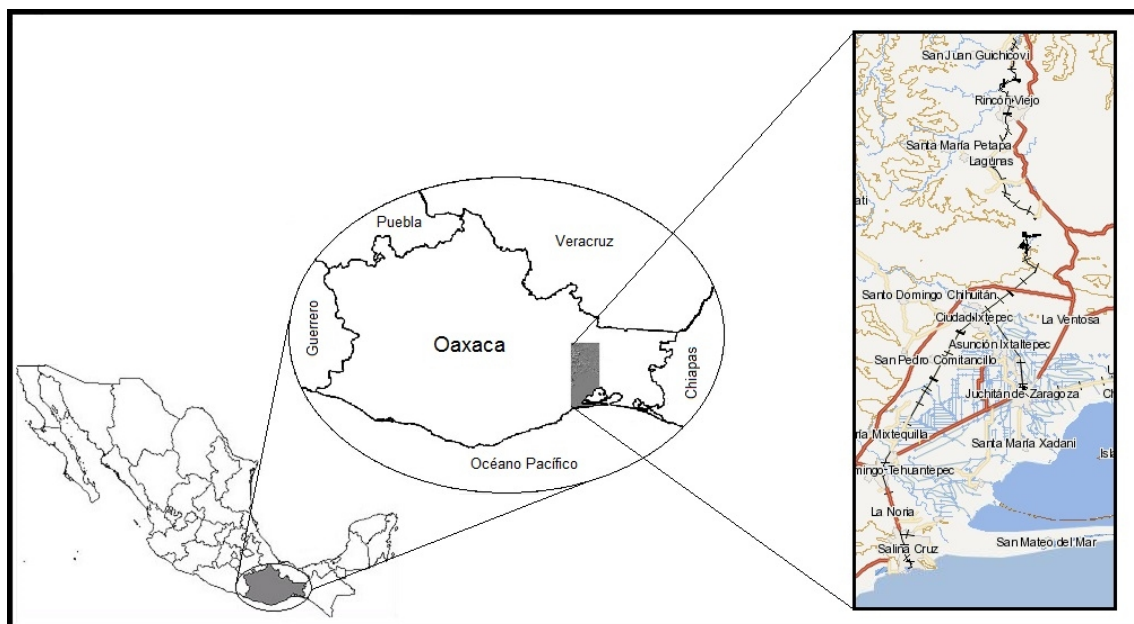


Figura 3.1. El área sombreada representa la zona de estudio, en el estado de Oaxaca, México.

3.2.1 Geología

La zona de estudio comprende dos terrenos tectónicos y estrati-

gráficos: al norte el Maya y al sur el Cuicateo. Alrededor de 70% de la superficie de esta zona está caracterizado por rocas sedimentarias del Cuaternario, calizas del Cretácico y sedimentarias continentales y marinas del Jurásico. Las rocas ígneas ocupan aproximadamente 20%, las extrusivas pertenecientes al Cenozoico Terciario son principalmente andesitas; las intrusivas, principalmente del Mesozoico y Paleozoico están representadas por granito. El 10% restante está ocupado por rocas metamórficas del Mesozoico y Paleozoico. En la región de Matías Romero y en la planicie costera se observan limolitas, areniscas y conglomerados intercalados con roca volcánica (INEGI 1985a, 2005a).

3.2.2 Edafología

La descripción de los suelos corresponde a la clasificación FAO/UNESCO 1968 modificada por la DETENAL 1970 (INEGI 2005b). En la parte norte de la zona de estudio dominan el Cambisol y el Acrisol, también hay presentes en menor proporción Planosoles y Luvisoles y manchones pequeños de Regosoles, Feozems y Vertisoles. En la región central domina el Acrisol en los lados este y oeste, en el centro están presentes en igual proporción Feozems, Luvisoles y Regosoles y manchones muy pequeños de Gleysoles y Fluvisoles. En la porción sur de la zona de estudio el suelo dominante es el Vertisol seguido por los Cambisoles, Feozems, Luvisoles y en menor proporción Regosoles y Solonchaks (INEGI 1985b).

3.2.3 Geomorfología

La composición geomorfológica de la parte norte del área de estudio es muy heterogénea y accidentada. Está definida por montañas en bloque que forman sierras, lomeríos y elevaciones bajas, relieves cársticos denudativos, zonas de premontaña formadas por elevaciones bajas en

bloque y valles aluviales e intermontanos distribuidos entre las elevaciones en toda la parte norte del área de estudio.

La mayor parte de la porción sur de la zona de estudio está definida por una gran llanura fluvial dentro de la cual se encuentran algunas elevaciones bajas, relieves cársticos denudativos, valles aluviales, costas deltáicas, costas de isla y costas de barrera (Ortiz Pérez M.A. y Figueroa Mah Eng M. 2003).

3.2.4 Clima

De acuerdo a la clasificación de Köpen, la parte norte del área está dominada por un clima cálido húmedo con lluvias en verano (Am), con una temperatura media anual mayor de 22° C, temperatura del mes más frío mayor de 18° C y la precipitación promedio anual es de 1,200 a 1,500 mm (INEGI 1985c, 2005c, Trejo 2004).

En la parte central de la zona de estudio se observan dos tipos de clima: el cálido subhúmedo con lluvias en verano de humedad alta (Aw2) con una temperatura media anual mayor de 22° C, temperatura del mes más frío mayor de 18° C y la precipitación promedio anual es de 1,200 a 2,500 mm; y el cálido subhúmedo con lluvias en verano de humedad media (Aw1), con la misma temperatura media anual y temperatura del mes más frío pero, la precipitación promedio anual es de 1,000 a 1,500 mm (INEGI 1985c, 2005c, Trejo 2004).

La parte sur está caracterizada por un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano de humedad baja (Aw0), con una temperatura media anual mayor de 22° C, temperatura del mes más frío mayor de 18° C y la precipitación promedio anual es de 700 a 1,200 mm (INEGI 1985c, 2005c, Trejo 2004).

3.2.5 Hidrología

La zona de estudio está dentro de la superficie que ocupa la cuenca hidrológica “Lagunas Superior e Inferior”, que comprende parte de los extremos sureste y sur de las sierras Juárez y Atravesada, respectivamente y se extiende a lo largo de la planicie costera del Golfo de Tehuantepec hasta la línea de costa.

El río Los Perros es el más importante dentro de esta cuenca, es un río maduro con 102.6 km de longitud; nace cerca del parteaguas de la Sierra Mixe a 1,380 msnm, baja con pendiente de 0.0135 y rumbo general sureste, pasa por importantes poblados de la región como Ciudad Ixtepec y Juchitán de Zaragoza, para finalmente desembocar en la Laguna Superior; sus afluentes principales son numerosas corrientes intermitentes que se incorporan a lo largo de su recorrido. Otro río importante dentro de la cuenca, que atraviesa la zona de estudio, es el Ostuta; también nace en la Sierra Atravesada a 1,400 msnm, drena 1,319 km del distrito Juchitán, presenta dirección con rumbo suroeste hasta desembocar en la Laguna Inferior. Debido a lo anterior la zona de estudio está constituido por ríos y arroyos en la parte norte y por ríos y canales de riego en la parte sur (INEGI 1985e, 2003).

3.2.6 Vegetación

La heterogeneidad ambiental generada por las variaciones en la geología, el relieve, edafología, hidrología, así como por los diferentes procesos de disturbio, explican en gran medida la complejidad paisajística de la vegetación de la zona.

La selva alta y mediana perennifolia y la subperennifolia y el bosque de pino-encino dominan en la porción norte de la zona de estudio con una superficie promedio en las tres fechas del 12.5, 8.7 y 10.7% respectivamente del área total, sólo que las primeras se distribuyen en las partes bajas y el bosque de pino-encino en las partes altas junto con el bosque mesófilo de montaña que cubre el 0.8% promedio del área total. Otras

coberturas únicas del norte de la zona de estudio, pero con coberturas muy pequeñas, son la sabana que representa 1.2% promedio, el bosque de encino y el bosque de pino con 0.6% cada uno (Figura 4.1 y Tabla 5.1).

El centro del área de estudio está ocupado por una franja de selva baja caducifolia y subcaducifolia, que junto con unos manchones de extensión considerable en la parte sur, hacen de esta cobertura la de mayor superficie en la zona (18.8% promedio) (Figura 4.1 y Tabla 5.1).

En contraste con la parte norte, en la sur predominan las coberturas antrópicas. Las de mayor cobertura son la agricultura de riego con 13.7% promedio y el pastizal cultivado con 10.7 y la agricultura de temporal, las dos primeras sólo se observan en esta parte y la tercera también presenta un manchón importante en las partes bajas y planas de la zona norte. Con una superficie promedio considerable (6.1%), la selva baja espinosa sólo está representada en el sur de la zona de estudio (Figura 4.1 y Tabla 5.1).

3.2.6.1 Descripción de las coberturas del suelo con las que se trabajó en el estudio

Styles (1998), estimó que de 30 millones de hectáreas de bosques de coníferas en México, en un poco más de 20 millones predominan los pinos.

Los bosques de encino y de pino ocupan nichos ecológicos semejantes, debido a que son dos tipos de vegetación con requerimientos ecológicos muy parecidos. Esta convivencia de encinos y pinos, que en muchos casos constituyen condiciones de transición, ocurre en suelos ácidos, de poca profundidad, de texturas variables y de coloraciones cafés a rojizas, amarillentas, blanquizas y negras (Cruz 1999).

Las glaciaciones pleistocénicas permitieron la llegada de géneros como *Myrica* (arbolito de la cera), *Podocarpus* y *Pinus*, a bajas latitudes y alti-

tudes. Así, se observa la presencia de bosques de pino y de encino de los 150 a 300 m.s.n.m. desde el sureste de Tamaulipas, hasta Veracruz, Oaxaca y Chiapas. Cabe destacar que algunos autores han sugerido que la distribución de estos bosques de encinar en las áreas tropicales, se debe al enfriamiento que siguió a la llegada de las glaciaciones. Este enfriamiento permitió que los elementos florísticos migraran desde el norte mezclándose con las comunidades cálido-templadas y tropicales, y su persistencia se vio favorecida por la diversidad fisiográfica (González-Medrano 1998).

Se cree que los encinares tropicales son relictos de ciertos bosques templados que ampliaron su distribución durante el Pleistoceno (Challenger 1998).

Bosque de encino: hay sólo tres manchones muy pequeños en la parte norte de la zona de estudio; se encuentran entre los 200 y 500 m de altitud en un clima cálido húmedo rodeados de selva alta y mediana perennifolia y pastizales (Figura 4.1). Está compuesto por individuos del género *Quercus* de 4 a 20 m de altura acompañados de *Pinus spp.*, arbustos de 2 a 5 metros de altura como *Bejaria aestuans* Mutis ex L., *Comarostaphylis discolor* (Hook.) Diggs, *Lyonia squamulosa* M. Martens & Galeotti entre otras. También se observan plantas trepadoras como *Bomarea hirtella* (Kunth) Herb., *Smilax sp.* y epífitas de las familias Bromeliaceae y Orchidaceae (Rzedowski 1978, Torres-Colín 2004).

Bosque de pino: están presentes tres manchones en la parte norte de la zona de estudio alrededor de los 200 m de altitud rodeados por selva alta y mediana perennifolia y el manchón más al Este limita con manchones de pastizal cultivado (Figura 4.1), en un clima semicálido húmedo. Está formado por árboles de *Pinus lawsonii* Roetzl ex Gordon y *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltld. que generalmente alcanzan 10 m de altura. Conviviendo con estas especies de pinos se encuentran arbustos de 2 a 4 m como *Acacia cornigera* (L.) Willd. y *Dodonaea viscosa* Jacq. que sirven

como indicadores del disturbio del ecosistema. Al igual que en los encinares aquí se observan bromelias y orquídeas (Rzedowski 1978, Torres-Colín 2004).

Bosque de pino/encino: sólo está presente en la parte norte de la zona de estudio, un manchón se ubica en laderas bajas alrededor de los 300 m de altitud en un clima cálido subhúmedo rodeado por selva alta y mediana perennifolia y manchones de pastizales (Figura 4.1). Está integrado por *Pinus lawsonii* Roetzl ex Gordon, *Quercus excelsa* Liebm., *Quercus glaucescens* Bonpl. y *Clethra macrophylla* M. Martens & Galeotti (Rzedowski 1978, Torres-Colín 2004). El otro, se observa en cañadas entre los 500 y 1000 msnm rodeado por la selva alta y mediana perennifolia y subperennifolia (Figura 4.1), en un clima semicálido subhúmedo. Las especies que los representan son *Pinus oocarpa* Schiede ex Schtdl., *Quercus glaucescens* Bonpl., *Quercus sapotifolia* Liebm., *Byrsonima crassifolia* (L.) Kunth entre otras. El estrato herbáceo de este ecosistema es de plantas de hasta 50 cm entre las que se encuentran *Muhlenbergia* sp, *Aristida* sp y *Stevia* sp. (Rzedowski 1978, Torres-Colín 2004).

Rzedowski (1978) destacó que aunque el bosque mesófilo de montaña ocupa apenas 1% del territorio nacional, está compuesto por cerca de 3000 especies de plantas vasculares, lo cual representa el 11.5% de la flora vascular mexicana. También se ha señalado que el 60% de estos tres millares de especies son endémicas de la región que definió como Megaméxico 3 (Luna Vega 1994).

En México, este tipo de vegetación se distribuye de los 400 m. de altura, en la región central de Veracruz, hasta los 2700 m. en el municipio de Alcozauca, Guerrero; con estacionalidad muy marcada. Sin embargo, el bosque mesófilo de montaña está cubierto por neblina la mayor parte del año, lo que contrarresta los efectos de la estacionalidad (Rzedowski 1978, Stadtmüller 1987). Este tipo de vegetación crece en laderas de volcanes donde predominan las rocas ígneas y sobre sedimentos de ori-

gen marino. Los suelos de los bosques mesófilos de montaña pueden ser profundos en las laderas y muy someros en las pendientes de gran inclinación, pero todos son ácidos (pH de 4 a 6); son ricos en materia orgánica y están húmedos todo el año (Rzedowski 1978, Toledo 1994).

Bosque mesófilo de montaña: se encuentra en las laderas y cañadas en la parte noroeste de la zona de estudio, arriba de los 1000 m de altitud con clima templado y húmedo con neblina y lloviznas frecuentes, rodeado por bosques de pino-encino en las partes más bajas (Figura 4.1). Se ubica principalmente sobre suelos profundos con una capa muy gruesa de materia orgánica derivada de rocas volcánicas. Este bosque está formado por árboles de 7 a 20 m de altura como *Quercus candidans*, *Pinus patula* Schltl. & Cham., *Liquidambar styraciflua* L., *Ocotea helicterifolia* (Meisn.) Hemsl., *Podocarpus matudae* Lundell entre otras. El estrato arbustivo de este ecosistema mide de 2 a 6 m y lo forman, entre otras especies: *Miconia lonchophylla* Naudin y *Bejaria aestuans* Mutis ex L.. También son comunes las lianas (*Celastrus vulcanicola* Donn. Sm. y *Cavendishia crassifolia* (Benth.) Hemsl.) y epífitas y rupícolas de las familias Orchidasceae, Bromeliaeae y Piperaceae (Rzedowski 1978, Torres-Colín 2004).

Las selvas perennifolias y subperennifolias son de las comunidades vegetales más antiguas del planeta, ya que por su localización en las zonas de más baja latitud y altitud no fueron afectadas por las glaciaciones y su clima se ha mantenido homogéneo a través del tiempo, razones por las cuales son los ecosistemas más complejos, con mayor riqueza biótica y diversidad y más productivos en México. En este tipo de vegetación se desarrolla una variedad enorme de flora (en una hectárea crecen más de cien especies árboles), y su potencial acuático es muy importante, ya que son ecosistemas atravesados por una red muy amplia de arroyos y ríos (Rzedowski 1978).

Las selvas tropicales han desarrollado interacciones muy complejas entre sus elementos bióticos y abióticos a través de millones de años de evolución, por lo que son considerados los ecosistemas más estables y productivos que existen. Estas características las convierten en el hábitat para una inmensa variedad de especies que hoy se encuentran en eminente peligro de extinción. Tal es el caso del jaguar, águila arpía, ocelote, pavón, quetzal, saraguato o mono aullador, mono araña, tapir, cocodrilo y de una amplia gama de vegetales, cuyo potencial está aún en muchos casos inexplorados (Miranda 1958, Meave 1990).

Selva alta y mediana perennifolia: se ubica en la parte baja de las sierras de la parte norte de la zona de estudio hasta los 500 m de altitud (Figura 4.1) en un clima cálido húmedo. Son de los ecosistemas más diversos del continente. Se caracterizan porque sus individuos no pierden sus hojas en los meses secos del año.

El estrato más alto lo forman árboles de más de 40 m de alto como *Ficus sp.*, *Ceiba pentandra (L.) Gaertn.*, *Brosimum alicastrum Sw.* y *Pouteria sapota (Jacq.) H.E. Moore & Stearn.* La vegetación del estrato mediano son árboles de 20 a 30 m de altura, algunas de las especies más representativas son *Andira inermis (W. Wright) Kunth ex DC.*, *Cynometra oaxacana Brandegee*, *Dialium guianense (Aubl.) Sandwith*, *Guarea excelsa Kunth*, *Licania arborea Seem.* y *Zuelania guidonia (Sw.) Britton & Millsp.* entre otras. El estrato más bajo son árboles de 10 a 15 metros representado por *Cassia grandis L. f.*, *Cupania dentata DC.*, *Bactris balanoidea (Oerst.) H. Wendl.* y *Ormosia mexicana Standl.* entre otras (Rzedowski 1978, Torres-Colín 2004).

Selva alta y mediana subperennifolia: está presente en la parte central de la zona de estudio entre los 200 y 1000 m de altitud en laderas de pendientes no muy pronunciadas (Figura 4.1) y valles con clima cálido o semicálido subhúmedo con temperaturas mayores a 20°C y precipitación promedio anual de 1,200 mm. Se identifica porque entre 25% y 50%

de su población pierde sus hojas en la época más seca del año. En el estrato alto se encuentran árboles de 20 a 30 m de altura como *Manilkara chicle* (Pittier) Gilly, *Protium copal* (Schltdl. & Cham.) Engl., *Tabebuia rosea* (Bertol.) A. DC. y *Cedrela odorata* L. entre otros. En el estrato menor, de 4 a 8 m de altura, se encuentran especies como *Tabernaemontana alba* Mill., *Crataeva tapia* L., *Exostema mexicanum* A. Gray, *Faramea occidentalis* (L.) A. Rich. y *Ficus maxima* Mill. (Rzedowski 1978, Torres-Colín 2004).

Selva baja caducifolia y subcaducifolia: son las comunidades vegetales más representativas de las partes más secas de las regiones tropicales, principalmente zonas con clima cálido subhúmedo donde la precipitación presenta una fuerte estacionalidad. Su distribución en el estado de Oaxaca está restringida al Oeste, Sur y Suroeste de la Sierra norte de Oaxaca y se estima que la habitan 3,000 especies vegetales; es decir, que este ecosistema alberga la tercera parte de la flora del estado (Meave et al. 2012).

Aunque no se ha evaluado la cantidad de endemismos propios de la selva baja caducifolia, se estima que el número es alto (González-Perez et al. 2004), pero se caracteriza porque hospeda un gran número de especies animales endémicas (Ceballos et al. 2010).

Aunque no se conoce a detalle la importancia de los servicios ecosistémicos que presta la selva baja caducifolia a la población mexicana, Meave (2012), con base en información de Maass et al. (2005) y Balvanera (2010), menciona que mantiene la biodiversidad, regula plagas y vectores de enfermedades, evita la erosión, controla el ciclo hidrológico y provee de bienes y servicios culturales.

Este tipo de vegetación es de los más representativos en la región por la superficie que ocupa y uno de los más importantes debido a su presencia en zonas de alta densidad de población oaxaqueña (Meave 2012).

En el área de estudio se encuentra principalmente al sur de la zona de estudio en las laderas de los cerros y en la planicie costera en un mosaico junto con la selva baja espinosa, terrenos agrícolas y pastizales (Figura 4.1) donde predomina el clima cálido subhúmedo con temperaturas por arriba de 20°C y precipitación media anual menor de 700 mm y en menor grado el clima semiárido cálido con una estacionalidad muy marcada en la precipitación (Rzedowski 1978, Torres-Colín 2004, Trejo 2004).

La gran mayoría de los árboles de la selva caducifolia miden entre los 8 y 10 m de alto, algunas especies de estos ecosistemas son *Bursera simaruba* (L.) Sarg., *Conzattia multiflora* (B.L. Rob.) Standl., *Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britten & Baker f., *Jacaratia mexicana* A. DC., *Brosimum alicastrum* Sw., *Ficus insipida* Willd. e *Hymenaea courbaril* L. entre muchas otras. *Agave* sp., *Cephalocereus* sp., *Escontria* sp., *Myrtillocactus* sp., *Neobuxbaumia* sp., *Pereskiaopsis* sp. y *Stenocereus* sp. son algunos otros géneros de especies que acompañan a los árboles de este ecosistema. La vegetación que conforma el estrato bajo de la selva baja caducifolia mide de 4 a 8 m de alto generalmente y son *Jacaratia mexicana* A. DC., *Lysiloma divaricatum* (Jacq.) J.F. Macbr., *Bursera* sp., *Jatropha* sp. y *Pachycereus pecten-aboriginum* (Engelm. ex S. Watson) Britton & Rose entre otras (Rzedowski 1978, Torres-Colín 2004).

En la selva baja subcaducifolia los árboles conservan por más tiempo su follaje y sólo entre 25 y 50% de los individuos tira sus hojas durante la época seca del año, algunos representantes son *Cnidioscolus multilobus* (Pax) I.M. Johnst., *Bursera* sp., *Guaiacum coulteri* A. Gray, *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., *Guazuma ulmifolia* Lam., *Cascabela ovata* (Cav.) Lippold, *Plumeria rubra* L. y *Manilkara sapota* (L.) Van Royen (Rzedowski 1978, Torres-Colín 2004).

Selva baja espinosa: se caracteriza por el dominio de árboles bajos y espinosos, se desarrolla en climas similares a los de la selva baja ca-

ducifolia o un poco más secos, ocupa terrenos planos o ligeramente ondulados, con suelos profundos, más o menos arcillosos y con mal drenaje. En México la selva baja espinosa se distribuye sobre todo en las partes aluviales de la Llanura Costera del Pacífico (sur de Sonora y Sinaloa), en parte de las planicies costeras de Nayarit, Jalisco, Colima, en parte de la cuenca del Balsas, del Istmo de Tehuantepec, en sectores aislados de la Península de Yucatán y en la región central de la Llanura Costera del Golfo Norte. En Oaxaca, este tipo de vegetación se localiza hacia la parte baja del Istmo, en terrenos planos de origen aluvial, cercanos a Juchitán de Zaragoza, desde el nivel del mar hasta 100 m de altitud, en ambientes propios de climas cálido subhúmedos, pero más secos que los correspondientes a la selva baja caducifolia.

Los suelos donde actualmente se desarrolla son profundos y poco desarrollados tipo Cambisol, en otros lugares cercanos la selva crece en suelos que bordean la laguna Superior, donde se acumula salitre, por la influencia marina, clasificados como Solonchak (Miranda 1958, Rzedowski 1978).

En la zona de estudio forma un mosaico muy heterogéneo con la selva baja caducifolia y subcaducifolia, pastizales, y la superficie agrícola en la parte sur de la zona de estudio sobre suelos aluviales de la llanura costera, el clima es cálido subhúmedo (Figura 4.1). Está compuesta por plantas de follaje perenne o deciduo de hasta 5 m de alto. Las especies más comunes son *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. (mezquites) en asociación con *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth., *Pereskia lychnidiflora* DC. y *Cercidium praecox* (Ruiz & Pav. ex Hook.) Harms. También son comunes leguminosas como *Parkinsonia aculeata* L. Los géneros más abundantes son *Acacia*, *Amphipterygium*, *Bursera* y *Tabebuia* entre otros (Rzedowski 1978, Torres-Colín 2004).

Sabana: es un ecosistema natural muy importante, ya que su superficie ocupa 30% de la región intertropical y alberga flora y fauna típi-

cas debido a que comparte muy pocas especies con otros ecosistemas de la región. Está conformada por un estrato herbáceo de gramíneas y ciperáceas, principalmente y arbustos, árboles y palmas arborescentes ocasionales. La diversidad de esta comunidad es comparable con la de algunos bosques tropicales (López 2005).

En el área de estudio se localiza en las laderas de los cerros y lomeríos en la parte norte de la zona de estudio entre los 20 y 200 m de altitud, rodeada de selva alta y mediana perennifolia y manchones de pastizal (Figura 4.1), en un clima cálido subhúmedo. Está constituida por pastos de los géneros *Aristida*, *Bouteloua*, *Cathestecum*, *Cenchrus*, *Digitaria* entre otros; arbustos como *Havardia platyloba* (Bertero ex DC.) Britton & Rose y *Sesbania herbacea* (Mill.) McVaugh y de árboles muy dispersos de hasta 4 m de alto como *Byrsonima crassifolia* (L.) Kunth, *Curatella americana* L. y *Crescentia alata* Kunth (Rzedowski 1978, Torres-Colín 2004).

Los pastizales aparecen en zonas que fueron intervenidas por el hombre o pueden sustituir comunidades en fases tempranas de sucesión en las que la vegetación no alcanza a desarrollarse debido a un disturbio natural o antrópico como un incendio o al pastoreo. También se originan cuando se establecen especies ruderales en terrenos de cultivo abandonados (López 2005).

Pastizal cultivado: se encuentra distribuido por la planicie costera, en laderas de los cerros con pendientes hasta de 40° de inclinación y zonas planas y bajas del área de estudio (Figura 4.1). En esta cobertura predominan las gramíneas como *Aegopogon cenchroides* Humb. & Bonpl. ex Willd., *Muhlenbergia emersleyi* Vasey y *Stipa ichu* (Ruiz & Pav.) Kunth; otras acompañantes son hierbas de los géneros *Euphorbia*, *Plantago* y *Tagetes* y algunos árboles como *Tabebuia rosea* (Bertol.) A. DC., *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp. y *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. (Rzedowski 1978, Torres-Colín 2004).

Pastizal inducido: se distribuye en manchones muy distantes en laderas de la parte central y sur de la zona de estudio en alturas menores a los 300 m (Figura 4.1). Predomina *Microchloa kunthii* Desv. en asociación con *Hilaria cenchroides* Kunth, también se encuentran: *Bouteloua triaena* (Trin. ex Spreng.) Scribn., *Tridax coronopifolia* (Kunth) Hemsl., *Heliotropium* sp., *Bouteloua filiformis* (E. Fourn.) Griffiths, *Bulbostylis capillaris* (L.) C.B. Clarke, *Oxalis* sp., *Bouteloua hirsuta* Lag., *Eragrostis elliottii* S. Watson, *Evolvulus alsinoides* (L.) L., *Cyperus seslerioides* Kunth, *Milla biflora* Cav. y *Ferocactus* sp.. (Rzedowski 1978, Torres-Colín 2004).

A pesar del difícil carácter geográfico, socioeconómico, demográfico y ecológico de Oaxaca, la agricultura es fundamental para la población y economía del estado. Pocas entidades en el país dependen tan estrechamente del sector agropecuario como Oaxaca, su economía es prácticamente rural, ya que alrededor de 41% de la población económicamente activa trabajan en el sector agropecuario (SAGARPA 2001).

En lugares que originalmente sustentaban bosques y selvas, se desarrolla una agricultura de temporal permanente y nómada, que afecta enormes extensiones y que propicia la erosión y degradación de muchas áreas naturales (SAGARPA 2001).

Agricultura de riego: Se distribuye en la planicie costera rodeada de una red muy grande de canales de riego, en un mosaico con la agricultura de temporal, pastizales y selva baja caducifolia y subcaducifolia (Figura 4.1). Son áreas de cultivo a las que se les suministra agua por medios mecánicos (canales o tuberías). Los principales cultivos de riego son el maíz, la alfalfa verde, los pastos, la caña de azúcar, el limón y el mango, que abarcan cerca del 85% del área dedicada a la agricultura de riego.

Agricultura de temporal: Se localiza principalmente en las lomas con laderas de pendiente suave, en la planicie costera y partes planas de la zona de estudio (Figura 4.1). Se caracteriza por cultivos anuales per-

manentes y semipermanentes que dependen del régimen de precipitación y de la permeabilidad del suelo. La mayor parte de la superficie de esta cobertura está dedicada al cultivo del maíz, pero también son importantes los frijol, sorgo, trigo, cacahuete, ajonjolí, garbanzo, melón, chile verde y seco, sandía, arroz y jamaica, con menor superficie también se siembran: cebada, maíz para forraje, alpiste, avena forrajera, chícharo, jitomate, papa, arvejón, camote y tabaco, entre otros.

Otros tipos de cobertura: Agrupa manglar, vegetación halófila y gipsófila y áreas sin vegetación.

Asentamientos humanos: Para el estudio se tomaron en cuenta las localidades urbanas con más de 2,500 habitantes (INEGI 2006) y que presentaron el mayor crecimiento durante el periodo de estudio. La mayoría de estas ciudades están concentradas en la parte sur de la zona de estudio (Salina Cruz, Tehuantepec, San Blas Atempa, Juchitán, Ciudad Ixtepec, San Pedro Comitancillo y Santa María Xadani), en la parte norte (Matías Romero, Santo Domingo Petapa y San Juan Guichicovi).

4 MÉTODOS Y DATOS

Esta investigación se basó en técnicas de sistemas de información geográfica, ya que éstas permiten mapear y describir la cobertura del suelo y medir cuantitativamente el cambio de la cobertura del suelo a nivel regional y a través del tiempo (Lunetta et al. 2002, Petit et al. 2001). Así como en métodos estadísticos que permitieron analizar los datos obtenidos de los mapas de cambio en tres niveles necesarios para obtener una visión completa de los patrones de cambio en el área de estudio: 1) Análisis y comparación de la tasa de cambio global entre intervalos de tiempo; 2) Análisis y comparación de la dinámica del cambio entre coberturas en cada intervalo y 3) Análisis de la variación del cambio entre intervalos de tiempo para evaluar la consistencia del intercambio de superficie terrestre entre las coberturas en el tiempo.

Las actividades que se llevaron a cabo para responder las preguntas de investigación y cumplir con los objetivos de este estudio fueron: 1) Verificación de campo para corregir los mapas de uso de suelo y vegetación (series I, II y III) del INEGI y para describir cualitativamente las clases de uso del suelo y vegetación; 2) Reclasificar los mapas de uso de suelo y vegetación (series I, II y III) del INEGI; 3) Describir, evaluar y comparar la dinámica del cambio de la cobertura del suelo en cada intervalo de tiempo y entre intervalos 4) Encontrar las características biofísicas que condicionan la dinámica del cambio del uso/cobertura del suelo en la región de estudio.

4.1 Mapas de la cobertura del suelo

Como se encontraron discrepancias en las leyendas entre los mapas de las series I, II y III del INEGI de uso del suelo y vegetación con lo observado en el campo, se reclasificaron para obtener los mapas de la

cobertura del suelo para los años 1985, 1993 y 2002. Los mapas de diferentes años son importantes para el análisis de series de tiempo del cambio de uso del suelo y vegetación, ya que permiten observar la dinámica temporal del cambio de las diferentes coberturas de la tierra. Los tres mapas que se obtuvieron son del mismo tamaño, tienen las mismas categorías de cobertura del suelo y todos están formados por píxeles de 30 x 30 m (Figura 4.1).

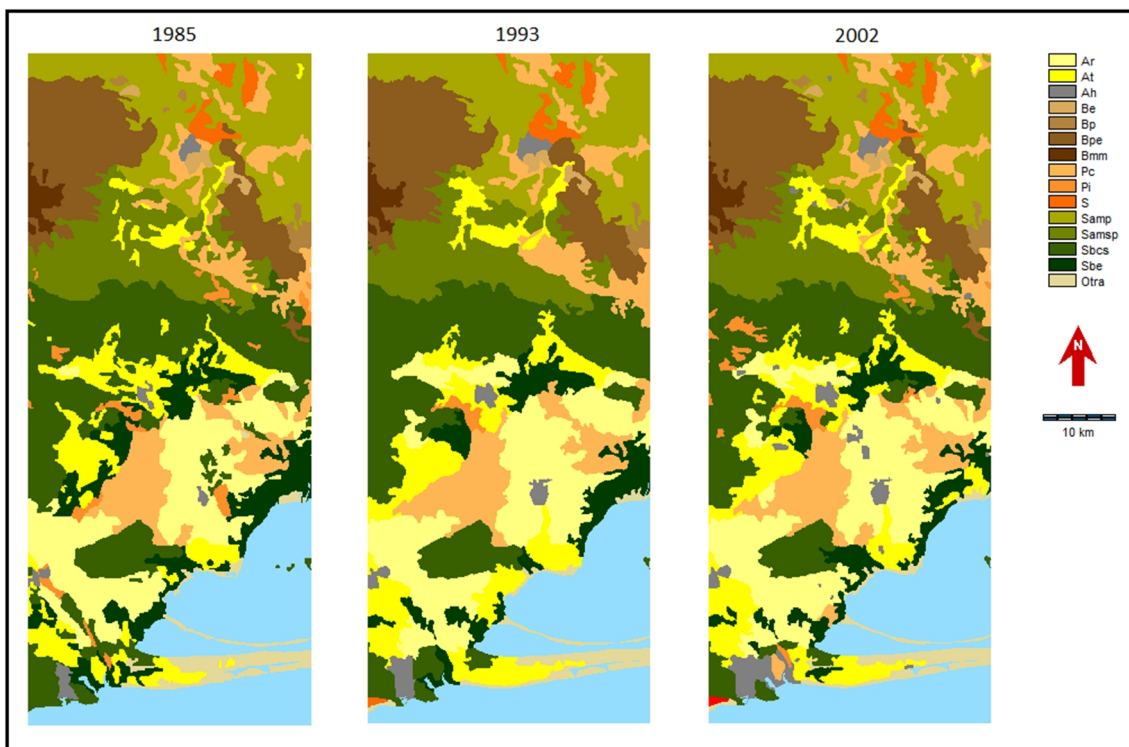


Figura 4.1. Mapas de la cobertura del suelo en la zona de estudio en los tres tiempos. **Ar.** Agricultura de riego, **At.** Agricultura de temporal, **Ah.** Asentamientos humanos, **Be.** Bosque de encino, **Bp.** Bosque de pino, **Bpe.** Bosque de pino-encino, **Bmm.** Bosque mesófilo de montaña, **Pi.** Pastizal inducido, **Pc.** Pastizal cultivado, **S.** Sabana, **Samp.** Selva alta y mediana perennifolia, **Samsp.** Selva alta y mediana subperennifolia, **Sbcsc.** Selva baja caducifolia y subcaducifolia, **Sbe.** Selva baja espinosa.

4.3 Modelo de detección, descripción y evaluación del cambio de la cobertura del suelo

El proceso de detección del cambio de la cobertura del suelo sirve para visualizar diferencias en el estado del paisaje por observación en diferentes tiempos. Este proceso se refiere esencialmente a la capacidad

de cuantificar efectos temporales usando bases de datos multitemporales (Lunetta et al. 2002).

El objetivo de analizar la dinámica espacio-temporal del uso del suelo y vegetación es monitorear la evolución de la vegetación natural del área de estudio. El modelo espacio-temporal propuesto en esta investigación consiste en tres etapas generales: 1) detección del cambio de la cobertura del suelo. 2) método estadístico para describir el cambio de la cobertura del suelo a nivel temporal (entre intervalos), categórico (entre coberturas) y de permanencia o consistencia del cambio de las coberturas en el tiempo. 3) método estadístico probabilístico para conocer las variables biofísicas y antrópicas causantes de la dinámica del cambio.

4.3.1 Procedimiento para detectar el cambio de la cobertura del suelo

Esto se llevó a cabo con la comparación de los mapas reclasificados de uso del suelo y vegetación para los años 1985, 1993 y 2002 (Figura 4.1), en este caso se utilizó el software IDRISI Andes (Eastman 2006). Para detectar el cambio de la cobertura del suelo se efectuaron 2 cruces de mapas, el de 1985 con el de 1993 y el de 1993 con el de 2002, de esta manera se obtiene un mapa da cambio para el periodo 1985-1993 y otro para 1993-2002 (Figura 4.2).

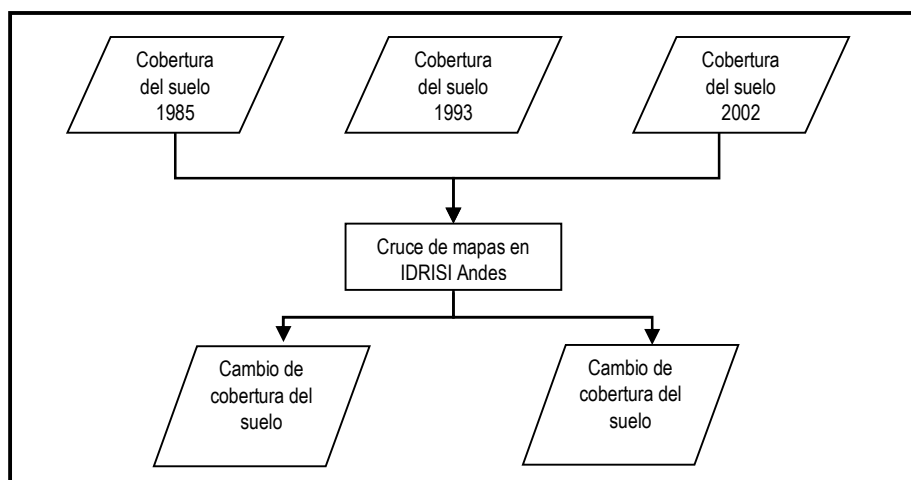


Figura 4.2. Procedimiento para detectar el cambio de uso/cobertura del suelo.

La característica de estos mapas, es que las categorías que los forman muestran los píxeles donde la cobertura del suelo permaneció del tiempo 1 al tiempo 2 y los píxeles donde una cobertura del tiempo 1 fue sustituida por cualquiera de las otras coberturas al tiempo 2 (Figura 5.1).

4.3.2 Método estadístico para describir la dinámica del cambio de la cobertura del suelo espaciotemporalmente.

Como se mencionó en la introducción, la principal intención de este trabajo de investigación fue aplicar un modelo cuantitativo para analizar y describir una serie temporal de mapas de coberturas del suelo para un mismo lugar en una zona del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. La figura 4.3 muestra un diagrama de flujo general del análisis estadístico para analizar los valores de cambio por intervalos de tiempo, entre categorías y el intercambio de superficie entre categorías para cada intervalo de tiempo.

Para responder a las preguntas de investigación planteadas y cumplir con los primeros tres objetivos planteados en esta tesis el modelo propuesto debe analizar: 1) Cuál es la velocidad del cambio general y compararla entre intervalos de tiempo. 2) Cuáles categorías son las que más ganan y/o pierden superficie para cada intervalo de tiempo y 3) Dado un escenario de pérdida y ganancia; conocer la dinámica de sustitución o transición en cada uno de los intervalos de tiempo.

Dado que la fuente de información son los mapas de cambio, es decir, conteos de píxeles que cambiaron de categoría o permanecieron iguales; muchos estudios utilizan matrices de cambio (tabla 4.1) para evaluar la dinámica espacial y temporal de las coberturas del suelo (Gergel y Turner 2000, Mertens y Lambin 2000, Pontius et al. 2004). Pero cuando se analizan mapas de tres o más fechas, con intervalos de tiempo diferentes, las matrices de cambio, per se, no consideran la diferencia en tiempo. Sin

embargo la información que poseen es ya está condensada y resumida por categoría e intervalo de tiempo (tabla 4.1) (Aldwaik y Pontius 2012).

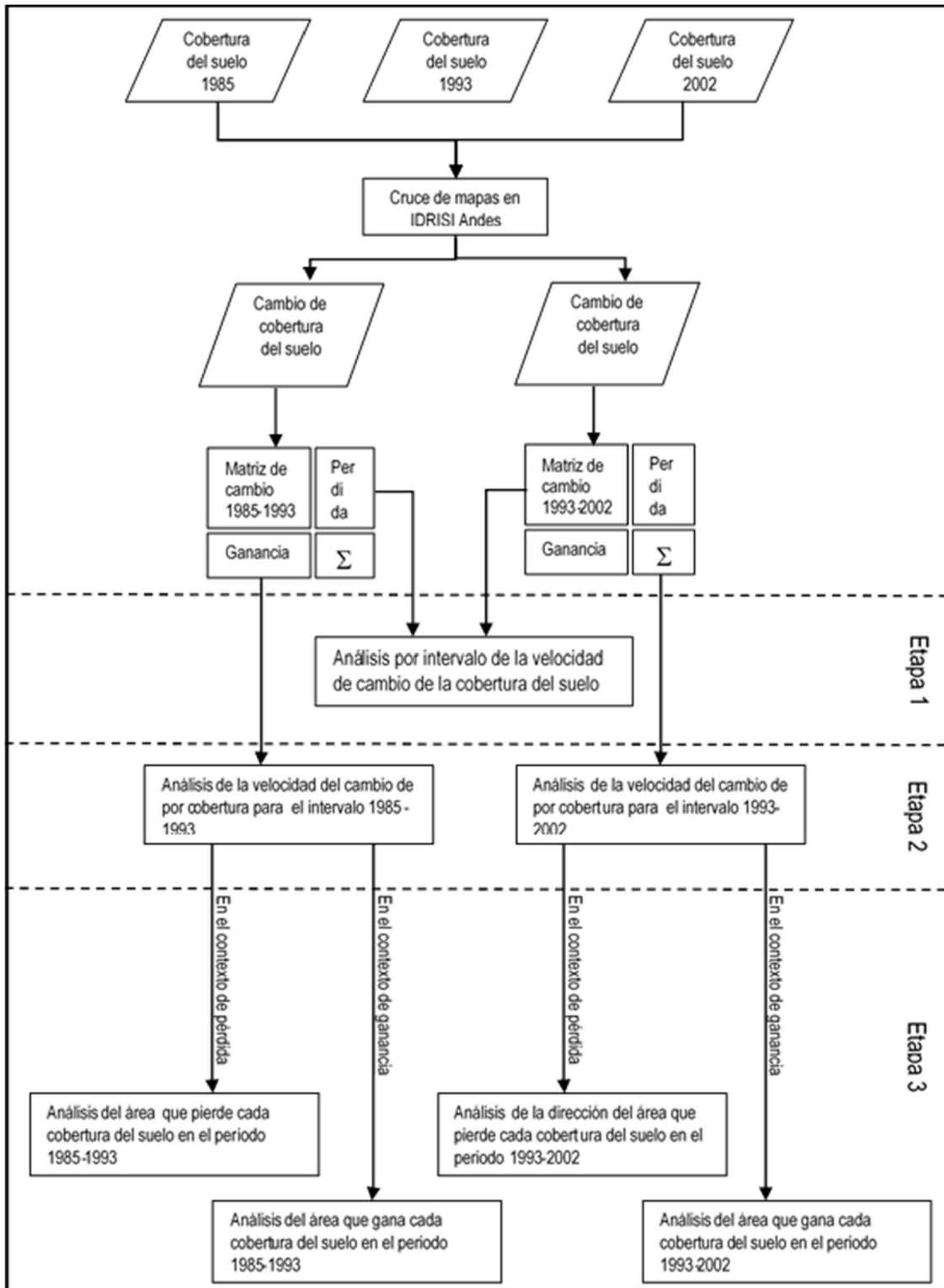


Figura 4.3. Diagrama de flujo del análisis descriptivo de la dinámica del cambio de la cobertura del suelo en el estudio.

Tabla 4.1. Matriz de cambio de un cruce de dos mapas en t₁ y t₂ para el mismo lugar.

	Tiempo 2				Total t1	Perdida
	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría i		
Tiempo 1						
Categoría 1	Y ₁₁	Y ₁₂	Y ₁₃	Y _{1j}	ΣY ₁₊	ΣY ₁₊ -Y ₁₁
Categoría 2	Y ₂₁	Y ₂₂	Y ₂₃	Y _{2j}	ΣY ₂₊	ΣY ₂₊ -Y ₂₂
Categoría 3	Y ₃₁	Y ₃₂	Y ₃₃	Y _{3j}	ΣY ₃₊	ΣY ₃₊ -Y ₃₃
Categoría j	Y _{i1}	Y _{i2}	Y _{i3}	Y _{ij}	ΣY _{j+}	ΣY _{j+} -Y _{ij}
Total t2	ΣY ₊₁	ΣY ₊₂	ΣY ₊₃	ΣY _{+i}		
Ganancia	ΣY ₊₁ -Y ₁₁	ΣY ₊₂ -Y ₂₂	ΣY ₊₃ -Y ₃₃	ΣY _{+i} -Y _{ij}		

Los renglones representan las coberturas en el tiempo t₁ y las columnas las coberturas en el tiempo t₂. Los valores de la diagonal principal representan la superficie de las coberturas que no cambió. Los valores fuera de la diagonal principal representan la transición de una categoría a otra. La columna total representa la superficie de cada cobertura en el tiempo t₁. El renglón total representa la superficie de cada cobertura en el tiempo t₂.

4.3.2.1 Análisis de la velocidad del cambio

Para responder la primera pregunta del estudio y cumplir el primer objetivo se obtuvo la tasa de cambio para cada intervalo de tiempo y se comparó contra la tasa de cambio promedio.

$$TC_t = \frac{\text{Área que cambió en el intervalo de tiempo } [Y_t, Y_{t+1}]/\text{Área de la zona de estudio}}{\text{Tamaño del intervalo } [Y_t, Y_{t+1}]} \times 100\%$$

(1)

Donde:

TC_t es la Tasa de cambio de cada uno del intervalo de tiempo [Y_t, Y_{t-1}].

Área que cambió en el intervalo de tiempo [Y_t, Y_{t-1}] es la suma de la columna Pérdida y del renglón Ganancia de la matriz de cambio de la tabla 3.1.

Área de la zona de estudio es la suma de la columna Total t1 y del renglón Total t2 o la suma de todas las celdas de la matriz de cambio de la tabla 3.1.

Tamaño del intervalo [Y_t, Y_{t-1}] es la amplitud del intervalo [Y_t, Y_{t-1}].

$$TCP = \frac{\text{Suma del área que cambio en cada intervalo de tiempo}/\text{Área de la zona de estudio}}{\text{Suma del tamaño de cada intervalo de tiempo}} \times 100\%$$

(2)

Donde:

TCP es la Tasa de cambio promedio.

Suma del área que cambió cada intervalo de tiempo es la sumatoria de la suma de la columna Pérdida y del renglón Ganancia de todas las matrices de cambio obtenidas de los cruces de los mapas de cobertura de cada tiempo.

Área de la zona de estudio es la suma de la columna Total t1 y del renglón Total t2 o la suma de todas las celdas de la matriz de cambio.

Suma del tamaño del intervalo es la sumatoria de la amplitud de cada uno de los intervalos de tiempo del análisis.

La lógica de comparar los valores de la TC_t de los intervalos de tiempo con los de la TCP es, que si los valores de la TC_t son iguales para cada t, entonces estos valores de TC_t serán iguales a la TCP. Por lo tanto el patrón de cambio sería constante a través del tiempo del estudio.

4.3.2.2 Análisis de la tasa de cambio por cobertura para cada intervalo de tiempo.

Para responder la segunda pregunta y cubrir el segundo objetivo debemos conocer que categorías son relativamente más activas que las otras en cada uno de los intervalos de tiempo.

Las siguientes ecuaciones determinan la tasa de cambio en función de la ganancia y pérdida de la superficie de cada cobertura para cada intervalo de tiempo.

$$G_{jt} = \frac{\text{Área ganada por la categoría } j \text{ en el en el intervalo de tiempo } [Y_t, Y_{t+1}]/\text{Tamaño del intervalo } [Y_t, Y_{t+1}]}{\text{Área de la categoría } j \text{ en el tiempo } Y_{t+1}} \times 100\%$$

(3)

Donde:

G_{jt} es la tasa de ganancia anual de la categoría j en el intervalo de tiempo $[Y_t, Y_{t+1}]$.

Área ganada por la categoría j en el intervalo de tiempo $[Y_t, Y_{t+1}]$ es $\sum Y_{+j} - Y_{ij}$ con $i = j$.

Tamaño del intervalo $[Y_t, Y_{t+1}]$ es la amplitud del intervalo $[Y_t, Y_{t+1}]$.

Área de la categoría j en el tiempo Y_{t+1} es $\sum Y_{+j}$.

$$P_{it} = \frac{\text{Área perdida por la categoría } i \text{ en el en el intervalo de tiempo } [Y_t, Y_{t+1}]/\text{Tamaño del intervalo } [Y_t, Y_{t+1}]}{\text{Área de la categoría } i \text{ en el tiempo } Y_t} \times 100\%$$

(4)

Donde:

P_{it} es la tasa de pérdida anual de la categoría i en el intervalo de tiempo $[Y_t, Y_{t+1}]$.

Área perdida por la categoría i en el intervalo de tiempo $[Y_t, Y_{t+1}]$ es $\sum Y_{i+} - Y_{ij}$ con $i = j$.

Tamaño del intervalo $[Y_t, Y_{t+1}]$ es la amplitud del intervalo $[Y_t, Y_{t+1}]$.

Área de la categoría i en el tiempo Y_t es $\sum Y_{i+}$.

Cuando las ecuaciones de arriba se aplican a cada una de las coberturas del suelo en cada intervalo de tiempo resulta claro que se puede inferir si el patrón de cambio de las coberturas es constante en el tiempo o variable y si son más o menos activas.

4.3.2.3 Análisis de la dirección de sustitución de las coberturas del suelo

Con este análisis se intentó dilucidar cuáles son los cambios de cobertura más grandes o intensos, es decir, que coberturas están intercambiando mayor cantidad de superficie.

La siguiente ecuación sirve para conocer cuanta superficie de cada una de las coberturas i se convirtió en la cobertura j para cada intervalo

$$TTG = \frac{\text{Área que cambió de } i \text{ a } j \text{ en el intervalo de tiempo } [Y_t, Y_{t+1}]/\text{Tamaño del intervalo } [Y_t, Y_{t+1}]}{\text{Área de la categoría } i \text{ en el tiempo } Y_t}$$

(5)

Donde:

TTG es la tasa de superficie de una cobertura i que se convierte en cobertura j ; con i diferente de j .

Área de cambio de i a j en el intervalo $[Y_t, Y_{t-1}]$ es Y_{ij} ; con i diferente de j .

Tamaño del intervalo $[Y_t, Y_{t-1}]$ es la amplitud del intervalo $[Y_t, Y_{t-1}]$.

Área de la categoría i en el intervalo Y_t es $\sum Y_{i+}$

Con la ecuación de abajo se obtiene la tasa de ganancia promedio de la cobertura j con respecto a las demás coberturas.

$$TTGP = \frac{\text{Área ganada de la categoría } j \text{ en el intervalo de tiempo } [Y_t, Y_{t+1}]/\text{Tamaño del intervalo } [Y_t, Y_{t+1}]}{\text{Área que no es de la categoría } j \text{ en el tiempo } Y_t}$$

(6)

Donde:

TTGP es la tasa de ganancia promedio de la cobertura j .

Área ganada de la categoría j en el intervalo de tiempo $[Y_t, Y_{t-1}]$ es $\sum Y_{i+}$; con $i = j$.

Tamaño del intervalo $[Y_t, Y_{t-1}]$ es la amplitud del intervalo $[Y_t, Y_{t-1}]$.

Área que no es de la categoría j en el tiempo Y_t es el área de la zona de estudio menos el área de la categoría j en el tiempo Y_t .

De igual forma se puede evaluar hacia que otras coberturas se fue la superficie perdida por otra de ellas con la siguiente ecuación

$$TTP = \frac{\text{Área que cambió de } j \text{ a } i \text{ en el intervalo de tiempo } [Y_t, Y_{t+1}]/\text{Tamaño del intervalo } [Y_t, Y_{t+1}]}{\text{Área de la categoría } j \text{ en el tiempo } Y_{t+1}}$$

(7)

Donde:

TTP es la tasa de superficie de una cobertura j que se convierte en cobertura i ; con i diferente de j .

Área de cambio de j a i en el intervalo $[Y_t, Y_{t+1}]$ es Y_{ij} ; con i diferente de j .

Tamaño del intervalo $[Y_t, Y_{t+1}]$ es la amplitud del intervalo $[Y_t, Y_{t+1}]$.

Área de la categoría j en el intervalo Y_{t+1} es $\sum Y_{j+}$

También se puede calcular la tasa de perdida promedio de la cobertura i con relación a las demás

$$TTPP = \frac{\text{Área perdida de la categoría } i \text{ en el intervalo de tiempo } [Y_t, Y_{t+1}] / \text{Tamaño del intervalo } [Y_t, Y_{t+1}]}{\text{Área que no es de la categoría } i \text{ en el tiempo } Y_{t+1}}$$

(8)

Donde:

TTPP es la tasa de pérdida promedio de la cobertura i .

Área perdida de la categoría i en el intervalo de tiempo $[Y_t, Y_{t+1}]$ es $\sum Y_{i+}$; con $i = j$.

Tamaño del intervalo $[Y_t, Y_{t+1}]$ es la amplitud del intervalo $[Y_t, Y_{t+1}]$.

Área que no es de la categoría i en el tiempo Y_{t+1} es el área de la zona de estudio menos el área de la categoría i en el tiempo Y_{t+1} .

Para cada uno de los periodos de tiempo es posible describir qué coberturas ceden el área que gana una cobertura y qué coberturas ganan la superficie que pierde. Además, como el análisis se hace en cada periodo de tiempo, se puede conocer si la tasa de la dirección del cambio para cada cobertura es constante o no en el tiempo.

4.3.3 Método espacial y análisis estadístico para conocer las variables ligadas a la deforestación y a la reforestación

Como lo muestra esta tesis y de acuerdo con Landa et al. 1997, Lambin 2003 y Mas et al. 2004, la agricultura, ganadería y asentamientos humanos son las coberturas más asociadas al cambio de la cobertura del suelo. Además correr un modelo estadístico para cada transición de las diferentes coberturas del suelo sería poco práctico porque se tendrían

que evaluar cientos de éstos y como se vio en este trabajo no todas las coberturas son significativamente activas. Así es que se optó por reclasificar los mapas de cambio en mapas de deforestación y recuperación de la vegetación para usarlos como variables dependientes en el modelo (figura 4.3).

Es claro que las causas más próximas al cambio de la cobertura del suelo son los factores biofísicos, los asentamientos humanos y toda la infraestructura que los rodea (Turner 1989, Lambin 1994, Irwin y Geoghegan 2001, Serneels 2001 y Bürgi et al. 2004). Además como de los mapas de curvas de nivel, hidrología, uso del suelo y vegetación y topografía se pueden obtener la pendiente, altitud, distancia a cuerpos de agua (factores biofísicos), distancia a caminos y distancia a asentamientos humanos (factores antrópicos), se decidió trabajar los factores anteriores como variables independientes para explicar la deforestación y la recuperación de la vegetación natural (figura 4.4).

4.3.3.1 Método estadístico para determinar las variables que condicionan la deforestación y la reforestación

Con toda la información generada de los mapas se formó una base de datos que se manejó en el paquete estadístico R para analizar la relación entre los factores biofísicos y antrópicos con la deforestación y recuperación.

El análisis de la relación entre las variables independientes con la deforestación y recuperación se llevó a cabo por medio de una regresión logística. Se escogió esta técnica debido a su capacidad de trabajar con variables dependientes dicotómicas y variables independientes nominales, ordinales y continuas (Moore y McCabe 1998, Mertens y Lambin 2000, Florent 2002, Iachine 2002).

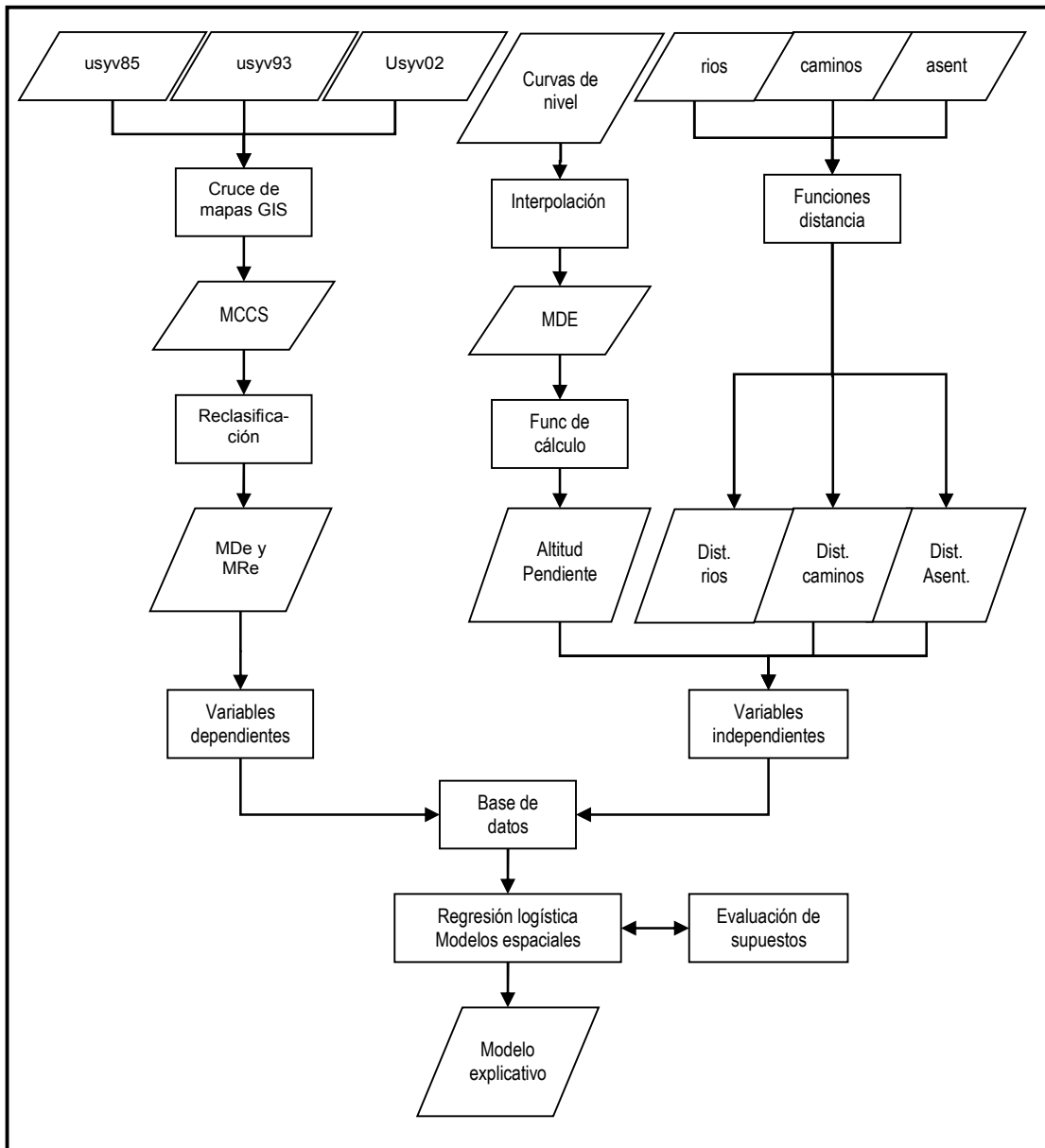


Figura 4.4. Procedimiento del análisis y modelación del cambio de uso del suelo y vegetación.

El modelo logístico permite identificar los factores que parece están condicionando la deforestación y la reforestación y determinar la probabilidad de que ocurra dicho cambio, ya que se obtienen coeficientes que muestran el efecto relativo de cada variable independiente, basados en datos derivados de muestras aleatorias del sitio de estudio (Figura 4.4).

La estimación se realizó para conocer cuáles son los factores responsables del cambio de uso del suelo y vegetación para los diferentes tipos de suelo y vegetación definidos para este estudio.

La interpretación de los resultados del modelo se basará en los valores de las razones de momios. Esta es una medida de asociación que explica qué tan probable es el cambio en función de una o más variables independientes (Hosmer y Lemeshow 1989).

La Hipótesis para probar esta relación es:

Ho: No hay relación entre la deforestación o reforestación y los factores biofísicos y antrópicos.

Ha: Existe una relación entre la deforestación o reforestación y los factores biofísicos y antrópicos.

El planteamiento estadístico de los enunciados anteriores es:

El efecto que tiene cada una de las variables independientes en el cambio es igual a cero.

$$Ho: \beta_1 + \dots + \beta_n = 0$$

Al menos el efecto de una de las variables independientes es diferente de cero

$$Ha: \beta_1 + \dots + \beta_n \neq 0$$

La forma general del modelo logístico es:

$$\text{logit}(p) = \left(\frac{p}{1-p} \right) = \alpha + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n$$

La probabilidad de ocurrencia del cambio puede ser expresada cuantitativamente en términos de las variables independientes por:

$$p = \frac{\exp(\alpha + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n)}{1 + \exp(\alpha + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n)}$$

Donde:

p es la probabilidad que se presente el cambio.

α es la ordenada al origen

β es el efecto que tiene cada variable independiente en el cambio (razón de cambio)

X representa a las diferentes variables independientes.

La significancia y bondad de ajuste del modelo se evaluaron con el estadístico χ^2 que, convencionalmente se usa para conocer qué tanta de la variabilidad del cambio es explicada por las variables independientes del modelo.

5 RESULTADOS

5.1 Tasa de cambio por intervalo

La primera parte de este modelo consistió en analizar el cambio general para cada intervalo de tiempo con las formulas 1 y 2, antes de evaluarlo por categoría.

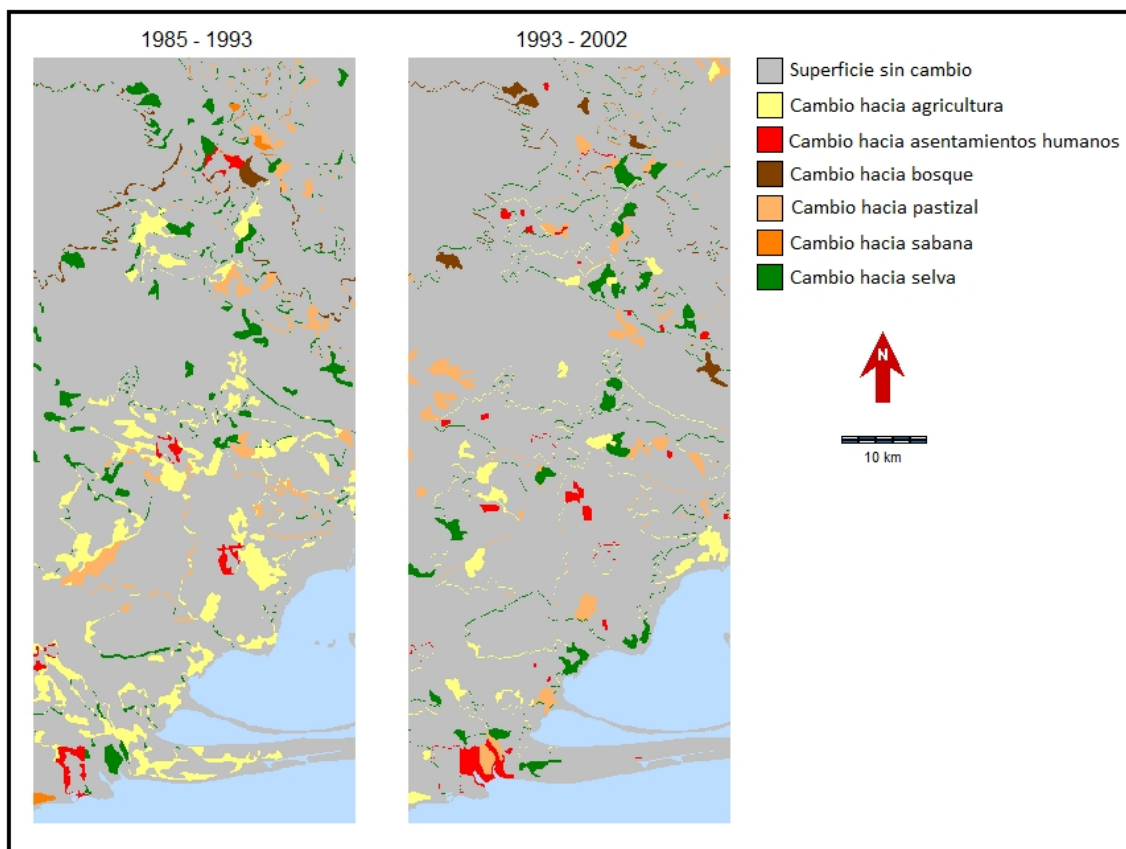


Figura 5.1. Mapas de cambio de la cobertura del suelo en la zona de estudio para los dos intervalos de tiempo

Las barras a la izquierda del cero de la figura 5.2 y los mapas de la figura 5.1 muestran que el porcentaje de área que cambió con relación a la superficie total de la zona de estudio; en el primer intervalo de tiempo fue 19.2%, un valor considerablemente mayor a 12% del segundo periodo. Sin embargo, al ponderar el cambio neto o global por el tiempo que dura el intervalo, es decir, el promedio del cambio total por el número de años del periodo (tasa de cambio anual) y se compara como lo muestran las

barras de la derecha de la figura 5.2, resulta que el primer periodo presenta una velocidad de cambio anual de 2.4% y el segundo periodo de 1.3%. Esto supone que la dinámica temporal del cambio de la cobertura del suelo a nivel global (cantidad de cambio por año), sin tomar en cuenta las categorías de la cobertura, se redujo a la mitad en el periodo 1993 a 2002.

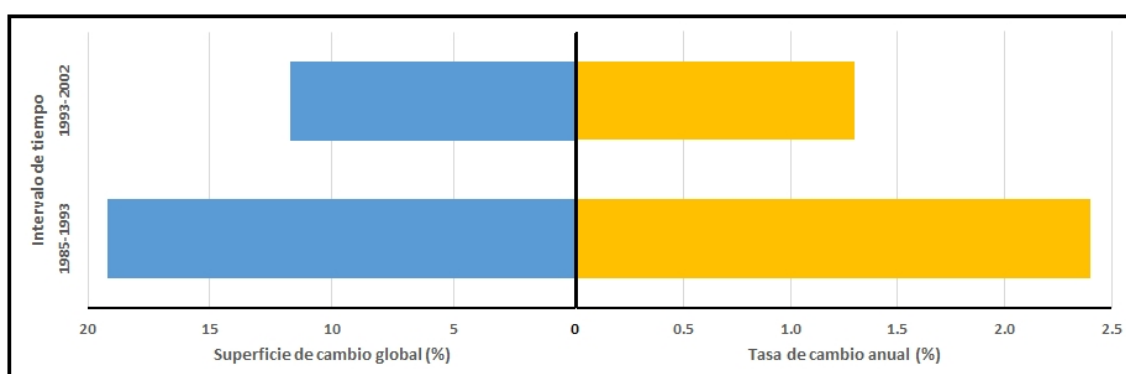


Figura 5.2. Análisis del cambio para los dos intervalos de tiempo. Las barras a la izquierda del cero representan el porcentaje de cambio global del área de estudio. Las barras a la derecha del cero representan la tasa de cambio anual.

5.2 Análisis del cambio por cobertura del suelo dentro de cada periodo

Ya que se conoce cómo fue la dinámica temporal del cambio de la cobertura del suelo en cada intervalo de tiempo, el paso lógico y natural fue evaluar la dinámica espacial y temporal de las diferentes categorías implicadas en este cambio para cada intervalo de tiempo y compararlas con el comportamiento global para conocer qué coberturas son las más dinámicas.

La tabla 5.1 y las figuras 4.1 y 5.3 muestran que la cobertura con mayor territorio en la zona de estudio es la selva baja caducifolia y subcaducifolia (Sbcs) con un promedio de cobertura de 18.5% en las tres fechas. La agricultura de riego (Ar), la de temporal (Ar), el bosque de pino-encino (Be), la selva alta y mediana perennifolia (Samp) y la subperennifolia (Sams) presentan una superficie parecida que oscila entre 10% y 14.6%, mientras que los asentamientos humanos, la sabana (Sa), el bos-

que mesófilo de montaña (Bmm), el bosque de pino (Bp) y el de encino (Be) son los menos representados con una cobertura promedio entre 0.2% y 1.5% de la zona de estudio.

Tabla 5.1. Superficie de las diferentes coberturas del suelo en las tres fechas consideradas en este estudio.

Cobertura	1985		1993		2002	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Ar	397.13	12.2	476.54	14.6	465.39	14.3
At	296.36	9.1	372.40	11.4	359.16	11.0
<i>Agricultura</i>	<i>693.49</i>	<i>21.3</i>	<i>848.94</i>	<i>26.0</i>	<i>824.55</i>	<i>25.3</i>
Ah	28.06	0.9	48.95	1.5	80.53	2.5
Be	18.10	0.6	15.01	0.5	17.94	0.6
Bp	19.92	0.6	14.84	0.5	19.63	0.6
Bpe	348.03	10.7	347.59	10.6	349.40	10.7
Bmm	26.60	0.8	25.64	0.8	26.66	0.8
<i>Bosque</i>	<i>412.65</i>	<i>12.7</i>	<i>403.07</i>	<i>12.3</i>	<i>413.62</i>	<i>12.7</i>
Pc	321.70	9.9	356.90	10.9	365.47	11.2
Pi	53.76	1.7	12.76	0.4	44.42	1.4
P	375.46	11.5	369.66	11.3	409.89	12.6
S	38.10	1.2	41.69	1.3	37.22	1.1
Samp	412.32	12.7	412.62	12.6	399.83	12.3
Samsp	293.29	9.0	284.76	8.7	276.02	8.5
Sbcs	671.80	20.6	599.30	18.4	566.79	17.4
Sbe	245.36	7.5	181.81	5.6	172.75	5.3
<i>Selva</i>	<i>1,622.78</i>	<i>49.8</i>	<i>1,478.50</i>	<i>45.3</i>	<i>1,415.40</i>	<i>43.4</i>
Otras	88.27	2.7	75.02	2.3	77.77	2.4
Natural	2,161.80	66.3	1,998.28	61.2	1,944.01	59.5
Antrópica	1,097.00	33.7	1,267.54	38.8	1,314.96	40.5

Ar. Agricultura de riego, **At.** Agricultura de temporal, **Ah.** Asentamientos humanos, **Be.** Bosque de encino, **Bp.** Bosque de pino, **Bpe.** Bosque de pino-encino, **Bmm.** Bosque mesófilo de montaña, **P.** Pastizal, **S.** Sabana, **Samp.** Selva alta y mediana perennifolia, **Samsp.** Selva alta y mediana subperennifolia, **Sbcs.** Selva baja caducifolia y subcaducifolia, **Sbe.** Selva baja espinosa.

La agricultura es la segunda cobertura en extensión en la zona de estudio. En 1985 representaba un poco más de 21% de la superficie de estudio, al final del primer periodo tenía 26% y en el 2002 el 25% (Tabla 5.1).

Esta cobertura mostró la segunda tasa de crecimiento más grande del primer periodo, un poco más de 22%, mientras que para 2002 redujo la superficie que presentaba al inicio del segundo periodo un 3%. Esto quiere decir que durante los primeros 9 años aumentó 2.3% anual su superficie y en los últimos diez años la disminuyó a una tasa anual de -0.29% (Tabla 5.2 y Figura 5.4).

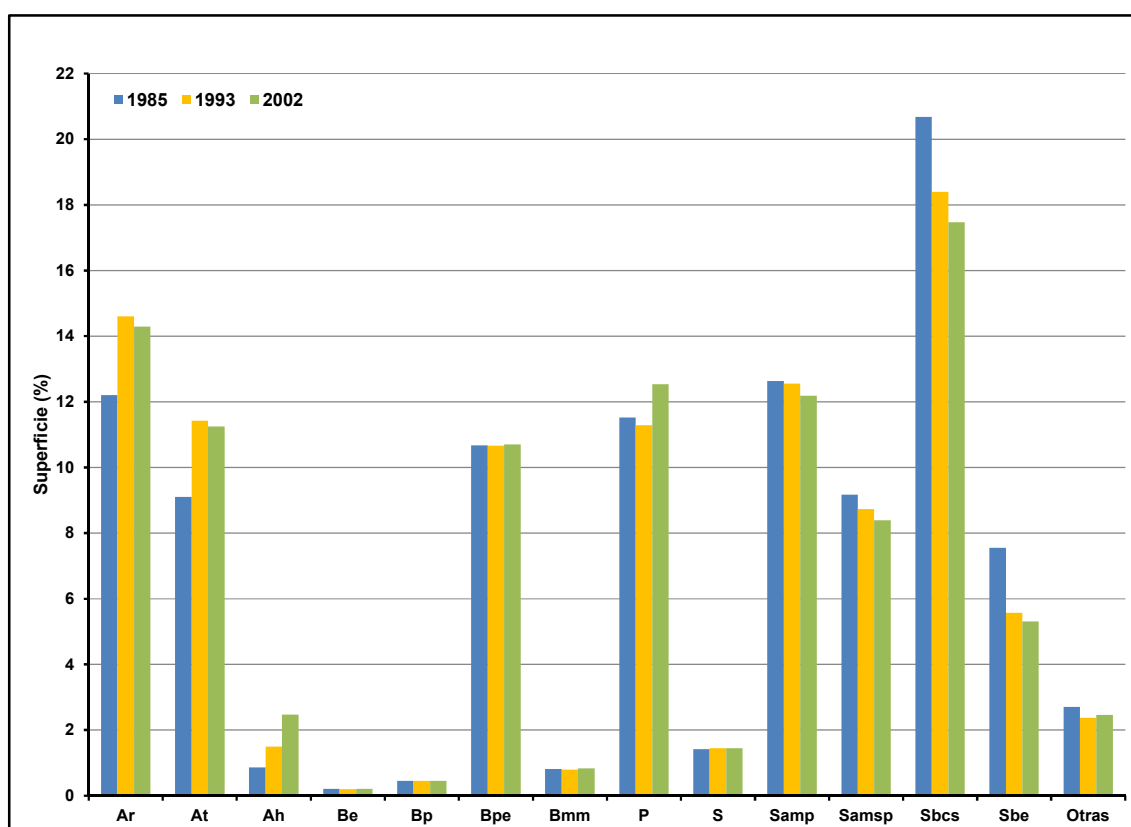


Figura 5.3. Porcentaje de la extensión de las coberturas del suelo consideradas en el estudio. **Ar.** Agricultura de riego, **At.** Agricultura de temporal, **Ah.** Asentamientos humanos, **Be.** Bosque de encino, **Bp.** Bosque de pino, **Bpe.** Bosque de pino-encino, **Bmm.** Bosque mesófilo de montaña, **P.** Pastizal, **S.** Sabana, **Samp.** Selva alta y mediana perennifolia, **Samsp.** Selva alta y mediana subperennifolia, **Sbcsc.** Selva baja caducifolia y subcaducifolia, **Sbe.** Selva baja espinosa.

El análisis por tipo de agricultura, muestra que la superficie de la agricultura de riego (Ar) es, en promedio, 3% más extensa que la agricultura de temporal (At) en los tres años de estudio (Tabla 5.1 y Figura 5.3). La tasa de crecimiento de la agricultura de temporal fue casi 6% más grande que la de la agricultura de riego y su velocidad de crecimiento anual 0.6% más grande. En el segundo periodo los dos usos del suelo disminu-

yeron su área alrededor del 2% la Ar y 3.5% la At a una tasa de decremento anual de -0.2% y -0.35% respectivamente (Tabla 5.2 y Figura 5.4).

Con respecto a la dinámica espacial de los asentamientos humanos (Ah), fue la única cobertura antrópica que tuvo una tasa de cambio positiva en los dos periodos de estudio. En el primer intervalo de tiempo aumentó su superficie de 0.9% en 1985, a 1.5% en 1993 y en el 2002 alcanzó una representación de 2.5% del área de la zona de estudio; esto significa que aumentó cerca de tres veces su superficie en los 19 años del periodo de estudio (Tabla 5.1 y Figura 5.3).

Esta cobertura muestra la segunda tasa de cambio anual más grande en los dos periodos, en el primero aumentó su superficie 74%, a una velocidad de crecimiento del 6.4% anual y en el segundo periodo aumento el área que tenía en 1991 en un 64%, lo que representa una tasa anual de crecimiento del 5.1%; 1.3% menor que la del segundo periodo (Tabla 5.2 y figura 5.4).

El bosque de pino-encino (Bpe) representa casi por completo al bosque presente en la zona de estudio. Su superficie varió 0.1% durante los tres años de estudio (Tabla 5.2, Figura 5.4). Aunque ha disminuido, esta reducción ha sido muy pequeña (Tabla 5.1).

La superficie que ocupan los demás tipos de bosque: encino (Be), pino (Bp) y mesófilo de montaña (Bmm) es menor al 1% del área total de estudio y se mantuvo muy parecida durante los dos intervalos de tiempo, además los tres perdieron superficie en el primero y la recuperaron en el segundo (Figura 5.1 y Tabla 5.3). De éstos, el Bp disminuyó 25.5% su cobertura en el primer periodo a una tasa de cambio anual de -3.2% y la aumentó 32% en el segundo a una velocidad de 2.8% anual, el Be perdió 17% de su superficie a una tasa anual de -2% y, con respecto a 1993, en el segundo periodo la aumento 19.6 % a la misma velocidad que la perdió. Finalmente, el Bmm, igual que el Bpe mostró tasas de cambio general y

anual de pérdida (3.6% y -0.4%) y recuperación (4% y 0.4%) muy pequeñas en ambos periodos (Tabla 5.2).

Tabla 5.2. Porcentaje de cambio y tasa de cambio anual de los diferentes tipos de cobertura del suelo considerados en el estudio, para cada intervalo de tiempo.

Cobertura	1985 - 1993			1993 - 2002		
	km ²	Global (%)	Anual(%)	km ²	Global (%)	Anual(%)
Agr	79.41	20.0	2.05	-11.14	-2.3	-0.24
Agt	76.05	25.7	2.57	-13.25	-3.6	-0.36
<i>Agricultura</i>	155.46	22.4	2.27	-24.39	-2.9	-0.29
Ah	20.89	74.4	6.38	31.58	64.5	5.10
Be	-3.09	-17.1	-2.06	2.93	19.6	1.80
Bp	-5.07	-25.5	-3.21	4.79	32.3	2.84
Bpe	-0.45	-0.1	-0.01	1.81	0.5	0.05
Bmm	-0.96	-3.6	-0.41	1.02	4.0	0.39
<i>Bosque</i>	-9.58	-2.3	-0.261	10.55	2.6	0.26
Pc	35.20	10.9	1.160	8.57	2.4	0.24
Pi	-41.00	-76.3	-14.77	31.66	248.1	13.28
<i>P</i>	-5.80	-1.5	-0.17	40.23	10.9	1.04
S	3.59	9.4	1.01	-4.46	-10.7	-1.13
Samp	-0.30	-0.1	-0.01	-12.79	-3.1	-0.31
Samsp	-8.53	-2.9	-0.33	-8.74	-3.1	-0.31
Sbc	-72.50	-10.8	-1.26	-32.51	-5.4	-0.56
Sbe	-63.55	-25.9	-3.28	-9.06	-5.0	-0.51
<i>Selva</i>	-144.28	-8.9	-1.03	-63.10	-4.3	-0.44
Otras	-13.25	-15.0	-1.79	2.75	3.7	0.36
Natural	-163.52	-7.6	-0.87	-54.26	-2.7	-0.27
Antrópica	170.54	15.5	1.62	47.42	3.7	0.37

Ar. Agricultura de riego, **At.** Agricultura de temporal, **Ah.** Asentamientos humanos, **Be.** Bosque de encino, **Bp.** Bosque de pino, **Bpe.** Bosque de pino-encino, **Bmm.** Bosque mesófilo de montaña, **P.** Pastizal, **S.** Sabana, **Samp.** Selva alta y mediana perennifolia, **Samsp.** Selva alta y mediana subperennifolia, **Sbcs.** Selva baja caducifolia y subcaducifolia, **Sbe.** Selva baja espinosa.

Si se analiza el pastizal con sus dos categorías agrupadas parece que no presentó cambios tan marcados como las dos coberturas anteriores (Figura 5.3). En 1985 representaba 11.5% de la superficie total del área de estudio y la disminuyó apenas a 11.3% al final del primer periodo, aunque para el término del estudio la aumentó muy ligeramente a 12.5% con res-

pecto a 1993 (Tabla 5.1). Esta categoría disminuyó su área 1.5%, a una tasa anual de -0.2% durante el primer intervalo de tiempo, pero en el segundo presenta una de las tasas de cambio más altas (11%) a una velocidad de cambio anual del 1% (Tabla 5.2 y Figura 5.4).

Al desagrupar la cobertura en sus dos categorías, el Pastizal cultivado (Pc) resultó ser una cobertura sin cambios drásticos en los dos periodos de tiempo; al final del estudio apenas aumento su cobertura 45 hectáreas (1.3%) (Tabla 5.1), en el primer periodo aumentó su cobertura 11% a una velocidad apenas mayor de 1% anual y en el segundo creció 2.4% a una tasa anual de 0.2% .

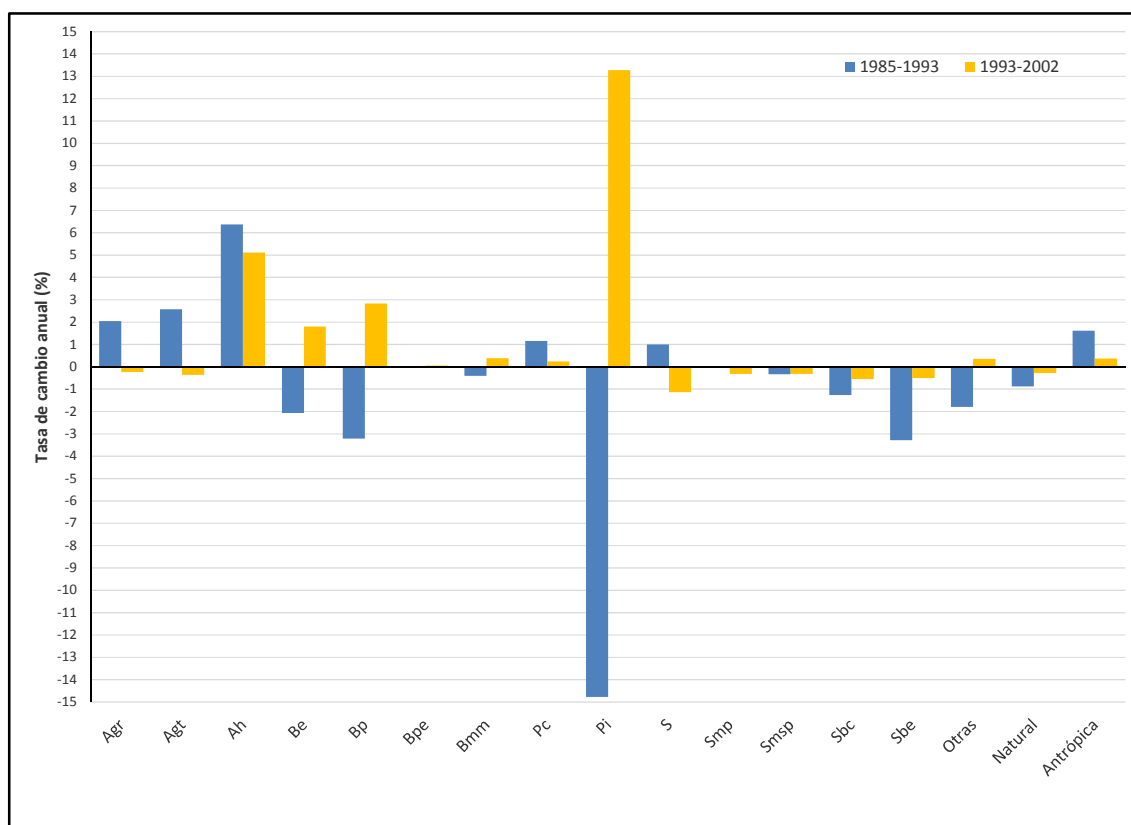


Figura 5.4. Tasa de cambio anual de las coberturas del suelo consideradas en el estudio. **Ar.** Agricultura de riego, **At.** Agricultura de temporal, **Ah.** Asentamientos humanos, **Be.** Bosque de encino, **Bp.** Bosque de pino, **Bpe.** Bosque de pino-encino, **Bmm.** Bosque mesófilo de montaña, **P.** Pastizal, **S.** Sabana, **Samp.** Selva alta y mediana perennifolia, **Samsp.** Selva alta y mediana subperennifolia, **Sbcs.** Selva baja caducifolia y subcaducifolia, **Sbe.** Selva baja espinosa.

En contraste el Pastizal inducido (Pi) presentó, tanto la tasa de cambio, como la tasa de cambio anual más pequeña y más grande de los dos in-

tervalos de tiempo respectivamente (Tabla 5.1 y Figura 5.3). En el primero disminuyó su superficie 76% a una tasa de decremento anual de -14.8%, mientras que en el segundo periodo la aumentó 250% con respecto a 1993 a una velocidad de 13% anual (Tabla 5.2 y Figura 5.4).

El bosque fue una de las dos coberturas menos dinámicas en este estudio, en 1985 su superficie equivalía a 12.7% del área de estudio, en 1993 apenas disminuyó 0.04% y al final del segundo periodo volvió a quedar en 12.7% del área total de la zona de estudio (Tabla 5.1 y Figura 5.3). Con respecto a la tasa de cambio, como se puede ver en la tabla 5.2, las tasas de pérdida general y anual de 1985 a 1993 (-2.3% y -0.26 respectivamente) son casi idénticas a las tasas de ganancia que muestra de 1993 a 2002 (2.6% y 0.26%) y muy pequeñas las todas (Tabla 5.2 y Figura 5.4).

La sabana resultó ser una de las coberturas más estables durante los dos periodos de tiempo. De 1985 a 1993 su superficie pasó de 1.2% del área total de estudio a 1.3% y de 1993 a 2002 disminuyó a 1.1% (Tabla 5.1 y Figura 5.3), lo que se traduce en una tasa de cambio anual muy pequeña en ambos periodos de tiempo; en el primero creció su área 9.4% a una velocidad de 1% anual mientras que en el segundo perdió casi 11% de su superficie a una tasa anual de 1.1% (Tabla 5.2 y figura 5.4).

Como se muestra en la tabla 5.1, la selva es la cobertura de mayor superficie en el área de estudio y una de las coberturas más dinámicas. Disminuyó su superficie en los dos periodos de estudio, en 1985 ocupaba 50% del área total, para 1993 su ocupación disminuyó 5% y para 2002 su superficie era un poco más de 43%.

Esta categoría es la única cobertura que presenta tasas de cambio global y anual negativas en los dos periodos de estudio, la del primero son -9% y -1% respectivamente, dos veces más grande que las del segundo periodo (-4.3% y -0.4% respectivamente) (Tabla 5.2). También es la única cobertura en la que todas sus categorías disminuyeron su superficie en ambos periodos (Tabla 5.1 y Figura 5.3).

Las coberturas con mayor disminución de su superficie fueron la selva baja espinosa (Sbe) y la selva baja caducifolia y subcaducifolia (Sbcs), la primera redujo su cobertura de 1985 a 1993 26% a una tasa anual de -3.3% y de 1993 a 2002 perdió 5% a una velocidad de -0.5% anual. La Sbcs hasta 1993 había perdido 11% de su cobertura a una tasa anual de 1.3% y para el 2002 la disminuyó 5.4% a una tasa anual de 0.6% (Tabla 5.2 y Figura 5.4).

La selva alta y mediana subperennifolia (Samsp) redujo su extensión alrededor de 3% a una velocidad de 0.3% anual en ambos periodos (Tabla 5.2 y Figura 5.4).

Con respecto a la selva alta y mediana perennifolia (Samp), ésta fue la cobertura más estable de todas las categorías de selva, mostró una reducción en su superficie no mayor de 5% al final de los dos periodos (Tabla 5.1). De 1985 a 1993 apenas redujo su superficie 0.1% a una tasa de cambio anual de 0.01%. Sin embargo, de 1993 a 2002 perdió un poco más de 3% de su cobertura a una tasa anual de 0.3% (Tabla 5.2 y Figura 5.4).

5.3 Análisis del cambio de la cobertura del suelo en función de la pérdida y ganancia de superficie

Aunque con el análisis a nivel categórico del apartado anterior, ya se puede tener una idea general de la dinámica del cambio de la cobertura del suelo en la zona de estudio, es evidente que las coberturas ganan y pierden superficie continuamente, por lo tanto, es necesario analizar el proceso de cambio desde estas perspectivas (Pontius 2004). Este análisis consistió en evaluar la dinámica del cambio en el contexto particular de la pérdida y de la ganancia de superficie para cada cobertura del suelo en cada uno de los periodos de estudio utilizando las fórmulas 4 y 5.

Como muestran la tabla 5.3 y la figura 5.5 la dinámica espacial y temporal del cambio de la cobertura del suelo con respecto a la ganancia y

pérdida de la superficie en la zona de estudio no es uniforme entre categorías, ni dentro de cada intervalo, ni entre intervalos.

En el intervalo de 1985 a 1993, con respecto al área de cambio (lado izquierdo del 0 de la gráfica de la figura 5.5), las coberturas que presentaron una ganancia de superficie mayor que la pérdida fueron la At, la Ar, el Pc, los Ah y la Sa; las tres primeras fueron las que presentaron las áreas de cambio más grandes en este periodo, los Ah moderado y la Sa muy pequeño en comparación con las coberturas de agricultura y el Pc. Las coberturas que perdieron más superficie de la que ganaron fueron la Sbcs, la Sbe, la Sams, el Pi, el Be, el Bp y el Bmm; la Sbcs y la Sbe presentaron las áreas de pérdida más grande de este intervalo seguidas del Pi y de las pérdidas de las categorías del bosque, que parecen mínimas en comparación con las de las otras. La Sams y el Bpe perdieron la misma cantidad de superficie que la ganaron (Tabla 5.3 y Figura 5.5).

Con respecto a la tasa de ganancia y pérdida anual (lado derecho del 0 de la gráfica de la figura 5.5) es evidente que, aunque el Pi muestra áreas de pérdida baja y de ganancia muy pequeña, es una de las coberturas más dinámicas, ya que, cuando se pondera por su superficie total y la duración del intervalo, presenta la tasa de pérdida más grande del periodo y la de ganancia también es significativamente mayor a la tasa de cambio anual promedio para el intervalo. La At también muestra tasas de ganancia y pérdida anuales más grandes que la de cambio anual promedio, pero a diferencia del Pi la de ganancia es mayor que la de pérdida.

Otras coberturas que presentan la tasa de ganancia anual significativamente más grande que la tasa de cambio anual promedio para el intervalo de 1985 a 1993 fueron los Ah, que muestran la segunda tasa de ganancia anual más grande, la Ar, el Pc (Tabla 5.3 y Figura 5.5).

Por otro lado, las coberturas con tasas de pérdida anual significativas fueron la Sbe, que presentó la segunda más grande y los bosques de encino y de pino que, al igual que el Pi, cuando se ponderó por su área total

y el tamaño del intervalo de tiempo, se hizo evidente que son de las coberturas que más cedieron superficie durante el primer periodo de estudio. Finalmente las coberturas cuyas tasas de ganancia y pérdida anuales fueron menores que la tasa de cambio anual promedio fueron el Bpe, el Bmm, la Sbcs, la Samp y la Samsp (Tabla 5.3 y Figura 5.5).

Tabla 5.3. Área de cambio y tasas de pérdida y ganancia anuales para cada periodo de estudio.

Cobertura	1985 - 1993				1993 - 2002			
	Ganancia		Pérdida		Ganancia		Pérdida	
	Área de cambio (miles de pixeles)	Tasa de cambio (%)	Área de cambio (miles de pixeles)	Tasa de cambio (%)	Área de cambio (miles de pixeles)	Tasa de cambio (%)	Área de cambio (miles de pixeles)	Tasa de cambio (%)
Ar	19.19	3.62	8.16	1.85	4.87	0.94	5.95	1.12
At	25.25	6.11	14.73	4.48	7.98	2.00	9.64	2.33
Ah	3.09	5.72	0.22	0.72	4.27	4.79	0.37	0.69
Be	0.21	1.24	0.64	3.16	0.49	2.48	0.13	0.79
Bmm	0.25	0.88	0.38	1.30	0.26	0.88	0.13	0.47
Bp	0.16	0.97	0.86	3.91	0.68	3.11	0.09	0.52
Bpe	2.94	0.76	3.00	0.78	2.28	0.59	2.05	0.53
Pc	11.69	2.95	6.80	1.90	6.50	1.60	5.44	1.37
Pi	0.54	3.84	6.24	10.44	4.02	8.15	0.11	0.79
Sa	1.10	2.38	0.60	1.43	0.23	0.56	0.78	1.69
Samp	5.02	1.09	4.97	1.09	2.66	0.60	4.24	0.92
Samsp	4.45	1.41	5.63	1.73	2.59	0.85	3.67	1.16
Sbcs	7.67	1.15	17.53	2.36	4.91	0.78	8.92	1.34
Sbe	4.93	2.49	14.15	5.20	5.19	2.71	6.12	3.06
Otra	0.41	0.59	2.98	3.34	0.91	1.13	0.21	0.28

Nota: Los números grandes y en negritas indican tasas de cambio anuales de ganancia y pérdida más grandes que las tasas anuales promedio para cada intervalo, 2.4 para 1985-1993 y 1.3 para 1993-2002.

Ar. Agricultura de riego, **At.** Agricultura de temporal, **Ah.** Asentamientos humanos, **Be.** Bosque de encino, **Bp.** Bosque de pino, **Bpe.** Bosque de pino-encino, **Bmm.** Bosque mesófilo de montaña, **P.** Pastizal, **S.** Sabana, **Samp.** Selva alta y mediana perennifolia, **Samsp.** Selva alta y mediana subperennifolia, **Sbcs.** Selva baja caducifolia y subcaducifolia, **Sbe.** Selva baja espinosa.

De 1993 a 2002 las coberturas con más intercambio de su superficie fueron la At, el Pc, la Sbe, la Sbcs y la Ar; con uno moderado los Ah, el Pi, la Samp, la Samsp y el Bpe, mientras que el Bp, el Be, el Bmm y la Sa mostraron cambios de superficie muy pequeños en comparación con las demás categorías (Tabla 5.3 y parte a la izquierda del 0 de la gráfica de la figura 5.5).

En contraste con el primer intervalo de tiempo, la Ar, la At, la Samp y la Sa perdieron más área de la que ganaron, mientras que el Pi, el Be, el Bp,

el Bmm y, casi imperceptiblemente el Bpe, en este intervalo ganaron más superficie de la que perdieron. Las coberturas que perdieron más superficie de la que ganaron en ambos periodos fueron la Sbe, la Sbcs y la Samp y las que ganaron más de la que perdieron en ambos periodos fueron los Ah y el Pc (Tabla 5.3 y parte a la izquierda del 0 de la gráfica de la figura 5.5).

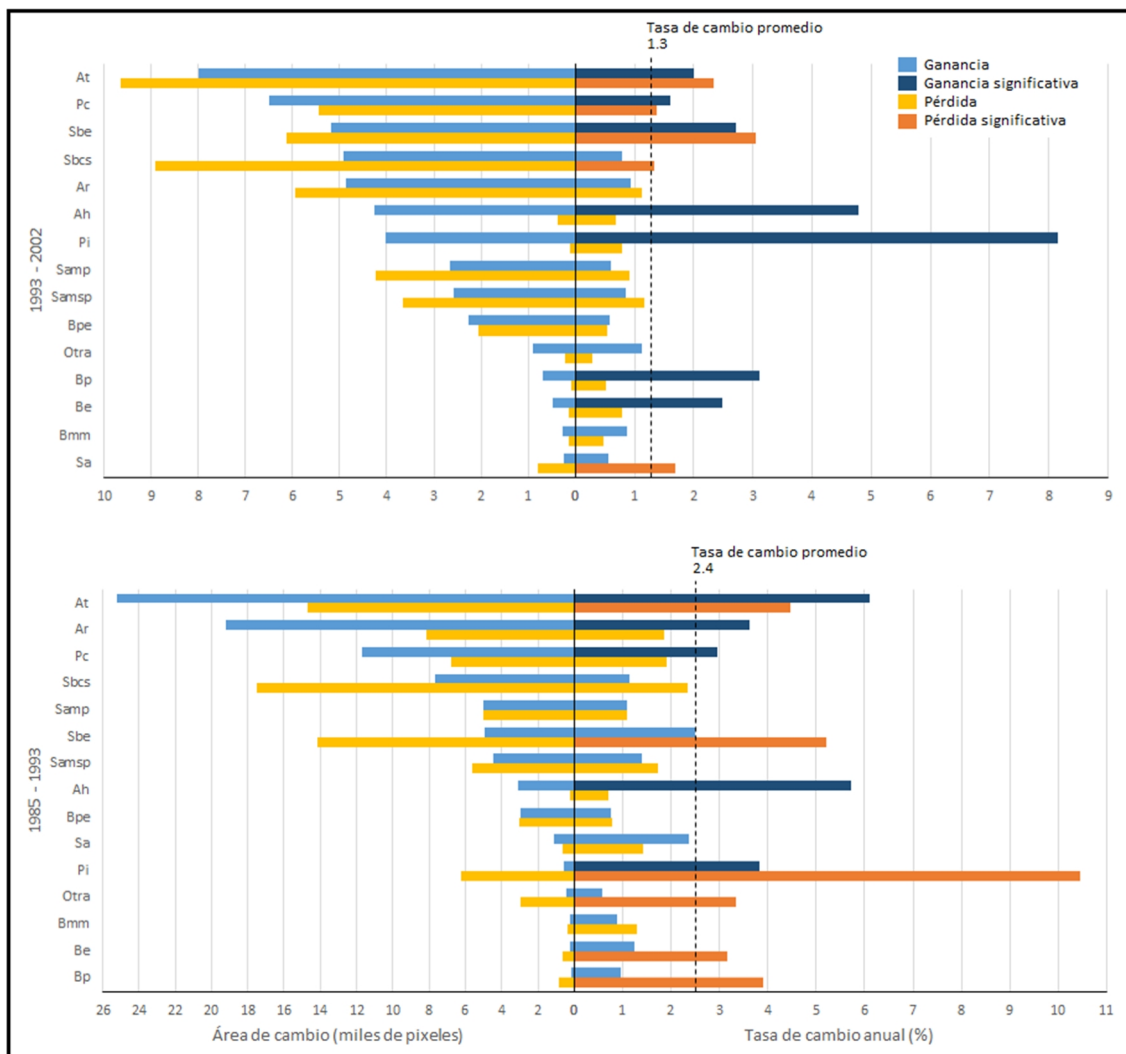


Figura 5.5. Análisis del cambio para los dos intervalos de tiempo. Las barras a la izquierda del cero representan el porcentaje de cambio global del área de estudio. Las barras a la derecha del cero representan la tasa de cambio anual. **Ar.** Agricultura de riego, **At.** Agricultura de temporal, **Ah.** Asentamientos humanos, **Be.** Bosque de encino, **Bp.** Bosque de pino, **Bpe.** Bosque de pino-encino, **Bmm.** Bosque mesófilo de montaña, **Pc.** Pastizal cultivado, **Pi.** Pastizal inducido, **S.** Sabana, **Samp.** Selva alta y mediana perennifolia, **Samsp.** Selva alta y mediana subperennifolia, **Sbcs.** Selva baja caducifolia y subcaducifolia, **Sbe.** Selva baja espinosa.

Con respecto a las tasas de ganancia y pérdida anuales (Tabla 5.3 y par-

te a la derecha del 0 de la gráfica de la figura 5.5), las coberturas que muestran la tasa de ganancia anual significativamente más grande que la anual promedio para el periodo son, en orden decreciente el Pi, los Ah, el Bp, la Sbe, el Be y el Pc; las que tienen la tasa de ganancia anual más grande que la de cambio anual promedio son, en orden decreciente la Sbe, la At, la Sa y el Pc. Las tasas de las otras coberturas no resultaron ser más grandes que la anual promedio y sus cantidades son muy similares (Tabla 5.3 y parte a la izquierda del 0 de la gráfica de la figura 5.5).

5.4 Análisis de transición de la superficie de la cobertura del suelo

En el apartado 5.1 se comparó el cambio y la tasa de cambio globales entre intervalos de tiempo para determinar si la velocidad del cambio era o no constante en el tiempo. En el apartado 5.2 se analizó la tasa de cambio anual de cada cobertura. En el 5.3 se comparó la tasa de ganancia y pérdida anual de cada categoría contra la tasa de cambio anual promedio dentro de cada periodo de estudio para conocer como varía tanto espacial, como temporalmente la intensidad del proceso de cambio entre las categorías de estudio. Otra etapa para profundizar aún más en la descripción de este fenómeno, es determinar cómo intercambian su área las coberturas involucradas en el análisis, es decir, qué coberturas ganan la superficie que pierde una cobertura en especial con la fórmulas 6 y 8, y de donde viene la superficie que gana una cobertura específicamente con las fórmulas 5 y 7.

La tabla 5.4 muestra las tasas de intercambio o transición anuales estadísticamente significativas ($p < 0.05$) mayores que la tasa de transición anual promedio de la categoría que gana o cede superficie, para las categorías que en el apartado anterior tuvieron tasas de ganancia o pérdida anuales mayores a la tasa de cambio anual promedio en cada intervalo. Los números azules indican la tasa de transición anual de la superficie que ganan las categorías en los renglones desde las categorías en las

columnas y se leen horizontalmente. Los números rojos indican la tasa de transición anual de la superficie que ceden las categorías en las columnas hacia las categorías de las columnas y se leen verticalmente.

De tal forma, se observa que, de 1985 a 1993 las coberturas que cedieron su superficie a la Ar con mayor velocidad son la Sbcs, la Sbe, pero sobre todo la At y el Pi. Por otro lado, la Ar no presentó tasas de transición de pérdida significativas ($p < 0.05$) con ninguna de las otras coberturas. La At ganó más rápidamente área de la Samp, el Pi, y a mayor velocidad de la Ar y sobretodo de la Sbe. En cambio, solamente perdió su superficie a una tasa de transición significativa con la Sbe y principalmente con los Ah y la Ar. La At y el Be fueron las coberturas que le cedieron su superficie a los Ah con mayor velocidad y un poco más lentamente, pero significativamente, la Ar, el Pc, el Pi, la Sa y la Sbcs. En cambio, los Ah no mostraron tasas de transición de pérdida significativas hacia ninguna cobertura. Por su parte, el Pc ganó superficie de la Samp, la Samsp, la Sbcs y la Sbe, a una tasa más o menos parecida, pero del Pi lo hace 5 veces más rápido en comparación con las anteriores. Y como los Ah no mostró tasas de transición de pérdida significativas hacia las otras coberturas. El Pi sólo ganó superficie de la Sbcs y de la Sbe de manera significativa, pero le cedió de forma relevante a la Ar, los Ah, el Be, el Bp, la Sa, la Samp y la Samsp. Por su parte la At, el Pi y la Sbcs fueron las coberturas que perdieron su superficie con una tasa de transición significativa a la Sbe, mientras que ésta le cedió la suya a la Ar, y principalmente a la At y al Pi (Tabla 5.4).

De 1993 a 2002 la Ar no presentó tasas de transición anuales significativas. La At mostró un comportamiento consistente con el periodo anterior, siguió ganando superficie de la Ar, el Pi y principalmente de la Sbe. Y le cedió área a la Ar, los Ah, principalmente a la Sbe y ahora, al Pi. Los Ah dejaron de ganar área a tasas de transición anuales significativas del Be, el Pc, el Pi y la Sa, sólo la ganaron de la Ar, la At y de la Sbe principal-

mente, e igual que el periodo anterior no mostraron tasas de transición anuales de pérdida significativas (Tabla 5.5).

Tabla 5.4. Tasas de intercambio o transición anuales significativas por cobertura en el periodo de 1985 a 1993.

1985	1993													
	Ar	At	Ah	Be	Bp	Bpe	Bmm	Pc	Pi	Sa	Samp	Samsp	Sbcs	Sbe
Ar		2.39 1.48							2.61 0.4				0.62	1.08 0.56
At	1.27								1.11			0.77		2.65 1.74
Ah	0.15	0.27 1.63		0.34 0.13				0.14	0.11 0.92	0.1			0.11	
Be									0.53					
Bp									0.45					
Bpe														
Bmm														
Pc									2.84		0.49	0.45	0.37	0.54
Pi													0.03	0.1 1.86
Sa									0.37					
Samp				0.09	0.18				0.33					
Samsp									0.34					
Sbcs														
Sbe		0.14 0.67							0.57				0.32	

Nota: Los números azules indican la tasa de transición anual de la superficie que ganan las categorías en los renglones desde las categorías en las columnas y se leen horizontalmente. Los números rojos indican la tasa de transición anual de la superficie que ceden las categorías en las columnas hacia las categorías de los renglones y se leen verticalmente.

Ar. Agricultura de riego, **At.** Agricultura de temporal, **Ah.** Asentamientos humanos, **Be.** Bosque de encino, **Bp.** Bosque de pino, **Bpe.** Bosque de pino-encino, **Bmm.** Bosque mesófilo de montaña, **P.** Pastizal, **S.** Sabana, **Samp.** Selva alta y mediana perennifolia, **Samsp.** Selva alta y mediana subperennifolia, **Sbcs.** Selva baja caducifolia y subcaducifolia, **Sbe.** Selva baja espinosa.

El Pc dejó de ganar superficie de la Sbcs y Sbe a tasas de transición anuales significativas, pero siguió ganando de la Samp y la Samsp, además de la Ar, los Ah y el Be. A diferencia del periodo anterior, que no le cedió superficie de manera significativa a las otras coberturas, ahora le cedió área a una tasa de transición anual significativa a la Ar, los Ah, al Pi, la Samp, la Sbcs y principalmente a la Samsp. (Tabla 5.5).

Finalmente, la Sa, la Sbcs y la Sbe fueron coberturas que solamente cedieron su superficie a tasas de transición anuales significativas durante este periodo; la primera a la Ar, los Ah, el Bpe y Samp; la segunda y la

tercera a la At los Ah, y al Pi, pero la segunda de manera muy significativa al Pi (Tabla 5.5).

Tabla 5.5. Tasas de intercambio o transición anuales significativas por cobertura en el periodo de 1993 a 2002

1993	2002														
	Ar	At	Ah	Be	Bp	Bpe	Bmm	Pc	Pi	Sa	Samp	Samsp	Sbcs	Sbe	
Ar		0.45						0.2		0.05					
At	0.31								0.26					1.55	
Ah	0.19	0.17						0.18		0.05			0.14	0.52	
Be			0.09			0.01					0.08				
Bp											0.15				
Bpe										0.06					
Bmm															
Pc	0.32		0.29	0.32							0.33	0.30			
Pi		0.32						0.23			0.27		0.34	0.14	
Sa															
Samp								0.24		0.04					
Samsp								0.42							
Sbcs								0.22							
Sbe		1.36											0.95		

Nota: Los números azules indican la tasa de transición anual de la superficie que ganan las categorías en los renglones desde las categorías en las columnas y se leen horizontalmente. Los números rojos indican la tasa de transición anual de la superficie que ceden las categorías en las columnas hacia las categorías de los renglones y se leen verticalmente.

Ar. Agricultura de riego, At. Agricultura de temporal, Ah. Asentamientos humanos, Be. Bosque de encino, Bp. Bosque de pino, Bpe. Bosque de pino-encino, Bmm. Bosque mesófilo de montaña, P. Pastizal, S. Sabana, Samp. Selva alta y mediana perennifolia, Samsp. Selva alta y mediana subperennifolia, Sbcs. Selva baja caducifolia y subcaducifolia, Sbe. Selva baja espinosa.

5.5 Análisis de la relación entre la deforestación y recuperación con los factores biofísicos y antrópicos de la zona de estudio

Como las coberturas que resultaron más activas y dinámicas son las que están involucradas en los procesos de deforestación y recuperación (FAO 2001, Goldewijk y Ramankutty 2003, Mittermeier et al. 2003, Ball 2001); el análisis para conocer que variables biofísicas y antrópicas se relacionan con ellos en la zona de estudio, se definió una cobertura natural con todas las categorías de selva, bosque, sabana y otras, y una cobertura antrópica con las categorías de agricultura, pastizal y asenta-

mientos humanos.

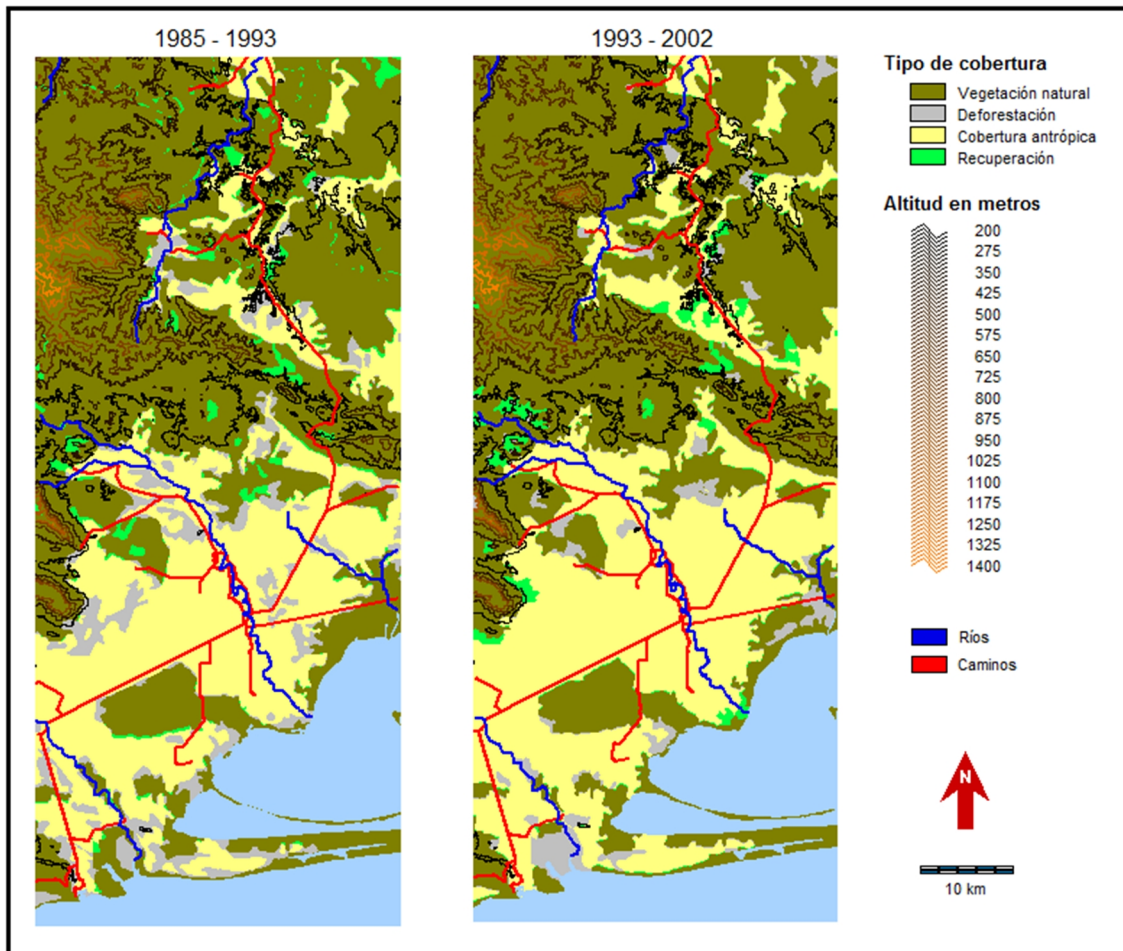


Figura 5.6. Mapas de deforestación y recuperación de la cobertura natural en la zona de estudio para los dos intervalos de tiempo.

La relación se estableció con base en la interpretación de la regresión logística. Para esto se utilizaron los valores de probabilidad, la razón de momios y la bondad de ajuste del modelo (χ^2). Para valores grandes de χ^2 se considera que el efecto del modelo con variables explicativas es diferente del efecto del modelo sólo con la constante.

5.5.1 Modelo para la deforestación

La vegetación natural perdió 256 km² (12%) al final del primer intervalo de estudio a una tasa de cambio de 0.9% anual; en el segundo periodo, aunque la tasa de cambio anual bajó significativamente a 0.3%,

se perdieron 138 km² (7%) de superficie. Para el 2002 la cobertura natural perdió 494 km² (22%) de su área en 1996.

Como se aprecia por los valores de Beta de las variables explicativas en la tabla 5.6 y como era de esperarse, todos los factores se relacionaron negativamente con la deforestación. Esto quiere decir que, a mayor magnitud de cualquiera de las variables independientes que se probaron en el modelo para explicar la deforestación disminuye la cantidad de pixeles del área antrópica. Esta relación se vio reflejada en la razón de momios ($\text{Exp}(\beta)$), ya que todos los valores son menores a 1, lo que quiere decir, que al aumentar la magnitud de cualquiera de las variables explicativas disminuye el riesgo de deforestación. La pendiente fue la variable que presentó la asociación más fuerte, seguida por la distancia a los asentamientos humanos, la altura, la distancia a ríos y por último la distancia a caminos (Tabla 5.6).

Tabla 5.6. Análisis de regresión logística para la deforestación.

Variable Explicativa	Beta	Exp(b)	c²	Sig
Constante	2.917	18.4857	12.89	0.001
Distancia a asentamientos humanos	-1.2356	0.2907		
Distancia a caminos	-0.0649	0.9372		
Distancia a ríos	-0.3771	0.6858		
Altitud	-1.0638	0.3451		
Pendiente	-1.4862	0.2262		

Esto es congruente con lo que se observa en los mapas de la figura 5.6, ya que la mayoría de las manchas de deforestación se dan por debajo de los 200 m de altitud, donde la pendiente del terreno es baja; y principalmente, en la parte sur donde del área de estudio, en la que existe una red de canales de agua y caminos que dan servicio a los distritos de riego de la zona.

5.5.2 Modelo para la recuperación

En 1993 la superficie de vegetación natural ganó 86 km² (7.8%) a las coberturas antrópicas a una tasa de ganancia anual de 0.54% y en el segundo periodo le cedieron 88.4 km² (7%). Al final del estudio ganó 174.4 km² que representan 8% de la superficie de la vegetación natural al principio del estudio, el 35% del área perdida y 16% de la superficie de la cobertura antrópica al principio del estudio.

Para confirmar visiblemente lo dicho en el párrafo anterior, en los mapas de la figura 5.6 se puede apreciar que el porcentaje de área deforestada disminuyó de 1993 a 2002, sin embargo el de recuperación se mantiene igual.

Contrario al efecto que tienen las variables explicativas en la deforestación y también como era de esperarse, todas éstas se relacionaron positivamente con la recuperación de la vegetación natural. En este modelo la magnitud de la asociación de la pendiente, la altitud y la distancia a caminos con la reforestación, es marcadamente más grande que con la deforestación. De hecho, como lo indica la razón de momios ($\text{Exp}(\beta)$), el aumento de una unidad en la pendiente, la altitud y la distancia a caminos aumenta una vez la posibilidad de la reforestación (Tabla 5.7).

Tabla 5.7. Análisis de regresión logística para la recuperación

Variable Explicativa	Beta	Exp(b)	c²	Sig
Constante	-2.0657	0.1267	11.47	0.001
Distancia a asentamientos humanos	0.6713	1.9568		
Distancia a caminos	0.05924	1.0610		
Distancia a ríos	0.32391	1.3825		
Altitud	0.7212	2.0569		
Pendiente	0.7124	2.0389		

Igual que con el modelo de deforestación, los mapas de la figura 5.6 también son congruentes con el modelo de recuperación, ya que la mayoría de las manchas de recuperación se observan en los lugares donde la

pendiente empieza a ser pronunciada y las distancias a caminos y asentamientos humanos es más grande.

6 DISCUSIÓN

6.1 Cambio de la cobertura del suelo

Es muy importante notar que la tasa de cambio global bajo a la mitad en el segundo periodo de estudio (figura 5.1), ya que esta disminución fue acompañada por una caída, también muy significativa de la tasa anual de deforestación, 0.87% en el primer periodo de tiempo a 0.27% en el segundo (Tabla 5.2); mucho más baja de lo que reporta la FAO (2005) para México de 1990 a 2000 (0.5%) y de 0.4% de 2000 a 2005. Esto es importante porque quiere decir que el mayor intercambio de superficie en el área de estudio se dio entre las coberturas antrópicas, dinamismo que se hace evidente en las figura 5.5, en la que se observa que la agricultura, el pastizal y los asentamientos humanos son las coberturas con las mayores tasas de ganancia y pérdida en los dos intervalos de tiempo. Posible explicaciones de la caída en las tasas de deforestación en la zona de estudio son: que la mayor parte de la superficie de las coberturas naturales está en lugares poco aptos para la agricultura, con pendientes pronunciadas, lejos de caminos y cuerpos de agua (Tabla 5.6) además de suelos pobres y exceso de lluvias; la migración tanto nacional como internacional ha resultado en que menos jóvenes permanecen en las comunidades rurales y por lo tanto hay menos individuos interesados en deforestar; los gobiernos han aumentado sus esfuerzos por apoyar la reforestación, la conservación y el manejo forestal (Kaimowitz 2008) y las políticas de conservación y manejo sustentable impulsadas por las comunidades indígenas de Oaxaca (Martin et al. 2011).

Un análisis por categoría reveló que las coberturas con mayor tasa de cambio anual (más dinámicas) en el primer periodo de estudio fueron: la agricultura de riego, la agricultura de temporal, los asentamientos humanos, el bosque de encino, el bosque de pino, el pastizal inducido y la sel-

va baja espinosa, mientras que en el segundo periodo fueron cuatro: los asentamientos humanos, el bosque de encino, el bosque de pino y el pastizal inducido (figura 5.4). Resultados que concuerdan con los mostrados a nivel internacional en Lambin (2001 y 2003) y la FAO (2001 y 2010), a nivel nacional por Palacio Prieto et al. (2000), Velázquez et al. (2002) y Sánchez Colón et al. (2008) y a nivel estatal en Velázquez et al (2003) y García Romero (2005), quienes muestran que las coberturas del suelo más dinámicas y con mayor interacción con la vegetación natural son la agricultura, la ganadería y los asentamientos humanos.

Como se mencionó en la introducción, un aporte importante de esta tesis fue evaluar la dinámica del cambio por categoría para cada intervalo de tiempo en función de la ganancia y la pérdida de superficie comparada con la tasa de cambio anual promedio para conocer las categorías dinámicamente significativas. En este sentido podemos observar que la dinámica de cambio en el primer intervalo de tiempo se debe a la pérdida de superficie de la agricultura de temporal, bosque de encino, bosque de pino, selva baja espinosa y principalmente del pastizal inducido. Así como de la ganancia en superficie de la agricultura de riego, pastizal cultivado, pastizal inducido y principalmente de la agricultura de temporal y los asentamientos humanos. Con respecto al segundo periodo, los resultados muestran que la dinámica del cambio de cobertura del suelo está determinada por la pérdida de superficie de la agricultura de temporal, pastizal cultivado, selva baja espinosa, selva baja caducifolia y subcaducifolia y de la sabana. Y por la ganancia de superficie del pastizal inducido y los asentamientos humanos principalmente, así como de los bosques de encino y de pino (Figura 5.5).

Otros estudios que apoyan estos resultados son Lambin et al. (2001 y 2003) y FAO (2001 y 2010) nivel mundial y en América Latina; Palacio prieto et al. (2000), Sánchez Colón et al. (2008) y Velázquez et al. (2002) a nivel nacional y García Romero (2005) y Velázquez et al. (2003) en Oa-

xaca, ya que coinciden en que las coberturas más dinámicas e interactivas son la agricultura, la pecuaria y los asentamientos humanos que reciben y seden superficie de las selvas y bosques de las zonas tropicales y templadas a más velocidad que cualquier otra cobertura.

Cabe mencionar que los únicos cambios significativamente persistentes en la zona de estudio fueron la ganancia de superficie por parte de la agricultura de temporal, el pastizal cultivado, los asentamientos humanos y el pastizal inducido y la pérdida de superficie por parte de la agricultura de temporal y la selva baja espinosa.

A este nivel, este estudio deja ver que el intercambio en la cobertura del suelo en esta región no es un proceso lineal y consistente, sino que presenta cierto grado de complejidad, que es evidente cuando se observa la dinámica de la pérdida y ganancia de la superficie de los diferentes tipos de cobertura a través del tiempo. Un ejemplo de esto es como la selva cambia a agricultura y pastizal y posteriormente vuelve a convertirse en selva pero a una tasa de cambio mucho menor. La complejidad de estos cambios hace difícil y laborioso monitorear la tendencia del cambio en la cobertura del suelo.

Otro aporte de esta tesis y el más importante, ya que no se menciona ni se realiza en los estudios dedicados a este tema (Palacio prieto et al. 2000, Lambin et al. 2001 y 2003, FAO 2001 y 2010, Velázquez et al. 2002 y 2003, García Romero 2005, entre otros) y que hace evidente el análisis de las tablas de contingencia a través de la Tabla 5.3 y la gráfica 5.5, es evaluar la dirección de la pérdida o ganancia de la superficie entre las coberturas en función de la comparación de la tasa de cambio anual promedio con la tasa de ganancia o pérdida anual por cobertura en cada periodo de tiempo (Pontius 2004).

De este modo se pudo saber el origen y destino de la superficie que ganaron y perdieron las coberturas más dinámicas en ambos periodos de estudio (Tablas 5.4 y 5.5). De acuerdo con los resultados que muestran

Velázquez et al. (2002 y 2003) y Sánchez Colón et al. (2008) una gran cantidad de superficie se intercambió entre la agricultura y la ganadería en los dos periodos de tiempo. Las coberturas naturales que más cedieron superficie a las coberturas antrópicas fueron las categorías de la selva y los asentamientos humanos le han ganado superficie a la agricultura y a la selva baja. Las coberturas naturales ganan superficie cinco veces más lento de lo que la pierden. Las únicas coberturas naturales con tasas de ganancia de superficie significativas fueron la selva baja espinosa en el primer periodo, que la recibió de la agricultura de temporal y del pastizal inducido principalmente y los bosques de encino en el segundo periodo, que la adquirió de los asentamientos humanos y de la selva alta y mediana perennifolia.

En general, la selva baja espinosa y el bosque de encino son las coberturas que más ceden superficie anualmente a las coberturas antrópicas, mientras que las coberturas que más contribuyen al proceso de recuperación son la agricultura de temporal y el pastizal. Resultado congruente con mucha de la literatura que estudia este tema (Palacio Prieto 2000, Velázquez et al. 2002 y 2003, Gómez Mendoza et al. 2006 y Sánchez Colón et al. (2008).

Es claro que en la parte del Istmo de Tehuantepec que abarca la zona de estudio, a pesar de que ha disminuido el ritmo de la deforestación, existe una expansión de la agricultura, la ganadería y los asentamientos humanos en detrimento de la selva baja caducifolia y subcaducifolia, la selva baja espinosa, la sabana; y bosques de pino y de encino de la región (Tablas 5.4 y 5.5). Esto indica que los factores que favorecen la pérdida de la cobertura natural sobrepasan a los que favorecen su reforestación (López Feldman 2012), como la sobreexplotación de los recursos forestales (Lambin et al. 2003), las iniciativas de las políticas de repartición de tierras y leyes agrarias para convertir terrenos forestales en campos agrícolas, entre otras (Castillo et al. 2009). Esta es una tendencia que se

ha mantenido desde los años 40, debido al acelerado desarrollo industrial que ha tenido la región desde entonces (Gómez 2005); y que conlleva la creación de infraestructura, crecimiento demográfico, desarrollo de la industria agropecuaria para satisfacer las necesidades de la población (Lambin et al. 2003).

El problema es serio, ya que como se mencionó anteriormente, las selvas perennifolias y subperennifolias son las comunidades más antiguas, complejas del planeta y ecológicamente muy estables; condiciones que las convierten en el hábitat de mayor biodiversidad y endemismos de México (Rzedowski 1978, Miranda 1958, Meave 1990). Mientras que la Selva baja caducifolia y subcaducifolia y la selva espinosa son las comunidades vegetales más representativas de las regiones tropicales y alberga la tercera parte de la flora de Oaxaca (Meave et al. 2012) y un gran número de especies animales endémicas (Ceballos et al. 2010). Además, las selvas y los bosques de la región ofrecen servicios ecosistémicos muy importantes para sus habitantes como alimentos, fuentes de energía, materiales de construcción, medicinas, especies ornamentales, entre otros; y la conservación de la biodiversidad, captura de carbono y la regulación del ciclo hidrológico y el clima (Balvanera 2010, 2012) para el mundo.

Por otro lado, los servicios culturales que prestan estos ecosistemas, también son muy importante y relevantes, ya que contribuyen al desarrollo de las comunidades indígenas que los habitan, debido a que la biodiversidad está estrechamente relacionada con la diversidad cultural. Autores como Toledo (2001) y Maffi (2005) han documentado la relación entre diversidad biológica y diversidad lingüística. Cuando se comparan los usos y formas de manejo de la flora en diferentes culturas y contextos, se hace evidente un patrón global del conocimiento humano (Moerman et al 1999).

Actualmente ya se sienten las consecuencias por la deforestación del planeta, si no se pone especial atención en la conservación de sus bos-

ques y selvas las consecuencias pueden ser devastadoras para la humanidad.

6.2 Modelo explicativo del cambio de la cobertura del suelo

Con respecto a la regresión logística, aunque el modelo mostró que la correlación entre los factores biofísicos y antrópicos con la deforestación y recuperación fue débil, la dirección de la asociación es congruente con lo que se esperaba.

La relación negativa entre la deforestación y las variables explicativas indica que las áreas bajas y planas cercanas a los ríos, caminos y asentamientos humanos, tienen más probabilidades de ser deforestadas, lo cual concuerda con las características de la zona en la que existe todo un sistema hidrológico que irriga toda la planicie costera y un sistema de caminos de terracería que conecta con las poblaciones de la zona.

Con respecto a la recuperación, parece lógico que al crecer la distancia a caminos, asentamientos humanos y ríos y aumentar la altura y la pendiente se favorezca la reforestación. Esto sugiere que la deforestación es causada por actividades agropecuarias locales alrededor de asentamientos localizados en las zonas bajas y planas, de más fácil acceso y bien irrigadas (Piña Muñoz et al. 2003, Bray 2010, Mertens 2000 y Serneels 2001).

6.3 Evaluación del modelo

Actualmente se necesita una comprensión más completa de la dinámica del cambio de uso de suelo y la vegetación para caracterizar apropiadamente sus patrones y establecer correctamente sus causas.

Dos técnicas con los que se analiza la dinámica del cambio de cobertura son: la regresión lineal simple y las cadenas de Markov, quizás debido a

la popularidad de estas técnicas en la enseñanza universitaria. Sin embargo, este método a diferencia de los regresivos o los estocásticos aumenta la comprensión del cambio debido a que se hace un análisis a diferentes niveles de detalle entre varios periodos de tiempo.

Un aporte importante de este método es que toma en cuenta el tamaño de las categorías, debido a la naturaleza de las matrices de cambio, y no sólo al tamaño del cambio como se hace cuando se evalúa por medio de la regresión lineal y las cadenas de Markov (Aldwaik 2012).

El procedimiento para contabilizar y evaluar el cambio es lógico y anidado, características de las que adolece la regresión lineal simple como se ha aplicado en estudios de cambio de cobertura (Palacio Prieto 2000, Velázquez et al. 2002 y 2003, Lambin et al. 2003, Mas et al. 2004). Cuando se utiliza la regresión lineal simple se cometen varios errores: no se conoce la distribución de los datos, ni la forma de la línea de tendencia de la tasa de cambio, tampoco se sabe en qué sector de la línea se encuentran los datos que se utilizaron para estimar el modelo y no se toma en cuenta el carácter anidado de los datos. Por el contrario, el análisis con tablas de contingencia se basa en el sentido común, los datos no se tienen que ajustar a ninguna distribución ni tendencia (Pontius et al. 2004, Aldwaik 2012).

Por otra parte las matrices de transición markovianas responden a la pregunta: ¿Qué categorías reemplazan a la categoría i , cuando ésta pierde superficie en el tiempo t ? y se mide en términos de la proporción del tamaño de la pérdida de la categoría i en el tiempo inicial (Munsi et al. 2010). Al método markoviano le hace falta información para hacer el análisis relativo a la tasa de pérdida y ganancia entre categorías y a la tasa de cambio global por periodo para conocer que pérdidas y ganancias son significativas (Aldwaik 2012).

Apoyados los resultados obtenidos de las tablas de contingencia con la regresión logística, para encontrar las variables relacionadas con el cam-

bio de la cobertura, hacen de este modelo de análisis un buen método para evaluar el cambio la cobertura del suelo.

7 CONCLUSIONES

Como se mostró en este trabajo, para entender el proceso del cambio de la cobertura del suelo es necesario analizar este fenómeno de forma anidada, partiendo de lo general a lo particular, situación que se puede abordar gracias a que las matrices de cambio que resultan del cruce de los mapas en diferentes tiempos se pueden trabajar como una tabla de contingencia (Pontius et al. 2004). Además se deben evaluar todos los tiempos del estudio al mismo tiempo. Es decir, los resultados deben compararse entre intervalos de tiempo.

Así, la primera conclusión a la que se llegó es que la dinámica temporal del cambio en la cobertura del suelo en la porción oaxaqueña del Istmo de Tehuantepec es un proceso que ocurre a una tasa de cambio variable. En la segunda etapa, el análisis apuntó hacia las coberturas, el componente espacial del proceso de cambio de la cobertura del suelo y lo que se evalúa en esta etapa del modelo es que tan intenso es el intercambio de la superficie por las diferentes coberturas, por lo tanto, también se tiene un entendimiento de que cobertura es más dinámica o activa. La conclusión a la que se llegó es que la dinámica del proceso de cambio de la cobertura del suelo en la porción oaxaqueña del Istmo de Tehuantepec no es consistente ni estable espaciotemporalmente.

La tercera etapa nos muestra que coberturas son las que más interactúan entre sí quitándose y cediéndose superficie significativamente. En el contexto de la deforestación podemos concluir que en la porción oaxaqueña del Istmo de Tehuantepec la pérdida de la cobertura vegetal se debe a los asentamientos humanos, la agricultura y al pastizal inducido y afecta principalmente a la selva baja caducifolia, a la selva baja espinosa y a la sabana. Mientras que, en el contexto de la recuperación, sólo la

selva baja espinosa mostró signos de recuperación significativos en el segundo periodo de estudio.

El método seguido en este estudio permitió identificar los principales cambios en la cobertura del suelo en la zona de estudio y entender cómo se relacionan con los factores biofísicos y con los antrópicos. Así, los asentamientos humanos, los cuerpos de agua, la accesibilidad y la poca pendiente del terreno son factores que propician la deforestación de la vegetación natural en el Istmo de Tehuantepec.

Los resultados del análisis, la bondad de ajuste de los modelos logísticos de la deforestación y la recuperación, el acuerdo espacial entre las razones de momios estimadas y las características de la zona, indican un buen desempeño de los modelos de deforestación y reforestación en la zona de estudio. Por lo tanto, la evaluación cuantitativa y la localización espacial de las áreas vulnerables al cambio que arroja el método utilizado en este estudio con base en las tablas de contingencia, puede ser una contribución muy útil para los esfuerzos de manejo y conservación en la zona.

... Una nueva luz brilló sobre los estudiosos de la naturaleza.

Xant

8 REFERENCIAS

- Aldwaik S., Pontius R. Jr., (2002), Intensity Analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category and transition, *Landscape and Urban Planning*, 106:103-114.
- Balvanera P., Maass M., (2010), Los servicios ecosistémicos que proveen las selvas secas. En: Ceballos G., Martínez L., García A., Espinoza E., Bezaury J., Dirzo R., (eds.). *Diversidad, Amenazas y Áreas Prioritarias para la Conservación de las Selvas Secas del Pacífico de México*, CONABIO y Fondo de Cultura Económica, México, pp: 251-269.
- Balvanera P., (2012), Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales, *Ecosistemas* 21:136-147
- Ball J.B. (2001). *Global Forest Resources: History and Dynamics*. En *The Forest Handbook*. Vol. 1. Ed. J. Evans. Oxford: Blackwell Sci. p: 3-22
- Bray D.B., (2010), Forest cover dynamics and forest transitions in Mexico and Central America, en Nagendra H., Southworth J., Eds, *Reforestation landscapes: linking patterns and process*, Dordrecht: Springer, Netherlands, p: 85-203.
- Bürgi M., Hersperger A.M., Scheeberger N. (2004), Driving forces of landscape change: Current and new directions. *Landscape Ecology*. 19: 857-868.
- Castillo A., Godínez C., Schroeder N., Galicia C., Pujadas-Botey A., Martínez L., (2009), Los bosques tropicales secos en riesgo: conflictos entre el desarrollo turístico, el uso agropecuario y la provisión de servicios ecosistémicos en la costa de Jalisco, México. *Interciencia* 34:844-850.

- Ceballos G., Martínez L., García A., Espinoza E., Bezaury-Creel J., Dirzo R., (2010), Diversidad, amenazas y áreas prioritarias para la conservación de las selvas secas del Pacífico de México. Fondo de Cultura Económica y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- Challenger A., (1998), Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México. Pasado, Presente y Futuro. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. pp 847.
- Chuvieco E., (2002), Teledetección Ambiental. La Observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel Ciencia. España. 528 pp.
- Cruz, G.A.G. (1999), Principales tipos de vegetación en el estado de Oaxaca. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo, México.
- De la Maza, R. y Ojeda A., (1989), Diagnóstico Biológico e Institucional del Estado de Oaxaca, México, Biocenosis, A.C., México.
- DeFries R., Bounoua L., (2004), Consequences of land use change for ecosystems services: A future unlike the past. *GeoJournal*. 61: 345-351.
- Eastman J.R., (2006), IDRISI Andes, Universidad de Clark, Worcester, MA.
- Evangelista Oliva V., López Blanco J., Caballero Nieto J., Martínez Alfaro M.A., (2009), Patrones espaciales de cambio de cobertura u uso del suelo en el área cafetalera de la sierra norte de Puebla, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 72 :23-38.
- FAO, (2001), Global Forest Resources Assessment 2000 (FRA 2000). Main report, FAO, Roma
- FAO, (2005), Global Forest Resources Assessment 2005. Progress Towards Sustainable Forest Management, FAO Forestry Paper 147. FAO, Roma.

- FAO, (2010), Global Forest Resources Assessment 2010 (FRA 2010). Main report, FAO, Roma
- Florent, D. (2002), Qualité de validation des modèles de régression logistique binaire.
<http://www.stat.ucl.ac.be/ISarchives/IScolloques/jsbl2002/Duyme.pdf>
- García Mendoza A.J., (2004), Integración del conocimiento florístico del estado. En Biodiversidad de Oaxaca, García-Mendoza A.J., Ordoñez M.J., Briones-Salas M. (eds), Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza y WWF, México, pp. 305-325.
- García Mendoza A.J., Meave J.A., (2011), Diversidad florística de Oaxaca: de musgos a angiospermas (colecciones y lista de especies). Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- García Romero A., Oropeza Orozco O., (2005), Land use System and Resilience of Tropical Rain Forests in the Tehuantepec Isthmus, Mexico, *Environmental Management*, 34:768-785.
- Gergel S.E. y Turner M.G. (2000), *Learning landscape ecology: A practical guide to concepts and techniques*. Springer. New York. 340 pp.
- Goldewijk K.K., Ramankutty N. (2003), Land cover change over the last three centuries due to human activities: Assessing the differences between two new global data sets. *GeoJournal*. 61: 335-344.
- Gómez Mertínez M., (2005), Diagnóstico Regional del Istmo de Tehuantepec, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, Unidad Istmo, Oaxaca, México.
- Gómez-Mendoza L., Vega-Peña E., Ramírez M. Isabel, Palacio-Prieto J.L., Galicia L. (2006), Projecting land-use change processes in the Sierra Norte of Oaxaca, México. *Applied Geography*. 26: 276-290.

- González-Medrano F., 1998, La Vegetación de México y su Historia, Ciencias. 52:58-65
- González-Pérez G., Briones-Salas M., Alfaro A.M., (2004), Integración del conocimiento faunístico del estado. En: García-Mendoza A.J., Ordóñez M.J., Briones-Salas M., (eds.). Biodiversidad de Oaxaca, Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza y WWF, México, p: 449-466.
- Hosmer, D.W., Lemeshow, S. (1989), Applied Logistic Regression: Wiley and Sons. Nueva York. 392 pp.
- Iachine, I. (2002), Multiple Linear Regression and Logistic Regression. http://www.biostat.sdu.dk/courses/e02/anvendtbiostat/day2/ab_logist_e02sm.pdf
- INEGI (1985a), Carta Geológica “Salina Cruz E1510”, Escala 1:250000, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI (1985b), Carta Edafológica “Salina Cruz E1510”, Escala 1:250000, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI (1985c), Carta climatológica “Salina Cruz E1510”, Escala 1:250000, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI (1985d), Carta topográfica “Salina Cruz E1510”, Escala 1:250000, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI (2003), Sistema de Información Geográfica (SIGE) para el estado de Oaxaca, INEGI, México.
- INEGI (2005a), Guía para la Interpretación de Cartografía Geológica. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México. 26 pp.
- INEGI (2005b), Guía para la Interpretación de Cartografía Edafológica. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México. 27 pp.

- INEGI (2005c), Guía para la Interpretación de Cartografía Climatológica. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México. 45 pp.
- INEGI (2005d), Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación escala 1:250,000 serie III. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México. 74 pp.
- INEGI (2005e), Guía para la Interpretación de Cartografía Topografía. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México. 21 pp.
- INEGI (2006), II Censo de Población y Vivienda 2005. Resultados definitivos. Tabulados básicos, INEGI, México.
- Irwin E.G., Geoghegan J. (2001), Theory, data, methods: Developing spatially explicit economic models of land use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 85: 7-23.
- Kaimowitz D., (2008), The prospects for Reduced Emissions from Deforestation and Degradation (REDD) in Mesoamerica, *International Forestry Review*, 10(3):485-495.
- Lambin E.F. (1994), Modeling Deforestation Processes. TREES SERIES B: Research report No. 1. Comunidad Europea. Luxemburgo.
- Lambin E.F., B.L. Turner, H.J. Geist, S.B. Agbola, A. Angelsen, J.W. Bruce, O.T. Coomes, R. Dirzo, G. Fischer, C. Folke, P.S. George, K. Homewood, J. Imbernon, R. Leemans, X. Li, E.F. Moran, M. Mortimore, P.S. Ramakrishnan, J.F. Richards, H. Skanes, W. Steffen, G.D. Stone, U. Svedin, T.A. Veldkamp, C. Vogel y J. Xu (2001), The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*. 11: 261-269.
- Lambin E.F., Geist H.J., Lepers E. (2003), Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources*. 28: 205-241.

- Landa R., Meave J., Carabias J. (1997), Environmental deterioration in rural México: An examination of the concept. *Ecological Applications*. 7(1): 316-329.
- Leemans R., Serneels S. (2004), Understanding land use change to reconstruct, describe or predict changes in land cover. *GeoJournal*. 61: 305-307.
- López Feldman A. J., (2012), Deforestación en México: Un análisis preliminar, Centro de Investigaciones y Docencia Económicas A.C., México. pp 35.
- López Olmedo L.I., (2005), Diferenciación ecológica entre las sabanas y los pastizales artificiales en la región de Nizanda (Oaxaca), México, Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Lorence D.H., García-Méndez A., (1998), Oaxaca, Mexico. En *Floristic inventory of tropical countries*. Campbell B.G., Hammond H.D., New York Botanical Garden, New York, p: 253-269.
- Luna Vega I., Ocegueda Cruz S., Alcántara Ayala O., (1994), Florística y notas biogeográficas del bosque mesófilo de montaña del municipio de Tlanchinol, Hidalgo, México. *Anales del Instituto de Biología, Serie Botánica*, 65(1): 31-62.
- Lunetta R.S., Ederick J., Johnson D.M., Lyon J.G., McKerrow A. (2002). Impacts of vegetation dynamics on the identification of land-cover change in a biologically complex community in North Carolina, USA. *Remote Sensing of Environment*. 82(2-3): 258-270.
- Maass J., Balvanera P., Castillo, A., Daily G.C., Mooney H.A., Ehrlich P., Quesada M., Miranda A., Jaramillo V.J., García-Oliva F., Martínez-Yrizar A., Cotler H., López-Blanco J., Pérez-Jiménez A., Búrquez A., Tinoco C., Ceballos G., Barraza L., Ayala R., Sarukhán J., (2005), Ecosystem services of tropical dry forests: insights from

- long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico, *Ecology and Society* 10:17.
- Maffi L., (2005), Linguistic, Cultural and Biological Diversity, *Annu. Rev. Anthropol.* 34:599-617.
- Martin G.J., Camacho-Benavides C.I., del Campo C.A., Anta S., Chapela F., González M.A., (2011), Indigenous and community conserved areas in Oaxaca, Mexico, *Management of Environmental Quality: An International Journal* 22(2):250-266.
- Mas J.F., Velázquez A., Díaz-Gallegos J.R., Mayorga-Saucedo R., Alcántara C., Bocco G., Castro R., Fernández T., Pérez-Vega A. (2004). Assessing land use/cover change: A nation wide multirate spatial database for México. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 5: 249-261.
- Meave J.A., (1990), Estructura y Composición de la Selva alta perennifolia de los alrededores de Bonampak, Chiapas. Colección científica. Instituto Nacional de Antropología e Historia, México, pp:147.
- Meave J.A., Romero-Romero M.A., Salas-Morales S.H., Pérez-García E.A., Gallardo-Cruz J.A., (2012), Diversidad, amenazas y oportunidades para la conservación del bosque tropical caducifolio en el estado de Oaxaca, México, *Ecosistemas*, 21:85-100.
- Mertens B., Lambin E.F. (2000). Land cover change trajectories in Southern Cameroon. *Annals of the Association of American Geographers.* 90(3): 467-494.
- Miranda F., (1958), Estudios acerca de la vegetación en: los recursos naturales del sudeste y su aprovechamiento. Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables, México, Vol 2.
- Mittermeier R.A., Mittermeier C.G. (1992). La importancia de la diversidad biológica de México. En Sarukhan J., Dirzo. México ante los retos de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. p: 63-74

- Mittermeier R.A., Mittermeier C.G., Gil P.R., Pilgrim J., Fonseca G. (2003), *Wilderness: Earth's Last Wild Places*. Chicago. Univ. Chicago Press. Chicago, 576 pp.
- Moerman E.D., Pemberton R.W., Kiefer D., Berlin B., (1999), A comparative analysis of five medicinal floras. *Journal of Ethnobiology* 19:49-67.
- Moore D.S., McCabe G.P. (1998), *Introduction to the practise of ststistics*. W.H. Freeman and Company. New York.
- Munsi M., Malaviya S., Oinam G., Joshi P.K., (2010), A landscape approach for quantifying land-use and lan-cover change (1976-2006) in middle Himalaya, *Regional Environmental Change* 10:145-155.
- Narumalani S., Jensen J.R., Althausen J.D., Burkhalter S., Mackey H.E. (1997), Aquatic Macrophyte Modeling Using GIS and Logistic Multiple Regression. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 63: 4-49
- Ortiz Pérez M.A. y Figueroa Mah Eng M., (2003), Geología y morfoalineaamientos, en Sánchez Salazar M.T., Oropeza Orozco O. (Compiladores). *Atlas regional del Istmo de Tehuantepec*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México. [CD].
- Palacio-Prieto J.L., Bocco G., Velásquez A., Mas, J.F., Takaki F., Victoria A., Luna L., Gómez G., López J., Palma M., Trejo I., Peralta A., Prado J., Rodríguez A., Mayorga R., González F. (2000). La condición actual de los recursos forestales en México: Resultados del Inventario Forestal Nacional. *Investigaciones Geográficas*. UNAM. México. 43: 183-203.
- Petit C., Scudder T., Lambin E. F. (2001). Quantifying processes of land cover change by remote sensing: resettlement and rapid land cover

- changes in South Eastern Zambia. *International Journal of Remote Sensing*, 22(17): 3435–3456.
- Piña Muñoz C., Alarcón G. y Fernández J.C., (2003), Pixel patterns of deforestation in México 1993–2000, Serie: Artículos de trabajo, Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, México. pp: 35.
- Pontius R.G. Jr., Shusas E., McEachern M., (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 100: 251–268.
- Ramankutty, N., L. Graumlinch, F. Achard, D. Alves, A. Chhabra, R. S. DeFries, J. A. Foley, H. Geist, R. A. Houghton, K. Goldewijk, E. F. Lambin, A. Millington, K. Rasmussen, R. S. Reid and B. L. Turner (2006), “Global land–cover change: recent progress, remaining challenges”, en Lambin, E. F. y H. Geist (eds.), *Land–use and land–change. Local processes and global impacts*, Springer–Verlag, Berlin, pp. 9–40.
- Rzedowski J., (1978), *Vegetación de México*, Limusa, México, pp: 432.
- SAGARPA, (2001), *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos*, Edición 2000, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Talleres Gráficos del Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. México.
- Sánchez Colón, S., A. Flores Martínez, I. A. Cruz–Leyva y A. Velázquez. 2008. Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas. II Estudio de país. CONABIO, México.
- Serneels S. (2001), *Drivers and impacts of land use/land cover change in the Serengeti–Mara ecosystem: a spatial modelling approach based on remote sensing data*. Université Catholique de Louvain, Belgium, Louvain.

- Stadtmüller T., (1987), *Cloud Forests in the Humid Tropics: A Bibliographic Review*. United Nations University, Tokyo and CATIE, Turrialba, Costa Rica, pp: 85.
- Styles B.T., (1998), El género *Pinus*: su panorama en México. En: T.P. Ramamoorthy, Bye R., Lot A. y Fa J., (Eds.), *Diversidad biológica de México: orígenes y distribución*, Instituto de biología, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Toledo A., (1995), *Geopolítica y desarrollo en el Istmo de Tehuantepec*, Centro de Ecodesarrollo, México.
- Toledo V.M., (1994), La diversidad biológica de México, *Ciencia y Desarrollo* 81:17-29
- Toledo V.M., Alarcón-Chaires P., Moguel P., Olivo M., Cabrera A., Leyequien E., Rodríguez A., (2001), El Atlas Etnoecológico de México y Centroamérica: Fundamentos, Métodos y Resultados. *Rev. Etnoecológica*, 6:7-41.
- Torres Colín R., (2004), Tipos de vegetación, En *Biodiversidad de Oaxaca*, García-Mendoza A.J., Ordoñez M.J., Briones-Salas M. (eds), Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza y WWF México, pp. 105-117.
- Trejo I., (2004), Clima. En *Biodiversidad de Oaxaca*, García-Mendoza A.J., Ordoñez M.J., Briones-Salas M. (eds), Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza y WWF, México, pp. 67-85.
- Turner M.G. (1989), Landscape ecology: The effect of pattern of process. *Annual Review of Ecology and Systematics* 20: 171-197.
- VECH, (1987), *Tequio por los Chimalapas*, Vocalía Ejecutiva por los Chimalapas, Oaxaca, México.
- Velázquez A., Mas J.F., Díaz-Gallegos J.R., Mayorga-Saucedo R., Alcántara P.C., Castro R., Fernández T., Bocco G., Palacio J.L. (2002),

- Patrones y tasas de cambio del uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica INE*. 62: 21-37.
- Velázquez A., Durán E., Ramírez I., Mas J.F., Bocco G., Ramírez G., Palacio J.L. (2003) Land use-cover change processes in highly biodiverse areas: The case of Oaxaca, México. *Global Environmental Change*. 13: 175-184.
- Veldkamp A., Lambin E.F., (2001). Predicting Land-use change. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 85: 1-6.
- Winter M., (1990), *Lecturas históricas del estado de Oaxaca*, Vol 1, Instituto Nacional de Antropología e Historia, México