



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

# POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN  
ECOSISTEMAS

**Cambios en las coberturas y usos  
del suelo y sus implicaciones en la  
provisión de servicios hidrológicos  
en la cuenca del río Copalita,  
Oaxaca, México**

# T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS  
(BIOLOGÍA AMBIENTAL)**

P R E S E N T A

Luis Fernando Gopar Merino

DIRECTOR DE TESIS: Dr. José Alejandro Velázquez Montes

MÉXICO, D.F.

ENERO, 2008



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.

## Reconocimientos

Al CONACYT por la beca brindada durante los estudios de maestría, la cual fue registrada con el número 189406. A los proyectos “Ecoregionalización como base para la evaluación de la aptitud del territorio” (CONACYT-SEMARNAT. 2004-2005), “Diagnóstico ecogeográfico de regiones costeras del pacífico: con énfasis en el potencial de uso de los recursos forestales de las selvas bajas” (DGAPA-UNAM. 2004-2005), “Community forest enterprises and forest ecosystem conservation in Mexico: building human capacity by incorporating master’s students and expanding faculty ties in a large-scale research project” (United States Agency for International Development y Association Liaison Office for University Cooperation in Development. 2005-2006), “Uso de técnicas de análisis multicriterio para la priorización de subcuencas para la conservación, restauración y el aprovechamiento de los recursos naturales en la Cuenca del Lago de Cuitzeo” (MICHOACÁN-2005-C01-011) y “Estrategias complementarias para la conservación del capital natural: integración de la forestería comunitarias a los esquemas tradicionales de conservación” (DGAPA-UNAM. 2007), de los cuales se obtuvieron los apoyos necesarios para la realización del presente proyecto.

A los miembros del Comité Tutoral por su apoyo en mi formación académica:

Dr. José Alejandro Velázquez Montes

Dr. José Manuel Maass Moreno

Dra. Patricia Balvanera Levy

# Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México el permitirme culminar mis estudios de posgrado dentro del programa de Ciencias Biológicas. Asimismo, reconozco y les entrego mi más grande admiración a todas aquellas personas que por algún motivo están relacionados con esta gran institución, que diariamente se esfuerzan haciendo de ella la mejor universidad de América Latina.

Al Dr. Gerardo Bocco Verdinelli, director del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM, por permitirme el uso de las instalaciones para poder llevar acabo y tener a buen fin el presente trabajo.

Al Dr. Alejandro Velázquez Montes por la oportunidad, confianza y enseñanzas brindadas a lo largo de la maestría. Por todos aquellos eventos en los cuales me permitió colaborar y aprender, por sus muy buenos consejos, puntos de vista y dirección durante la elaboración de esta tesis, por los momentos de convivencia dentro y fuera del trabajo e incluso por aquellas llamadas de atención.

A los Doctores José Manuel Maass Moreno y Patricia Balvanera Levy, por haber aceptado formar parte de mi comité tutorial. Por sus acertados puntos de vista y opiniones que sirvieron para enriquecer el presente trabajo; sobre todo por su infinita disposición a que este esfuerzo fuera exitoso.

Al Dr. Jean Francois Mas Causse, a la Dra. María Isabel Ramírez Ramírez, al M. en C. José Reyes Díaz Gallegos, a la M. en G. Azucena Pérez Vega, a la M. en C. Alejandra Patricia Larrazábal De la Vía y al M. en C. José Antonio Navarrete Pacheco por el apoyo brindado en la enseñanza de la utilización, análisis e interpretación de los resultados obtenidos a través de los Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota. Particularmente a la M. en C. Larrazábal De la Vía y al M. en C. Navarrete Pacheco por su particular ayuda, por su gran paciencia, dedicación y ejemplo de trabajo.

Al Dr. Alejandro Velázquez Montes, la Dra. Elvira Durán Medina, al M. en C. Faustino López Barrera, a la M. en C. Alejandra Larrazábal De la Via y a la Biól. Consuelo Medina García por la revisión y discusión de varios puntos desarrollados en el presente estudio. Pero especialmente por su gran apoyo incondicional en los trabajos de campo y recolección de información, sin su ayuda y amplios conocimientos esta tesis nunca se hubiera logrado. A ustedes mi eterno respeto, admiración y cariño.

Al Dr. Manuel Eduardo Mendoza Cantú y al Dr. Ángel Guadalupe Priego Santander por su ayuda en la discusión y atinados comentarios durante la determinación y construcción de las zonas funcionales hídricas y de las áreas con aspectos de interés hidrológico dentro de la cuenca del río Copalita.

A los Doctores José Luis Palacio Prieto, Jorge Arturo Meave del Castillo, José Alejandro Velázquez Montes, Manuel Eduardo Mendoza Cantú y Patricia Balvanera Levy por revisar la presente tesis y aceptar formar parte del jurado para la presentación del examen de grado.

A mis amigos, Faustino López, Ale Larrazábal, Consuelito Medina, Ale Liz Díaz, Azucena Pérez, Aída Moysén, Carlos Troche, Dianita Medina, Moni Flores, Javier Torres, Juan Manuel Ruiz, Yuri Quiroz, José Díaz, Berenice Flores, Ernesto Alcántara, Gabriel Velasco, Janik Granados, Gaby Cuevas, Silvia Pérez, Rafa Mayorga, Pablo Piña, Rogelio Rosas, Ignacio González y por supuesto a ti mi Nadia Esther López Hernández, a todos ustedes muchas gracias por su gran apoyo, porras, ánimos, por tanta buena vibra, pero sobre todo por tenderme siempre su mano, por su gran amistad.

Y a mi familia en Morelia: Faustino López, Ale Larrazábal y Consuelito Medina. Es tanto el agradecimiento con ustedes que no tengo con que recompensárselos. Risas, alegrías, tristezas, llantos, desvelos, regaños, etc., pero

siempre estuvimos unidos, por todo esto y muchas cosas más, mi eterna amistad, cariño, admiración y respeto hacia ustedes.

## DEDICATORIA

*A mis padres*

*Maria Elena Merino Pérez y José Luis Gopar Álvarez†,  
Por sus grandes enseñanzas, por su infinita paciencia  
Por este gran regalo que me dieron de estudiar y prepararme,  
Pero sobre todo por su infinito amor, confianza y apoyo incondicional.  
A ustedes mi eterna gratitud, mil gracias, los amo!!!*

*A mis hermanos*

*Héctor Gopar Merino y Roberto Gopar Merino  
Por creer siempre en mi, por estar siempre ahí cuando  
necesitaba palabras de aliento y de confort.  
Por estar siempre al tanto de mi estado y preocupados por mi bienestar.  
Muchas gracias, la vida me dio unos  
Hermanos maravillosos!!!*

*A mi gran familia de Morelia*

*Ale, Faus, Chelito y Nadia  
Siempre estuvieron ahí cuando los necesitaba  
Me abrieron su corazón, me brindaron de su tiempo,  
Me abrieron las puertas de su hogar y  
Me acogieron como uno más de su familia.  
Los respeto y los admiro, cuenten siempre con este servidor.  
Nunca terminare de agradecerles tanto. Gracias!!!!*

# CONTENIDO

## RESUMEN

### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1. ANTECEDENTES A LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL

*1.1.1 El contexto del estudio*

*1.1.2. Síntesis de la política ambiental en México*

*1.1.3. Del estudio ambiental específico a lo holístico*

#### 1.2. MARCO TEÓRICO

*1.2.1. Importancia del Análisis de Cambio de Coberturas y Uso del Suelo (ACCUS)*

*1.2.2 Breve revisión de los servicios ambientales*

*1.2.3 Agua y su relación con los servicios ambientales*

#### 1.3. JUSTIFICACIÓN

#### 1.4. OBJETIVOS

*1.4.1. Objetivo general*

*1.4.2. Objetivos particulares*

### 2. MATERIAL Y MÉTODOS

#### 2.1. ÁREA DE ESTUDIO

#### 2.2 TRABAJO DE GABINETE

*2.2.1 Insumos cartográficos: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) Serie I e Inventario Forestal Nacional (IFN) 2000*

*2.2.2 Cartografía, imágenes de satélite y fotografías aéreas*

*2.2.3 Diseño de verificación*

#### 2.3 VERIFICACIÓN DE CAMPO

#### 2.4 ANÁLISIS DEL CAMBIO DE COBERTURAS Y USOS DEL SUELO (ACCUS)

*2.4.1 Confrontación de coberturas*

*2.4.2 Modelo de procesos de cambio*

#### 2.5. IMPLICACIÓN DEL MODELO DEL ACCUS EN LA OPERACIÓN FUNCIONAL DE LA CUENCA (ZONAS FUNCIONALES)

2.6 IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON ASPECTOS  
HIDROLÓGICOS

### **3. RESULTADOS**

3.1 COBERTURAS PRESENTES EN 1979 Y 2000

3.2 CAMBIOS DE COBERTURA Y USO DEL SUELO Y PROCESOS  
DE CAMBIO 1979-2000

3.3 IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON ASPECTOS  
HIDROLÓGICOS

3.4. ZONAS FUNCIONALES

*3.4.1 Zonas funcionales y coberturas presentes en la cuenca*

*3.4.2 Zonas funcionales y procesos de cambio*

*3.4.3 Zonas funcionales y zonas con aspectos hidrológicos*

### **4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

4.1 ANÁLISIS DE CAMBIOS DE COBERTURAS Y USOS DE SUELO

4.2. CAMBIOS DE COBERTURA Y USO DEL SUELO Y SERVICIOS  
AMBIENTALES ASOCIADOS CON ASPECTOS HIDROLÓGICOS

*4.2.1 Zona de Cabecera*

*4.2.2 Zona de captación - transporte*

*4.2.3 Zona de emisión*

*4.2.4 Cuenca completa*

4.3. INCENTIVOS Y PAGO DE SERVICIOS AMBIENTALES COMO  
FUENTE DE CONSERVACIÓN DEL CAPITAL NATURAL

### **5. LITERATURA CITADA**

#### **ANEXO 1**

## Resumen

El medio ambiente está integrado por factores bióticos y abióticos, los cuales se encuentran relacionados por procesos físico-químico-biológicos que operan como parte de una unidad espacio-temporal. El ser humano ha obtenido diversos beneficios de éste, logrando con ello su soporte y satisfacción de múltiples necesidades, los cuales ha caracterizado con el nombre de servicios ambientales. Sin embargo, el hombre en su fase industrializada o “moderna” ha ocasionado grandes transformaciones en la superficie terrestre, trayendo consigo consecuencias negativas al medio ambiente. El análisis de cambios de coberturas y usos del suelo (ACCUS) es una herramienta que tiene la capacidad de evaluar varios componentes del territorio y con ello tratar de valorar y entender la relación entre dichos componentes. Tomando en cuenta que el ambiente se encuentra en un espacio físico y se halla estrechamente ligado a componentes sociales, el ACCUS es trascendental para la comprensión “integral” de los eventos que ocurren en los diversos ambientes, incluidos los de corte social. Con la incorporación de herramientas como son los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la percepción remota, es posible presentar información de manera explícita en unidades naturales del terreno de atributos del medio físico (relieve, morfología, etc.), medio biótico (coberturas, vegetación, etc.) y el medio social (usos del suelo). Éstos tres medios (el físico, el biótico y el social), al analizarse de manera conjunta, hacen posible identificar zonas de interés de acuerdo con los objetivos que se persigan y, con ello, establecer lugares específicos con posibles acciones a seguir en un futuro inmediato.

La cuenca del río Copalita tiene gran interés en la región de la costa de Oaxaca, ya que además de contar con una gran diversidad biológica y cultural, proporciona gran cantidad de servicios ambientales, que entre otros se encuentra principalmente el de regulación hídrica. Dicha característica adquiere importancia particularmente en la parte baja de la cuenca, donde hay una elevada demanda del líquido debido a que se encuentran importantes complejos turísticos, como por

ejemplo las Bahías de Huatulco. En esta cuenca se realizó el diagnóstico y actualización de las coberturas y usos del suelo con base en el Inventario Nacional Forestal del año 2000 y verificaciones de campo. Una vez comprobadas y corregidas las coberturas y usos del suelo de la cuenca, la información fue vaciada en SIGs con el fin de obtener datos cartográficos y sus respectivas estadísticas. Dicha información fue confrontada con la obtenida por el INEGI en el año 1979, con lo que se observó el estado de conservación de la cuenca y los procesos de cambio que han ocurrido en el lapso de 21 años. Esto fue la base con la que se obtuvo una aproximación del estado de los aspectos hídricos que caracterizan la cuenca. Los criterios utilizados para ello fueron las permanencias de las coberturas primarias y los cambios positivos o negativos de una cobertura a otra en el lapso de dos décadas, esto de acuerdo con el beneficio o daño que aportaron a los servicios hidrológicos. Aunado a lo anterior, se identificaron zonas funcionales hídricas de cabecera, captación-transporte y emisión, que corresponden preponderantemente a la regulación, el tránsito y la emanación de agua producida en la cuenca.

Es así que el ACCUS es un importante referente ante la necesidad de obtener resultados de manera pronta, confiable, precisa y espacialmente definida para comprender los desencadenantes que conllevan a los procesos de cambios. Estos últimos, junto con las investigaciones previas tanto de corte social como ambiental, logran una aproximación más consensuada de las posibles consecuencias o beneficios que pueden llegar a ocurrir si estos continúan presentándose, entre las cuales se encuentran implicados los servicios ambientales.

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. Antecedentes a la problemática ambiental**

### ***1.1.1 El contexto del estudio***

La diversidad de la vida ha sido objeto de interés para el hombre desde que éste apareció en la Tierra. Desde sus inicios, las diferentes sociedades humanas han desarrollado sistemas para reconocer, explotar y manejar los recursos naturales a su alcance. Esto ha sido el predecesor de varios conocimientos, los cuales han traído consigo grandes avances económicos y culturales (1998). No obstante, es hasta que el ser humano opta por la industrialización de los recursos naturales que se empiezan a expresar consecuencias negativas en el ambiente, tanto a nivel global, regional y especialmente a nivel local (Brundtland, 1990).

Ante el deterioro ambiental se han puesto en práctica diversas formas de confrontar estas tendencias negativas, como el establecimiento de áreas naturales protegidas e incentivos por la permanencia de servicios ambientales. En las últimas décadas, las áreas naturales protegidas han intentado merma la degradación con resultados muy diferentes, tanto con experiencias de éxito (Bruner *et al.*, 2001) como de catástrofes (Cernea y Schmidt-Soltau, 2006). El pago por servicios ambientales busca, entre otras cosas, retribuir económicamente por los bienes y servicios derivados de la naturaleza hacia el hombre (Cordero, 2004).

Sin embargo, el medio ambiente no es estático y se encuentra en constante cambio. Las modificaciones ambientales pueden ocurrir de manera natural, como en un proceso de sucesión, variaciones climáticas, erupciones volcánicas, huracanes, etc., o pueden ser de tipo antropogénico, entre las que destacan factores demográficos, sociales, económicos y políticos, entre otros. Estos cambios modifican un lugar con diferente intensidad de acuerdo con el caso, pero la intervención humana es la que ha producido la mayor transformación sobre la superficie terrestre. Las consecuencias en general se ven reflejadas en cambios de coberturas y uso del suelo que traen consigo efectos que empobrecen el acervo biológico y cultural, por

ejemplo: la deforestación (Figura 1) (Briassoulis, 2000; Dale *et al.*, 2002; Lambin *et al.*, 2001; Rutledge y Lepczyk, 2002).

### CAUSAS NATURALES

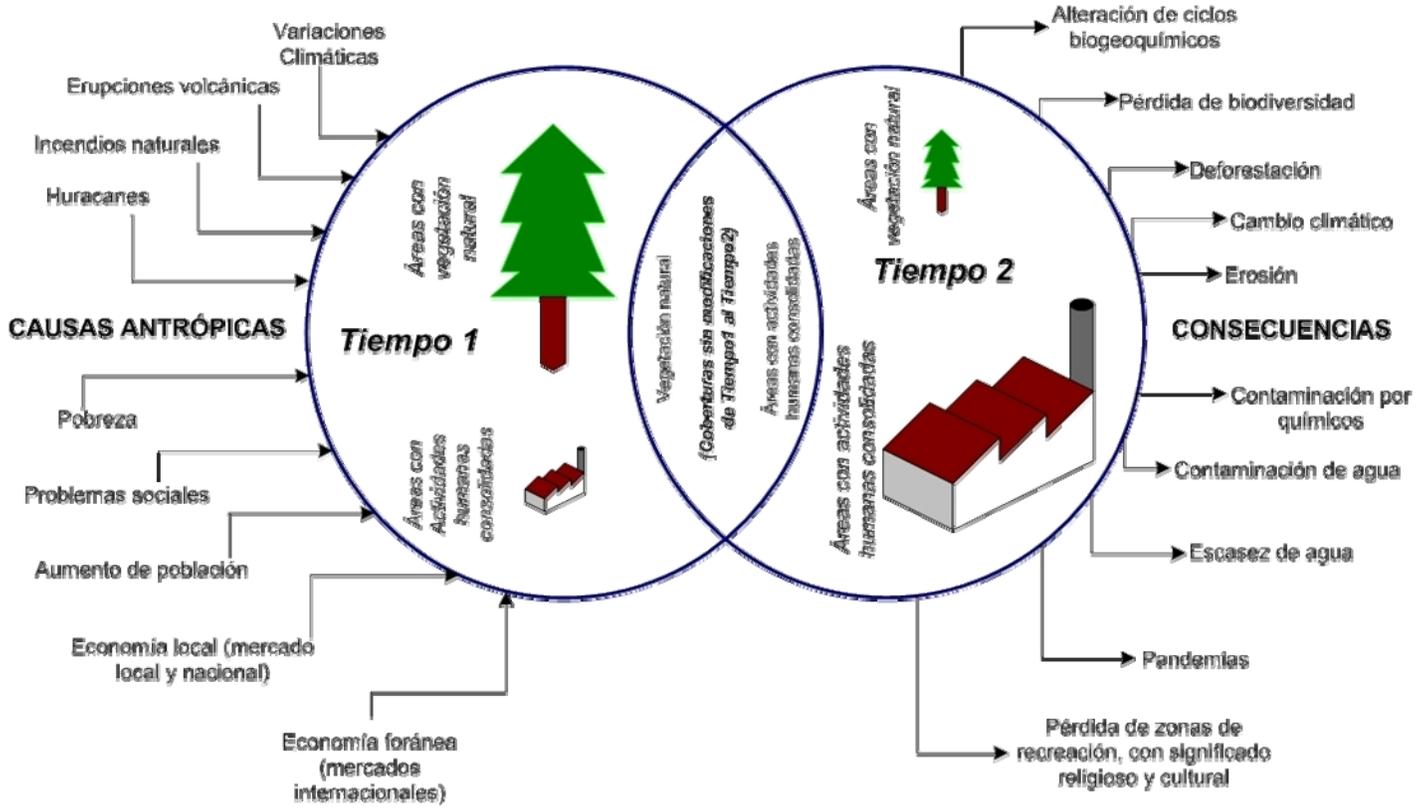


Figura 1. Causas de los cambios de coberturas y uso del suelo y sus consecuencias. Representación gráfica en la cual se muestra que el medio ambiente no es estático y se encuentra en constante cambio. Las transformaciones pueden tener un origen natural o antropogénico, sin embargo, desde la aparición del hombre, la superficie terrestre ha denotado grandes cambios en sus coberturas naturales, originando un deterioro importante en el medio ambiente.

Hasta antes de mediados del siglo pasado, el medio ambiente y las sociedades humanas eran vistos por la mayoría de las personas como dos entidades muy diferentes. El hombre no era considerado como parte de los procesos que ocurrían en el planeta y, por tanto, no era tomado en cuenta en diversos estudios, especialmente en los de corte ecológico (Arnold, 2000; Folke, 1998). Fue a partir del año 1970 que se empezó hacer evidente entre los diferentes sectores sociales el problema que se venía gestando por el deterioro ambiental y la relación que éste tenía con el desarrollo social y el crecimiento económico. Es así que en el año 1972 la Organización de las Naciones Unidas realizó la primera conferencia sobre el

Medio Humano con sede en Estocolmo, en la que se consiguió poner en discusión la temática ambiental como parte de la política de estado de diversas naciones. Como resultado de esta reunión se desprendió el “Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente”, en la que entre otros acuerdos, se estableció llevar a cabo dicha reunión cada diez años con el fin de discutir la problemática ambiental, implementar acciones que lleven al mejoramiento del medio ambiente y analizar los resultados obtenidos durante este lapso (Esnaola, 2006; O.M.C., 2004; Rueda, 2006)

En 1982 en Nairobi, Kenia, se celebró la segunda conferencia de la ONU sobre medio ambiente, la cual fracasó por los diversos conflictos internacionales que se presentaban en aquel momento. Para 1987 y a petición de la ONU, la Dra. Brundtland que encabezó una comisión, entregó a dicho organismo un informe socio-económico sobre un gran número de naciones relacionado con el estado que guardaba el ambiente en el planeta, al cual tituló como “Nuestro Futuro Común”. Este trabajo expresó por primera ocasión el término “Desarrollo Sostenible”, el cual fue definido como “el progreso que satisface las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad para que las futuras generaciones puedan satisfacer sus propias necesidades” (Esnaola, 2006; Rueda, 2006).

Con este último antecedente, durante la tercera conferencia sobre el medio ambiente llamada “Cumbre de la Tierra”, realizada en Río de Janeiro, Brasil, en 1992, se sintetizó la idea de la sustentabilidad y se delinearon alternativas para aplicar el desarrollo sustentable en las políticas a nivel mundial (Esnaola, 2006). Así, en 2002, se llevó a cabo la cuarta reunión realizada en Johannesburgo, Sudáfrica, con el título de “Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible”. En este encuentro los jefes de estado se comprometieron a desarrollar planes para lograr un desarrollo ambiental y social sostenibles, en la que los países estuvieran dispuestos a cambiar su patrón de crecimiento y hacer un uso adecuado de sus recursos naturales (Brundtland, 1990). Sin embargo, los problemas ambientales en el mundo han ido en aumento de manera importante. Lambin (2001), junto con varios especialistas de distintas partes del mundo, identificaron muchas de las causas que están llevando a esto, concluyendo que el estudio de los cambios de coberturas y usos del suelo son

una herramienta que proporciona datos rápidos, confiables y suministra evidencia clara para poder resolver este dilema en varias partes del planeta.

### ***1.1.2. Síntesis de la política ambiental en México***

En la búsqueda de un alto y rápido desarrollo económico y social, México ha visto alterado negativamente su medio ambiente. Diversas estimaciones indican que para el año de 1980, 50% de las áreas de selvas habían desaparecido y, con ellas, muy probablemente un gran número de especies (Maserá *et al.*, 1997). Ante esto, el país ha tratado de integrar políticas ambientales acordes con los acuerdos internacionales que ayuden a detener el gran impacto que se está llevando a cabo.

Durante la década de 1970 el tema ambiental no constituía en México un asunto de relevancia política. Sin embargo, influenciado por acciones realizadas por diversas naciones que empezaron a tomar en cuenta la conservación del ambiente como parte fundamental de su desarrollo, es que nuestra nación comienza a plantearse la necesidad de incluir el tema ambiental en sus proyectos de desarrollo económico (Guevara, 2005). Es así que se creó la Ley Federal para Prevenir la Contaminación Ambiental y la Subsecretaría del Medio Ambiente (SSMA) dependiente de la Secretaría de Salubridad. En ese periodo se aprobó una legislación para regular las prácticas forestales a gran escala, en la cual se les dio las facilidades a las comunidades rurales de explotar selvas y bosques considerados como tierras ociosas para que pudieran ser incorporadas a la economía nacional. Se impulsó el Plan Nacional Ganadero (PNG) consistente fundamentalmente en la introducción de ganado bovino a las mismas tierras “ociosas” y de difícil acceso. Se dio apoyo económico a las mismas áreas con el fin de proporcionar productos provenientes de la ganadería a las zonas urbanas a bajos precios, imitando modelos de alimentación similar al de países industrializados. Esto tuvo como resultado a que grandes extensiones de áreas favorables para otros tipos de cultivo se vieran transformadas en pastizales, ya que se obtenían más ganancias por el apoyo

económico del programa. Del mismo modo, las selvas bajas y medianas se desmontaron y se “hicieron” productivas.

En el sexenio de 1982-1988 desapareció la SSMA y se creó la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), se expidió la Ley Federal de Protección al Ambiente y, ante la creciente demanda de protección al ambiente, se crearon las reservas de la biosfera Mariposa Monarca, Sian Ka'an, Calakmul, Manantlán, El Cielo y El Vizcaíno, entre otras más, con fines de investigación, producción sustentable y conservación de la biodiversidad.

De 1988 a 1994 se revocaron los incentivos financieros a los ganaderos para la deforestación, se dió por terminada la reforma agraria, se otorgaron títulos de propiedad a ejidatarios, se expidió la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LEGEEPA), se creó la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) que es la sucesora de la SEDUE, se formó el Instituto Nacional de Ecología (INE) y se creó la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) (Simonian, 1999).

Para el sexenio de 1994 a 2000, la política ambiental alcanzó por fin una secretaría dentro del Gobierno Federal con la creación de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), la cual se encargó de la administración y aprovechamiento de los recursos naturales, suscrita dentro del discurso internacional del desarrollo sustentable.

De esta última etapa hasta nuestros días esta secretaría, ahora llamada SEMARNAT, se mantiene a pesar de haber sufrido ciertas modificaciones, como la desincorporación del ramo pesquero, las líneas centrales por la cual fue creada siguen en proceso, siendo las de ordenamiento ecológico, evaluación del impacto ambiental, fomento y normatividad, unidades de manejo para la conservación de la vida silvestre, áreas naturales protegidas, manejo integrado de cuencas e investigación ambiental (Challenger, 1998; Guevara, 2005).

Durante la última década se observa una profunda preocupación por traducir las políticas fuera del ámbito geopolítico y llevarlas a unidades territoriales naturales como las cuencas. Esto sin duda es un gran logro, pero aún dista de mucho de servir como base para la delimitación de políticas ambientales.

### ***1.1.3. Del estudio ambiental específico a lo holístico***

Durante muchos años, diversas investigaciones fueron realizadas de manera independiente, en las cuales solo se era tratado el tema en que era especialista el investigador y, solo en raras ocasiones, los proyectos fueron tratados de manera holística. La naturaleza entonces fue confinada para su estudio únicamente por naturalistas, los cuales en la mayoría de sus escritos prevalecía el conocimiento de ella como un ente separado del hombre. Sus resultados reflejaban un contexto en el que su objeto de estudio se encontraba prístino, sin ninguna modificación realizada directa o indirectamente por el ser humano (Myers y Reichert, 1997). A partir de la década de 1970 esta concepción se vio alterada al reconocer que el medio ambiente no estaba aislado y, que el hombre, estaba teniendo gran participación e intervención en los procesos biogeoquímicos naturales de la Tierra (Folke, 1998). Así se empezó a trabajar de una manera holística. Las diferentes disciplinas, tanto las sociales como las naturales, empezaron a unir esfuerzos y analizar en conjunto las implicaciones que traían consigo sus resultados. Esto propició un campo de acción más amplio para conocer la interacción entre los factores bióticos y abióticos sobre el ambiente y la forma en que se ve afectado o beneficiado el hombre ante estas interacciones (Myers y Reichert, 1997).

Es necesaria una revisión de las acciones que el ser humano ha tomado en su proceder para identificar las causas que están ocasionando la transformación de la superficie terrestre principalmente y, con ello, detener el deterioro, controlarlo y, en el mejor de los casos, revertirlo. Es así que el análisis de cambios de coberturas y usos de suelo (ACCUS) es su fase de expresión cartográfica de identificación de procesos de cambio, puede contribuir a identificar lugares y actores críticos en las áreas de

conservación y con ello sentar las bases para el pago de servicios ambientales. Es a partir de esto último que surge el presente trabajo.

## **1.2. Marco Teórico**

### ***1.2.1.Importancia del Análisis de Cambio de Coberturas y Uso del Suelo (ACCUS)***

El estudio y análisis de la dinámica del cambio de coberturas y uso del suelo (ACCUS) proporciona un buen fundamento para deducir cuál es la directriz de los diversos procesos que se presentan en determinado tiempo en la superficie terrestre. Éstos pueden ser tanto de tipo natural (como los provocados por huracanes o terremotos, por ejemplo), como los relacionados con la actividad humana, los cuales están estrechamente vinculados a decisiones de tipo político o de mercado. En ambos casos, tanto los de efecto natural como antrópico, traen consigo cambios en el medio ambiente como la deforestación, la degradación, la desertificación, entre otros (Velázquez *et al.*, 2002).

Diversos estudios muestran que el hombre ha sido el principal desencadenador de las transformaciones en los sistemas naturales (Parker *et al.*, 2001; Vitousek *et al.*, 1997). Se ha observado que grandes partes de la superficie terrestre son usadas para la agricultura, el manejo forestal, los asentamientos humanos y la infraestructura, lo que ha alterado el medio ambiente en términos de la biodiversidad del planeta, los ciclos biogeoquímicos, el ciclo hidrológico y el clima mundial.

El ACCUS adquiere gran importancia al mejorar nuestro entendimiento de cómo, por qué y en qué circunstancias se dan los patrones de uso del suelo, a través de modelos que analizan elementos que intervienen en dichos esquemas (Heistermann *et al.*, 2006; Parker *et al.*, 2001). Éste genera posibles escenarios de lo que puede ocurrir de seguirse dando las tendencias mostradas en el análisis, y por

otro lado favorece la aplicación de acciones de planeación, conservación e instrumentación en la toma de decisiones de un área determinada (Veldkamp y Lambin, 2001; Veldkamp y Verburg, 2004).

Los modelos usados en el ACCUS en los últimos años se han hecho espacialmente explícitos, integradores y multiescalares, y de acuerdo con Heistermann *et al.* (2006) existen tres tipos de modelos: ambiental, económico y el integrador.

Los modelos ambientales aplicados, tanto en disciplinas sociales como naturales, están enfocados a analizar las determinantes espaciales del cambio del uso del suelo, como es el caso de la intensificación de cultivos o la deforestación. Estos análisis se hacen mediante el estudio de variables ambientales examinadas a través de herramientas computacionales como los sistemas de información geográfica (SIG). Éstos ayudan a la integración de las distintas capas de información y a la ubicación física de los procesos que se están llevando a cabo.

En segundo lugar se encuentran los modelos de tipo económico, siendo éstos los primeros que se desarrollaron. Están enfocados principalmente hacia la producción agrícola, donde si bien la percepción económica del uso del suelo ha cambiado con los problemas ambientales que se presentan actualmente, siguen teniendo una tendencia hacia la mayor producción posible del uso del suelo. Éstos describen, a grandes rasgos, las preferencias de consumo y la viabilidad de cambiar de un producto a otro en el uso del suelo, con el fin de lograr un equilibrio en el mercado de artículos hacia el consumidor y con el mayor índice de ganancias. En resumen, los modelos económicos muestran las demandas de algún producto y le da valor mercantil a los mecanismos que hacen llegar a la adquisición de dicha utilidad; sin embargo, éstos no reflejan el impacto que puede llegar a tener y, generalmente, no representa espacialmente los cambios que ocurren en el uso del suelo. Los modelos geográficos, por llamarlos de algún modo, analizan variables ambientales, muestran una clara ubicación en el territorio de donde se están presentando los

cambios y la velocidad en que estos están ocurriendo, y sin embargo carecen de explicaciones de las conductas sociales que han propiciado dichas transformaciones.

El último modelo de ACCUS es el integrador, en el cual tanto el geográfico como el económico se fusionan y dan un sustento más preciso de las causas y consecuencias de los procesos de cambio que están ocurriendo. Este tipo de análisis llega a conclusiones más claras y da las bases para una mejor gestión de manejo y toma de decisiones. Es así que la integración de las bases de datos del ACCUS en los últimos años se ha hecho mediante la adquisición de diversos informes temáticos de manera digital y georeferenciada. Esta información es utilizada para constituir dentro de Sistemas de Información Geográfica (SIG) estadísticas de los diferentes cambios o procesos que estén ocurriendo en el área de estudio, la cual además, muestra la información espacialmente explícita (Chuvienco, 2002; Velázquez *et al.*, 2003).

Este tipo de estudios en la actualidad están tomando cada vez más relevancia por el grado de integración que puede llegar a tener. Éstos describen procesos de cambio de uso del suelo, los explican en cierto grado y predice cuál puede ser el futuro de estos cambios en caso de seguir el ritmo que llevan. Asimismo, calculan el impacto que estos cambios han dejado en el ambiente, ofrecen alternativas de uso del suelo u otros planes de manejo o conservación (Briassoulis, 2000; Velázquez *et al.*, 2002).

Cabe aclarar que durante el ACCUS se manejan de manera indistinta tres conceptos completamente diferentes. Uno se refiere a “vegetación”, la cual es la capa verde visible pero que en su definición (el agregado de especies en un lugar y tiempo específico) la hacen única para cada área o región del planeta y son producto de una historia evolutiva (Odum, 1971). Otro concepto es la “cobertura”, el cual se encuentra relacionado con la teledetección o percepción remota, términos que hacen referencia a la observación lejana de la superficie terrestre (Chuvienco, 2002), y que en general no está definida por especies sino por fenómenos de corte fenológico-estructurales de la vegetación, mismos que cambian de lugar a lugar y de tiempo en

tiempo con base en la sensibilidad del sensor. El tercer concepto se refiere al “uso del suelo”, que en breve se refiere a la manera de cómo el hombre se apropia de los recursos a través de diversas prácticas, como las agrícolas, las forestales y las urbanas, entre otras. El ACCUS siempre hace referencia a las coberturas, sin desconocer la relación de ésta con la vegetación y los usos (Jansen y DiGregorio, 2002).

### **1.2.2 Breve revisión de los servicios ambientales**

El hombre, como un componente más de la biósfera, depende para su supervivencia en gran medida de la interacción de los componentes bióticos y abióticos (Folke, 1998; Watson y Zakri 2003). En el transcurso de los últimos años, el gran impacto que el hombre ha tenido sobre el planeta ha llevado a las diferentes naciones a tomar conciencia del grado de perturbación que estamos ocasionando y, con ello, a reflexionar de la gran variedad de beneficios que se obtienen del medio ambiente. En consecuencia, se empezaron a tomar acciones para evitar que los problemas ambientales sigan en aumento y con ello asegurar una mejor calidad de vida hacia nosotros y los demás organismos que habitamos la Tierra (Daily, 1997). Los servicios ambientales son todos aquellos procesos y condiciones mediante los cuales los componentes bióticos y físicos sostienen y satisfacen el bienestar humano. Los servicios ambientales incluyen el mantenimiento de la biodiversidad y la producción de alimentos, materiales para construcción, combustibles, materias primas para la industria farmacéutica, productos industriales, entre muchos más, además de ofrecer en numerosas ocasiones, una intangible belleza escénica, beneficios culturales y espirituales (Daily, 1997; Watson y Zakri 2003).

El término utilizado en un principio para los servicios ambientales fue el propuesto por Costanza *et al.* (1997) de “bienes y servicios ambientales”. No obstante, este concepto, de acuerdo con Watson y Zakri (2003) y a GRAIN (2005) trae consigo por lo menos tres tipos de problemas que dificultan su entendimiento:

1. Los términos “bienes” y “servicios” son utilizados para designar aquellos beneficios tangibles e intangibles, respectivamente, que el hombre obtiene del ambiente. Al ser empleados de esta manera en ocasiones es difícil distinguir entre uno y otro, complicando su diferenciación precisa.
2. Estos términos son comunes en la práctica de la economía, los cuales son percibidos de manera separada, es decir, cada uno independiente y, por tanto, sin ninguna relación aparente.
3. Cuando se utilizan “bienes” y “servicios” por separado, es común que se olviden aquellos beneficios intangibles, como son los culturales o de belleza escénica

Los servicios ambientales son generados por un complejo de ciclos y flujos naturales, los cuales son muy antiguos, productos de millones de años de evolución, que probablemente han trabajado de manera similar hasta nuestros días (Costanza *et al.*, 1997; Watson y Zakri 2003).

De acuerdo con el Millennium Ecosystem Assessment (Watson y Zakri 2003) los servicios ambientales han sido clasificados en cuatro categorías conforme con líneas funcionales.

*Servicios de Provisión:* Son todos aquellos productos que se obtienen del ambiente de manera directa, los cuales incluyen, entre otros: fibras y alimentos, combustibles, recursos genéticos, recursos ornamentales, compuestos activos para medicamentos, agua potable, etc.

*Servicios de regulación:* Son los beneficios que se obtienen de la regulación de los procesos del medio ambiente. Estos pueden ser, entre otros: calidad de aire o agua, regulación del clima, regulación del agua, control de la erosión, purificación del agua y reutilización de detritus, regulación de enfermedades humanas, control biológico, polinización, protección contra tormentas, etc.

*Servicios culturales:* Son los beneficios no materiales que la gente obtiene del medio a través del enriquecimiento espiritual, el desarrollo cognoscitivo, la reflexión, la recreación y de experiencias estéticas. Éstos difieren entre individuos y comunidades, ya que puede haber patrones institucionales, sociales, económicos o políticos. Algunos de los servicios son: diversidad cultural, valores espiritual y religioso, sistemas de conocimiento tradicional, valores de educación, inspiración, valores estéticos, relaciones sociales, identificación con su medio, valor de herencia cultural, recreación y ecoturismo, etc.

*Servicios de soporte:* Estos son los necesarios y más importantes para la producción de todos los otros servicios. Difieren de los servicios de provisión, regulación y culturales en que su impacto puede traer consecuencias directas en corto tiempo o indirectas a largo plazo para el bienestar humano. Algunos de estos servicios son el control de la erosión, que puede ser catalogado como de soporte o regulación, dependiendo del tiempo, escala e impacto que tenga sobre la gente. Del mismo modo, los humanos no usan directamente la formación de suelo, sin embargo, los cambios en estos procesos pueden afectar en la provisión de servicios de producción de alimentos.

Por último, cabe mencionar que cuando los servicios ambientales son evaluados, debe tomarse en cuenta la escala espacial y temporal a la que estos servicios operan, ya que de ello dependerá a qué profundidad deberá ser su estudio y el impacto que tiene sobre el bienestar humano.

### ***1.2.3 Agua y su relación con los servicios ambientales***

El agua es uno de los compuestos químicos fundamentales para la vida sobre la Tierra y del cual el hombre, como parte de los organismos que lo habitan, depende totalmente para su supervivencia. De tal manera, la disponibilidad del líquido al ser

humano representa, además de su supervivencia, su bienestar social y económico. Los beneficios que el medio ambiente brinda a través del agua a la sociedad humana son catalogados como servicios ambientales. Éstos son aquellos que resultan del ciclo hidrológico, los cuales tienen la función o el papel de que algunos usos de la tierra y prácticas de conservación de suelos y aguas desempeñan en mantener la cantidad y la calidad de agua dentro de los parámetros requeridos por los usuarios de un sitio particular (Cordero, 2004; Pérez. *et al.*, 2006).

El uso del recurso hídrico no ha sido acorde con la sustentabilidad de los ecosistemas naturales. Esto ha afectado directamente a la calidad, la cantidad y la temporalidad que el agua pueda tener (GWP, 2003; Isch, 2004; Pérez *et al.*, 2006). El cambio de coberturas y usos del suelo modifican la distribución de energía y altera el flujo de materia en el ambiente, tanto temporal como espacialmente. Estos flujos incluyen, entre otros, la radiación solar, la temperatura, la precipitación, la evapotranspiración, la superficie de escorrentía, la disponibilidad de nutrientes, etc. Todos estos factores son importantes por su participación en el proceso de la regulación hídrica (GWP, 2003; He *et al.*, 2000; Pérez M. *et al.*, 2006).

La preocupación de cómo internalizar el capital natural que condiciona las actividades productivas y el bienestar de la sociedad es un tema central en la búsqueda de un desarrollo sustentable, y el tema del agua no escapa de esta línea. En México, al igual que en varios organismos internacionales como el Banco Mundial, se ha propuesto la creación de programas de pago por servicios ambientales como un medio que, en teoría, favorecerá a la gestión eficiente de los recursos naturales (GWP, 2003; Isch, 2004; Pérez. *et al.*, 2006).

Para llegar a la valorización y colocación de precio del agua se requiere una interacción cercana de flujo de información entre gobiernos locales, la industria, los residentes, las comunidades y los ejidos, en su caso. El pago por servicios hidrológicos generalmente va encaminado a la generación de instrumentos de mercado para compensar a los propietarios de tierras aguas arriba de una cuenca. Esto último tiene el propósito de conservar o transformar un uso específico del suelo

a otro más adecuado para el sitio que regula la disponibilidad, la cantidad y la calidad del agua. Generalmente el pago procede de los usuarios de tierra abajo de las cuencas, que son los principales beneficiarios de lo que sucede en las parte altas (Cordero, 2004; FAO, 2003a).

Con el uso de tecnologías como los SIGs, con los cuales se puede analizar el cambio de las coberturas y usos del suelo, junto con las diversas fuentes de información (sociales, económicas y biofísicas), se pueden tomar las mejores decisiones en el manejo y la planeación de las diversas políticas económicas, sociales o ambientales en cuanto al manejo de los recursos naturales. Éstos influirán en la distribución de los flujos de energía y materiales de acuerdo con los cambios que se presenten en el espacio y en el tiempo, pudiendo ser monitoreados y simular modelos predictivos de acuerdo a los elementos encontrados (He *et al.*, 2000).

### **1.3. Justificación**

Es indiscutible el papel transformador del hombre sobre la naturaleza (Foley *et al.*, 2005; Vitousek *et al.*, 1997). Ante tal situación es imperante atender de manera simultanea tres aspectos relevantes para asegurar la integridad funcional del medio ambiente y sus posibilidades de manejo sustentable (Chuvienco, 2002; Velázquez y Romero, 1999):

1.- Desarrollar estudios que permitan obtener datos de manera pronta y confiable para evaluar el grado de perturbación a partir de bases multitemporales, multiespaciales y multidisciplinarias y, con ello, detectar el grado de conservación, perturbación o cambio de las distintas áreas.

2.- Reorientar las investigaciones a entidades naturales como las cuencas con el objeto de manejar flujos que rebasan los límites geopolíticos.

3.- Generar información crucial con una expresión cartográfica que permita apoyar el proceso de toma de decisiones a través de la identificación de los diversos actores sociales involucrados.

Los anteriores puntos son imprescindibles para la cuenca del río Copalita en Oaxaca, dada la fuerte tendencia a la degradación producida por la exacerbada demanda del sector turístico, la decadencia de los mercados de cultivos tradicionales y la desintegración social producto de las tasas de migración. El análisis de cambios de coberturas y usos de suelo y sus implicaciones en el capital hidrológico son tareas prioritarias para ayudar a conciliar bienestar social de las comunidades oriundas y desarrollo económico a través del turismo.

## **1.4. Objetivos**

### ***1.4.1. Objetivo general***

- Identificar las implicaciones que tiene el cambio de coberturas y usos del suelo sobre los aspectos hidrológicos de la cuenca del río Copalita, Oaxaca, México.

### ***1.4.2. Objetivos particulares***

- Analizar el cambio de coberturas y uso del suelo entre los años 1979 ( $t_1$ ) y 2000 ( $t_2$ ).
- Verificar y calibrar la información del cambio de coberturas de  $t_1$  y  $t_2$  a partir de información obtenida de campo.
- Generar un modelo de alteración espacialmente explícito que describa las dinámicas de cambio y permanencias entre 1979 y 2000.
- Explorar los posibles impactos de los cambios de coberturas y usos de suelo en la provisión de servicios ambientales de corte hidrológico, los cuales sustenten una aproximación para promover la permanencia de los servicios ambientales.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio

La Cuenca del río Copalita se ubica en el sur del estado de Oaxaca, en la Sierra Madre del Sur y la Costa de Oaxaca, entre 15° 51' 34" y 16° 13' 34" latitud Norte y 96° 37' 54" a 96° 38' 14" de longitud Oeste, abarcando una superficie aproximada de 3,008 km<sup>2</sup> (Figura 2). Esta cuenca se encuentra compuesta por cuatro subcuencas pequeñas, además de la del río Copalita propiamente dicho. Se consideró como una sola área de estudio por la estrecha relación que guarda la zona en cuanto a los servicios ambientales que ella ofrece, en particular a los relacionados con los de tipo hidrológico.

El área de estudio está englobada en una de las regiones terrestres prioritarias de México, considerada por la CONABIO como sitio importante que requiere de acciones prioritarias de conservación de la biodiversidad (Arriaga *et al.*, 2000). La región a la que pertenece, de acuerdo con Arriaga *et al.* (2000) es la de la "Sierra sur y costa de Oaxaca". Se le considera de gran relevancia por la alta diversidad de ambientes, entre los cuales destacan comunidades de selvas bajas y medianas, bosques de coníferas, bosques de pino-encino y pequeñas porciones de bosques mesófilos de montaña, todas ellas respondiendo a un gradiente altitudinal. El sitio tiene aún más importancia por la alta concentración de vertebrados endémicos y plantas vasculares que en él habitan.

Por otro lado, la zona presenta grandes problemas de explosión demográfica y desarrollo turístico, principalmente en la región costera. En la cuenca se está llevando a cabo una importante fragmentación en la parte media y baja, dada por el cambio de uso de suelo hacia cultivos de café, desarrollo ganadero y forestal (Arriaga C. *et al.*, 2000).



## **2.2 Trabajo de gabinete**

### **2.2.1 Insumos cartográficos: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) Serie I e Inventario Forestal Nacional (IFN) 2000**

Se utilizaron los mapas de coberturas y uso de suelo elaborados por el INEGI escala 1: 250,000 del año 1979 (*t1*) (año promedio en que fue realizada la cartografía de esta zona), cartografía realizada mediante fotografías aéreas y con puntos de verificación en campo. El sistema clasificatorio que resultó de este trabajo fue con base en criterios de fisonomía, florística, fenología (basado en las estaciones del año, presencia o ausencia de hojas en la vegetación) y estado de conservación de los tipos de coberturas de suelos.

Para las coberturas del año 2000 se utilizaron los resultados del Inventario Nacional Forestal (INF) (*t2*) información obtenida a través del Instituto de Geografía de la UNAM, institución que llevó a cabo dicho estudio. Éste consistió en la actualización de lo realizado en los años noventa por el INEGI con base en la interpretación visual de imágenes de satélite y utilización de fotografías digitales tomadas el mismo año.

La cartografía de las coberturas *t2* se encuentran para todo el país a escala 1: 250,000, con un sistema clasificatorio organizado en forma jerárquica en cuatro niveles y compatible con *t1*: formación, tipo, comunidad y subcomunidad (cada uno de ellos se utilizó de acuerdo con la escala de trabajo) (Velázquez *et al.*, 2002). La resolución del presente estudio se ajustó a trabajar a nivel de comunidad y subcomunidad.

Para el presente trabajo se utilizaron imágenes de satélite utilizadas durante el IFN para la zona de estudio. La leyenda base de referencia fue la misma utilizada para el IFN, ya que como se comentó, es compatible con la leyenda de *t1*.

### 2.2.2 Cartografía, imágenes de satélite y fotografías aéreas

Se utilizó la cartografía elaborada por el INEGI que sirvió de base para la planeación de las salidas de campo, elaboración de procesos de cambio y de las zonas funcionales (Tabla 1).

Tabla 1 Cartografía elaborada por INEGI utilizada durante el presente trabajo

| NOMBRE                   | CLAVE  | TEMA                                   | ESCALA     |
|--------------------------|--------|--|------------|
| Coyula                   | D14B28 | Carta topográfica                      | 1:50,000   |
| La Merced del<br>Potrero | E14D89 | Carta topográfica                      | 1: 50,000  |
| Puerto Escondido         | D14-3  | Carta de suelos                        | 1: 250,000 |
| Puerto Escondido         | D14-3  | Carta topográfica                      | 1: 250,000 |
| Puerto Escondido         | D14-3  | Carta de uso del suelo y<br>vegetación | 1: 250,000 |
| San José Chacalapa       | D14B18 | Carta topográfica                      | 1: 50,000  |
| San Pedro Mixtepec       | E14D79 | Carta topográfica                      | 1: 50,000  |
| San Pedro Pochutla       | D14B28 | Carta topográfica                      | 1: 50,000  |
| Zaachila                 | E14-12 | Carta de suelos                        | 1: 250,000 |
| Zaachila                 | E14-12 | Carta topográfica                      | 1: 250,000 |
| Zaachila                 | E14-12 | Carta de uso de suelo y<br>vegetación  | 1: 250,000 |

Las imágenes de satélite son multiespectrales y se utilizó la composición de bandas 4, 5 y 7 en falso color para una mejor observación de las coberturas vegetales. Estas provienen del satélite Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper (ETM+), las cuales tienen una resolución de 30 metros y son distribuidas por la NASA a través del EROS Data Center (Palacio-Prieto *et al.*, 2000).

Las fotografías aéreas fueron conseguidas a través del INEGI a una escala 1:75,000 de la zona de estudio (Tabla 2).

Tabla 2 Fotografías aéreas escala 1:75,000 utilizadas para la fotointerpretación de la cuenca del río Copalita, Oaxaca, México

| Zona   | Fecha            | Línea   | Total |
|--------|------------------|---------|-------|
| E14-12 | Dic 99-Marzo2000 | 190-192 | 9     |
| D14-3  | Dic 99           | 190-192 | 17    |
| Total  |                  | 3       | 26    |

### ***2.2.3 Diseño de verificación***

Se definió el límite de la cuenca con base en las curvas de nivel cada 100 m, tomando en cuenta los puntos más altos del relieve entre cuencas hidrológicas (Lugo Hubp, 1989).

Con la cartografía de cobertura y uso del suelo de los años 1979 y 2000, de manera individual se evaluaron en un Sistema de Información Geográfica (SIG) las coberturas presentes para cada fecha; posteriormente éstas fueron confrontadas y se observaron los procesos de cambio de un año a otro. Con base en este procedimiento, se identificaron una serie de puntos que fueron necesarios verificar en campo. Estos se eligieron, en principio, por aquellas coberturas vegetales de las cuales se tenía duda acerca de su presencia en el sitio. Posteriormente se cotejaron aquellos lugares donde se presentaron cambios importantes de una fecha a otra o en los cuales el cambio parecía poco probable.

## **2.3 Verificación de campo**

Se llevó una primera salida de exploración a la zona de estudio (octubre de 2003) durante la cual se pudieron reconocer coberturas presentes en el área. Se

tomaron notas en una bitácora de campo acerca del tipo de vegetación del lugar, estado de conservación, altura media sobre el nivel del mar (m s n m) así como los datos de ubicación geográfica. Con los datos obtenidos de esta primera salida se pudo interpretar las fotografías aéreas de la cuenca en conjunto con la cartografía de t2, donde se validaron, y en algunos casos, se corrigieron las categorías definidas en los polígonos del IFN sobrepuestos en la imagen de satélite de 2000 a través del SIG.

A partir de esta primera fase se diseñó un muestreo proporcional de las diversas categorías de coberturas de vegetación y se procedió a una segunda verificación de campo (enero de 2005). En ella se visitaron aquellos sitios donde no se contaba con registros confiables de las coberturas de la zona, además de aquellas que presentaron una alta complejidad espectral en las imágenes de satélite y, por lo tanto, aumentaban la probabilidad de confusión al momento de interpretar ésta

Con el propósito de que la verificación fuera más eficiente, se siguieron trayectos a lo largo de caminos primarios y secundarios. En todos los sitios de verificación se tomaron coordenadas geográficas con un Geoposicionador (GPS Garmin III y Garmin eTrex Venture Cx) y se revisaron las etiquetas de los polígonos interpretando *in situ* en una imagen de satélite impresa escala 1:100,000 (espaciomapa). Cuando fue necesario un cambio en las etiquetas o límites de los polígonos, éstos fueron registrados en una bitácora de campo para su posterior re-etiquetamiento de manera digital.

Una vez realizado el análisis digital de las coberturas y sus procesos de cambio, se efectuó una tercera salida (enero de 2006). En ella se llegó a sitios de difícil acceso, verificándose de manera más precisa aquellos puntos en los cuales la complejidad espectral dificultaba la precisión de ciertas coberturas y por tanto la confusión de algunos procesos de cambio.

## **2.4 Análisis del cambio de coberturas y usos del suelo (ACCUS)**

### ***2.4.1 Confrontación de coberturas***

Realizada la verificación de campo, se redefinieron los límites de algunos polígonos, se re-etiquetaron aquellos que no estuvieran correctos y, en casos particulares, se corrigieron polígonos de *t1* con base en la información de campo y a la respuesta espectral de las coberturas observadas en la imagen de satélite. Corregidos los polígonos y sus etiquetas, se confrontaron los mapas de *t1* y *t2*. A partir de esta intersección se construyó una matriz de procesos de cambio, la cual se encuentra conformada por las superficies que han sufrido alguna transformación de categoría en 1979 a otra clase en 2000, identificándose entre otros, los procesos de deforestación. Esta sobreposición de mapas permitió generar un mapa conciso de los cambios de uso de suelo y su ubicación espacial en la cuenca.

El análisis y edición de la cartografía se llevó a cabo en los programas ArcInfo 7.1, ArcView 3.2.A e Ilwis 3.3 Academic, a una escala regional 1: 250,000 (los mapas que ilustran este trabajo son solo representaciones de los mapas originales, no se encuentran a la escala original), con un área mínima cartografiable de 50 ha (un cuadrado aproximado de 0.28 x 0.28 cm a la escala 1: 250,000). La base de datos espacial se encuentra en una proyección universal transversa de mercator (UTM), zona 14, con los siguientes parámetros: elipsoide Clarke 1866, datum horizontal norteamericano de 1927 (NAD 27) y un datum vertical al nivel medio del mar.

### ***2.4.2 Modelo de procesos de cambio***

Se realizó un análisis de cambio en un SIG en el cual se identificaron los procesos de transformación que han sufrido las coberturas en un lapso de 21 años (de 1979 a 2000), así como de aquellas que han permanecido sin modificación en ese periodo. A las coberturas primarias de 1979 que se transformaron a coberturas

secundarias al 2000 se les nombró “alteración”, de coberturas secundarias a coberturas primarias son “recuperación”, de coberturas antrópicas a coberturas primarias o coberturas secundarias es “revegetación” y todas aquellas que eran coberturas primarias o coberturas secundarias y pasaron a coberturas de uso antrópico es “deforestación” (Palacio-Prieto. *et al.*, 2000) (Figura 3).

Se calcularon las tasas de cambio de todos las cobertura y uso del suelo que pasaron de 1979 a 2000, mediante la fórmula propuesta por la FAO (1996):

$$\delta n = [ (S_2 / S_1)^{1/n} - 1 ] \times 100$$

Donde:

$\delta$  = tasa de cambio.

$S_2$  = superficie de la fecha dos.

$S_1$  = superficie de la fecha uno.

$n$  = número de años entre las dos fechas.

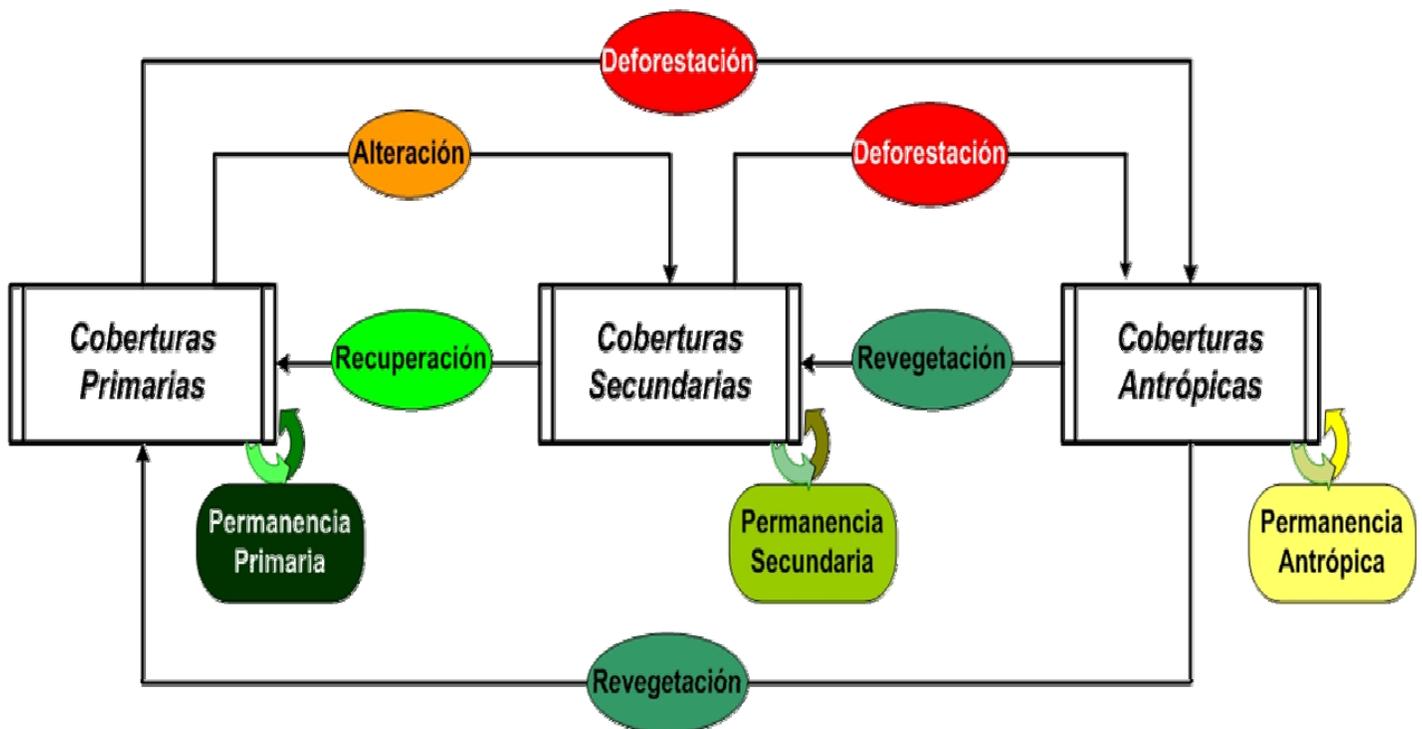


Figura 3. Modelo de Procesos de Cambio a partir del Análisis de Cambios de Coberturas y Usos del Suelo.

## **2.5. Implicación del modelo del ACCUS en la operación funcional de la cuenca (Zonas Funcionales)**

Se realizó la zonificación hidrológico-funcional de la cuenca de acuerdo con PLADEYRA (2003), determinándose las tres zonas que la conforman:

- **Cabecera:** Es la zona que se ubica en la parte alta de cada cuenca, del parteaguas principal hasta la intersección de las corrientes de primer orden. Aquí nacen las corrientes hidrológicas y, por su función (principalmente de captación) es la zona de mayor fragilidad, por lo que deben estar sujetas a protección o restauración.
- **Captación-transporte:** Es la parte de la cuenca que se encarga de recibir y transportar la mayor parte del agua del sistema. Esta es la zona más extensa y, por definición, es el área restante e intermedia que queda luego de la delimitación de la zona de cabecera y de emisión.
- **Emisión:** Ésta se localiza en la parte baja de la cuenca. Se caracteriza por ser la zona de recepción del agua de las otras dos zonas más altas (cabecera y captación-transporte), por lo que es la más caudalosa y con menor energía del relieve. Su identificación se llevó a cabo al reconocer en la parte baja de la cuenca las dos últimas corrientes de segundo orden y el inicio de aquellas corrientes de primer orden que se encuentran por debajo del nivel de ella.

## **2.6 Identificación de zonas con aspectos hidrológicos**

Para el estudio de los servicios ambientales como la calidad, la cantidad y la temporalidad del agua se requiere de datos cuantitativos, los cuales no existen para la zona. Por lo tanto mediante el cambio de coberturas y para su estudio, de 1979 a

2000 se realizó una inferencia de zonas que pueden ver afectada de alguna manera su aspecto hidrológico. Estas son zonas donde especialmente la regulación hídrica se ve favorecida por la presencia principalmente de las coberturas nativas de vegetación. Entre estos eventos se encuentran la intercepción de lluvia, la infiltración, la calidad, la cantidad y la temporalidad del agua, la prevención de deslizamientos y de la erosión del suelo, etc.

Por este motivo se construyó una matriz de cambios de coberturas de 1979 a 2000, en el cual sólo en aquellos casos donde ocurrió un cambio o permanencia de cobertura de un año a otro, se le colocó un valor. Dentro de la matriz, todas aquellas casillas en blanco indican, por lo tanto, que ese evento no ocurrió. Así, los valores de “-1” se les consideró como “cambios negativos”. Estos indican aquellos cambios o permanencias de coberturas que afectan de manera negativa algún aspecto hidrológico, transformaciones como la de un bosque de pino primario a una zona con agricultura de temporal o las de las zonas de agricultura de humedad. Las áreas con “cambios positivos” fueron etiquetadas con el número “1”. Esto señala a aquellas coberturas que en el proceso de cambio favorecieron de alguna manera a que los procesos hidrológicos de la cuenca se vieran beneficiados, como lo fueron, por ejemplo, las áreas con agricultura de temporal a selva baja secundaria. Finalmente las zonas de “permanencias positivas” fueron etiquetadas con “0”. Éstas se refieren a las permanencias primarias, las cuales no sufrieron cambio alguno de un año a otro y, por tanto, mantienen una buena aptitud hídrica de la cuenca; tal es el caso de la permanencia de los bosques de pinos primarios.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Coberturas presentes en 1979 y 2000

Para el año de 1979 todas las coberturas predominantemente primarias ocuparon 235,043 ha, las de estado secundario estaban presentes en 53,991 ha y las zonas que han sufrido algún tipo de modificación predominantemente productiva para el hombre exhibían 11, 810 ha (Figuras 4 y 5).

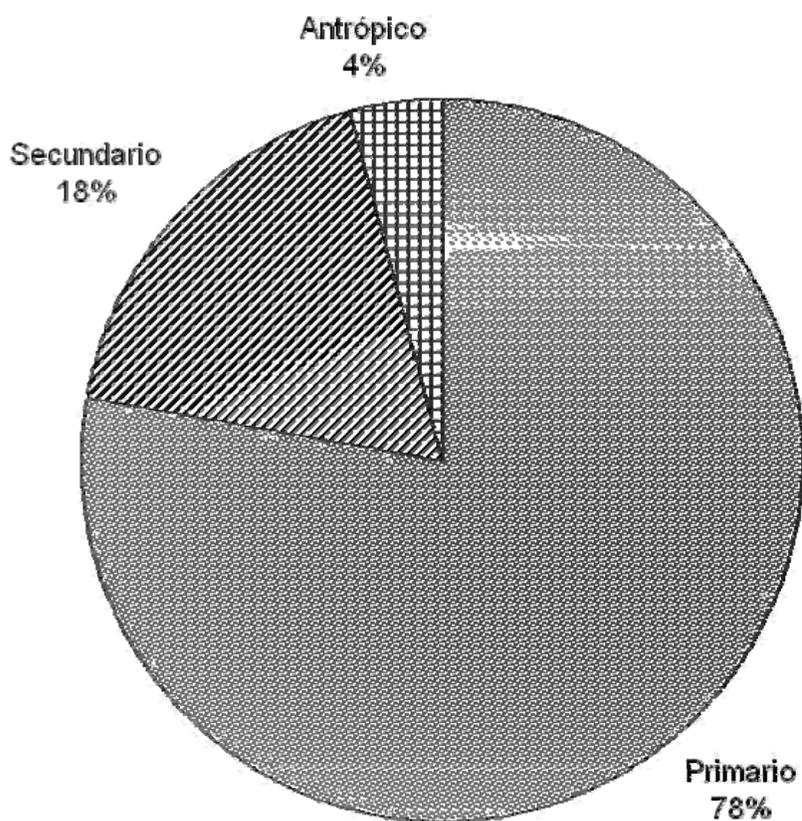


Figura 4. Estado de conservación de las coberturas en 1979

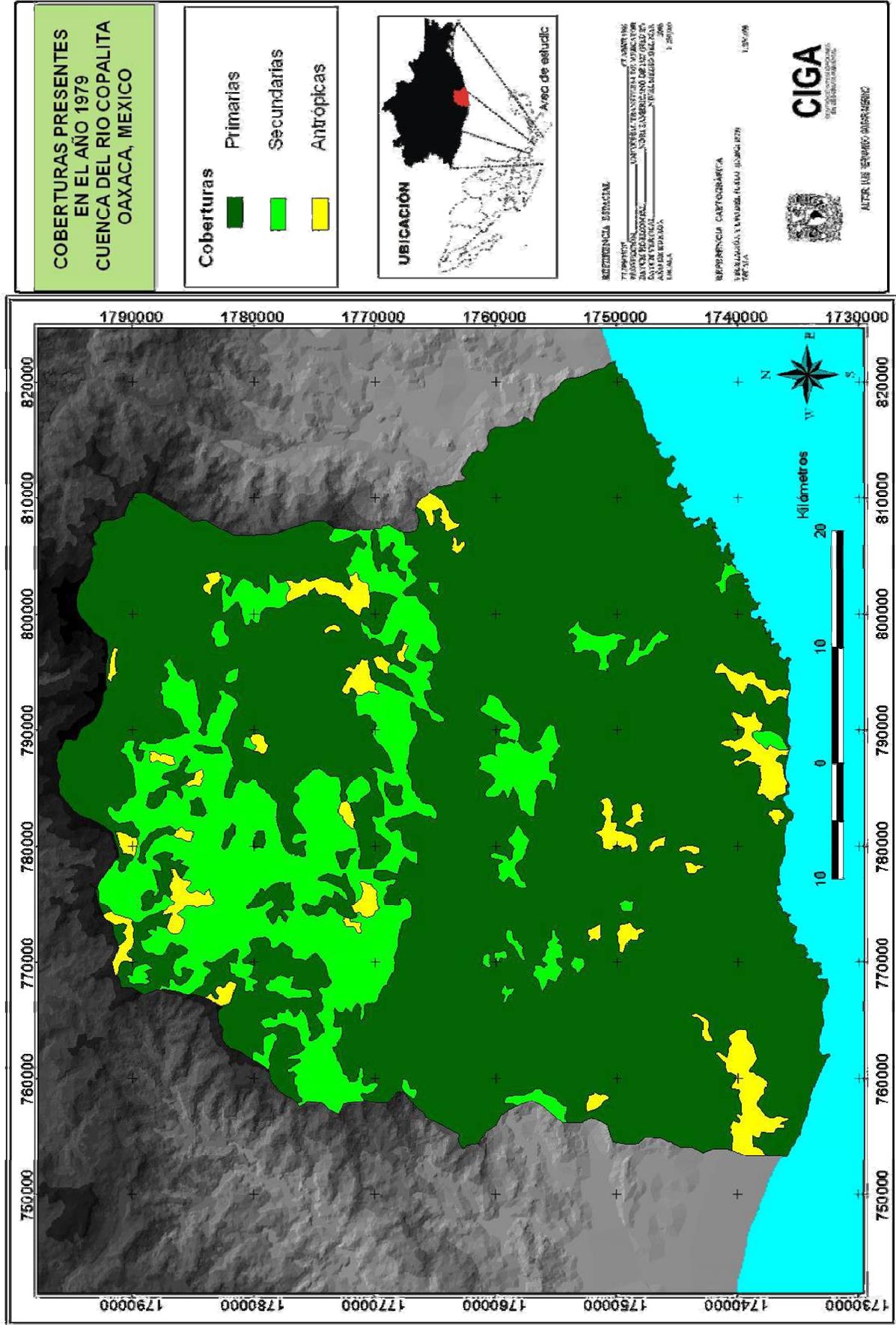


Figura 5. Coberturas presentes en el año 1979 de la Cuenca del Río Copalita

Asimismo, se presentaron 20 coberturas: de ellas, dos fueron modificadas con base en datos de campo y por información contenida en las cartas contiguas de coberturas y uso de suelo (1: 250,000) de INEGI, las cuales reflejan concordancia con lo observado en el área de estudio (Tabla 3, Figura 6).

De estas coberturas, la selva baja predominantemente primaria es la que mayor extensión presentaba con 114,883 ha, seguido de la selva alta y mediana primaria con 35,345 ha, el bosque de pino primario con 30,778 ha y el bosque mesófilo de montaña primario con 27,815 ha (Figura 6).

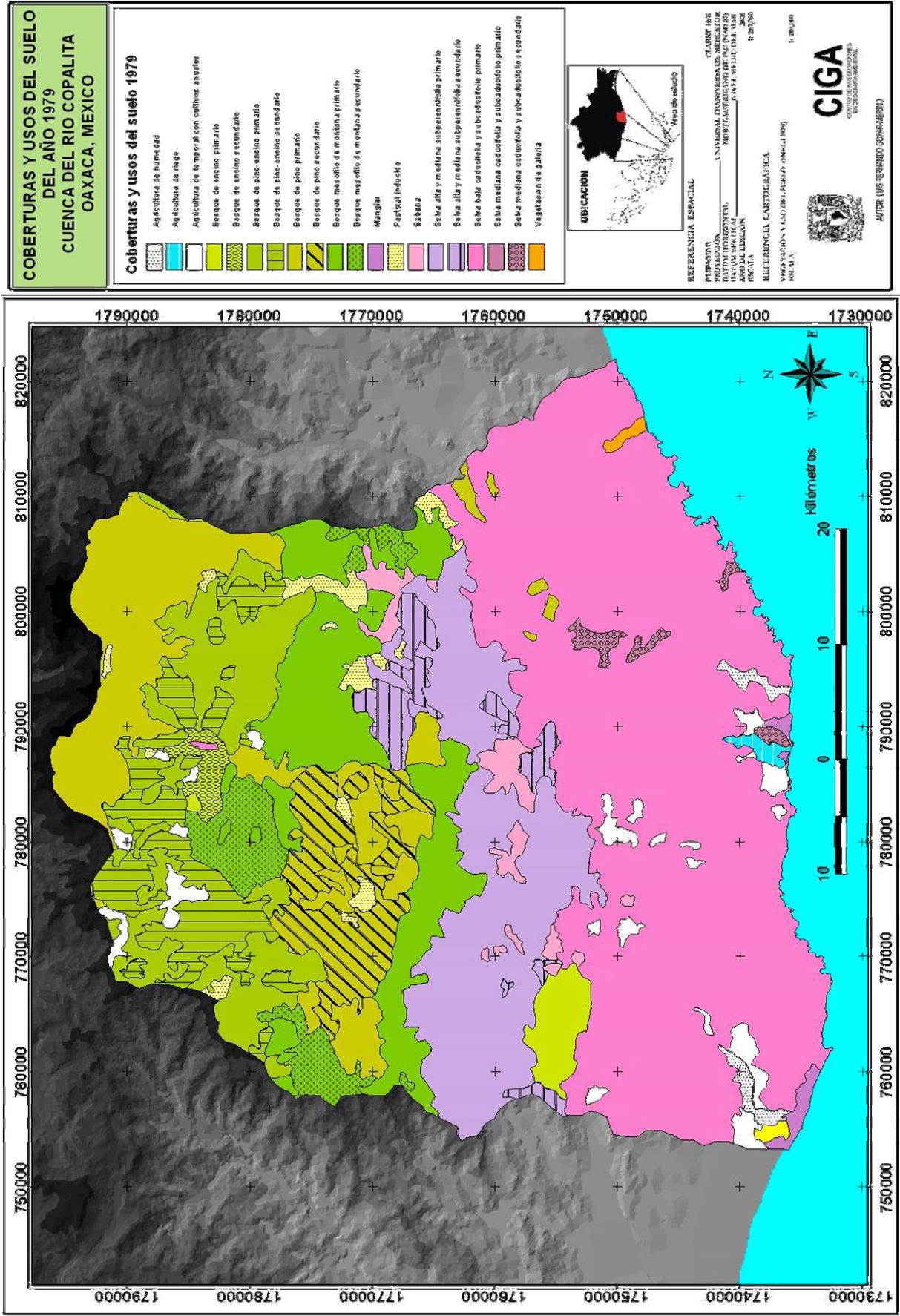


Figura 6. Mapa de coberturas y uso del suelo presentes en 1979 en la cuenca del Río Copalita

Para el año 2000 las coberturas predominantemente primarias ocuparon una extensión de 205,146 ha, las coberturas secundarias 44,238 y las de actividades predominantemente antrópicas 51,459 ha (Figuras 7 y 8).

Por otro lado, en 2000 se reconocieron 21 coberturas, identificadas a través de imágenes de satélite, fotografías aéreas y 167 puntos de verificación de campo (Tabla 3, Figura 10). De éstas, las coberturas con mayor extensión fueron la selva baja primaria con 83,399 ha, la selva alta y mediana primaria con 43,583 ha, el bosque de pino primario con 40,072 ha y la agricultura de temporal con cultivos anuales con 33,478 ha (Figura 9).

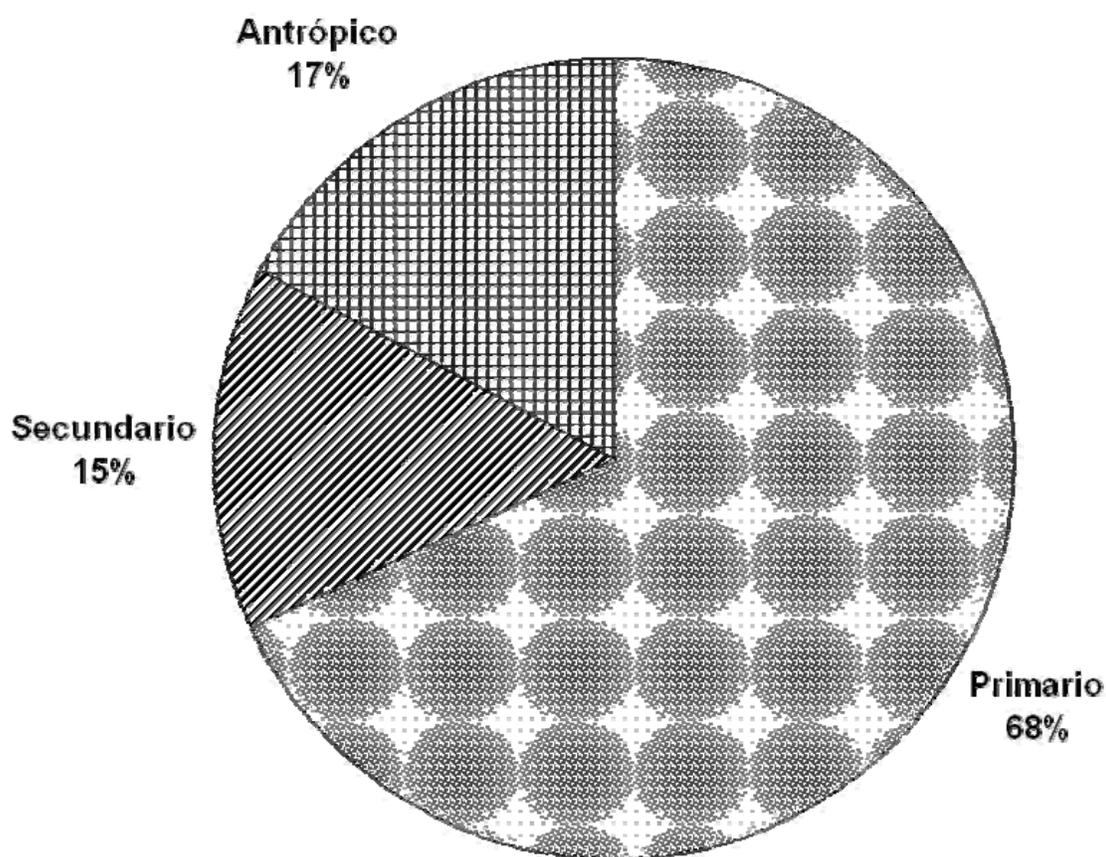


Figura 7. Estado de conservación de las coberturas en 2000

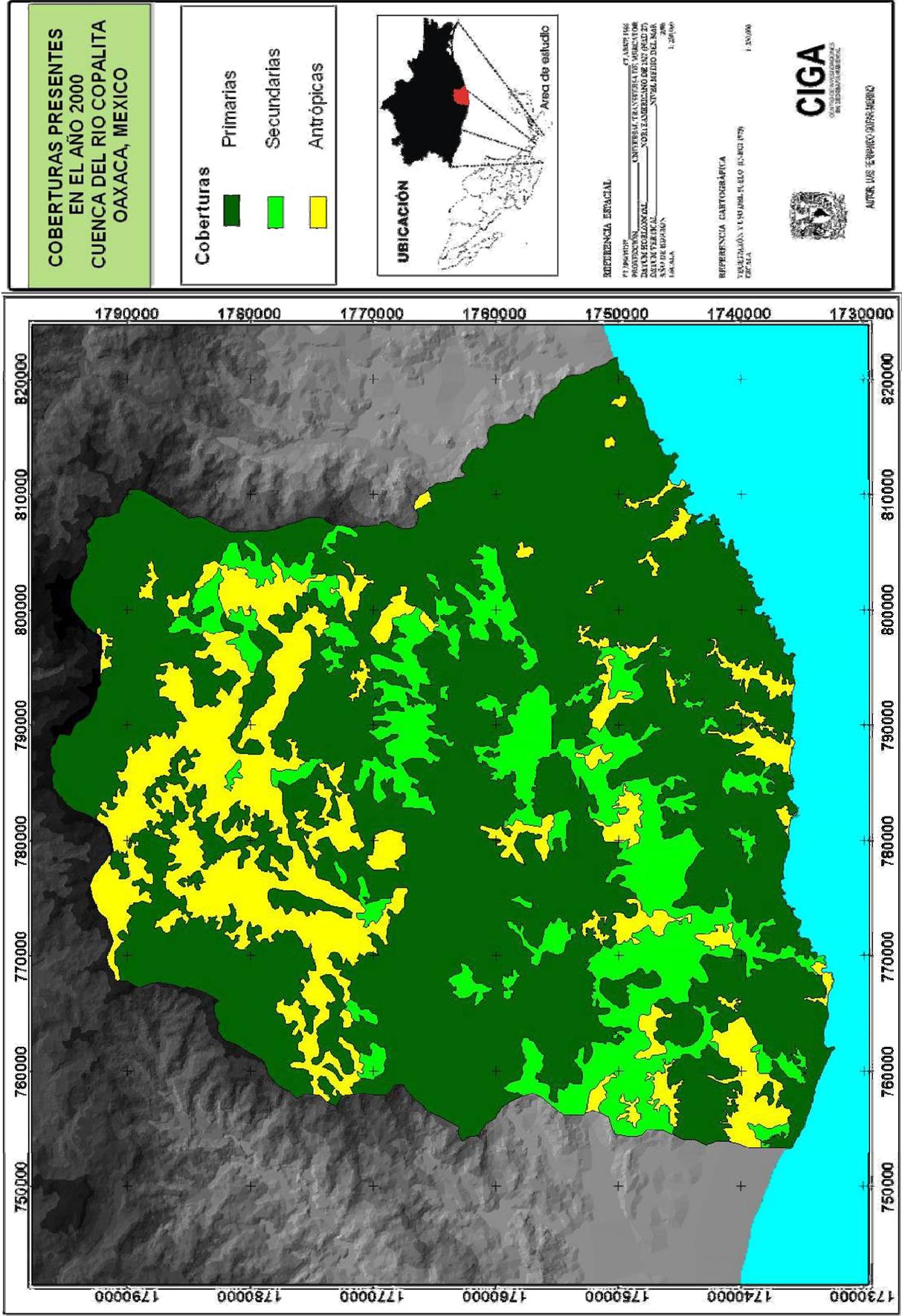


Figura 8. Coberturas presentes en el año 2000 de la Cuenca del Río Copalita

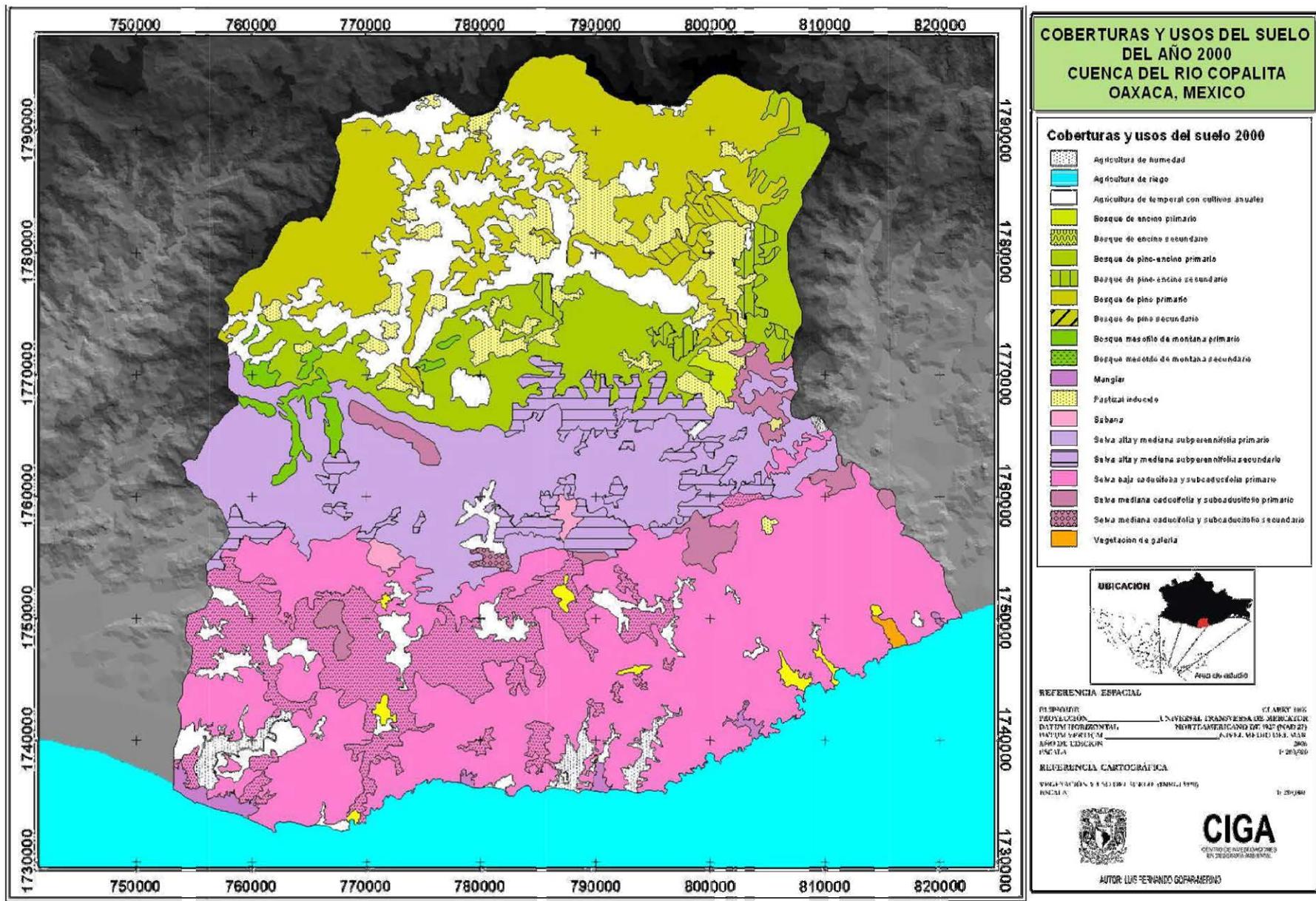


Figura 9. Mapa de coberturas y usos del suelo presente en 2000 en la cuenca del Río Copalita

### 3.2 Cambios de cobertura y uso del suelo y procesos de cambio 1979-2000

Del año 1979 al 2000 se mantuvieron 17 de los 20 tipos de coberturas y usos del suelo que existían para el primero, desapareciendo las categorías de “agricultura de riego, bosque de encino secundario y bosque mesófilo de montaña secundario”. Para el 2000 se identificaron cuatro nuevas categorías de coberturas y uso del suelo, las cuales fueron: “áreas sin vegetación aparente, asentamientos humanos, pastizal natural y selva baja caducifolia y subcaducifolia secundario” (Tabla 3).

Las coberturas que presentaron un cambio importante fueron la agricultura de temporal, la cual en 1979 ocupaba 1.94% de superficie de la cuenca y pasó a 11.13%, es decir, aumentó aproximadamente cinco veces su extensión a una tasa anual de 8.67%. El caso contrario ocurrió con el bosque mesófilo de montaña primario, el cual ocupaba el 9.25% de área y disminuyó a 0.99% a una tasa de -10.10% (Tabla 3, Figura 10). La agricultura de riego, el bosque de encino secundario y el bosque mesófilo secundario desaparecieron y la selva baja secundaria fue un nuevo registro para el 2000, con una superficie de 7.78% del total de la cuenca (Tabla 3).

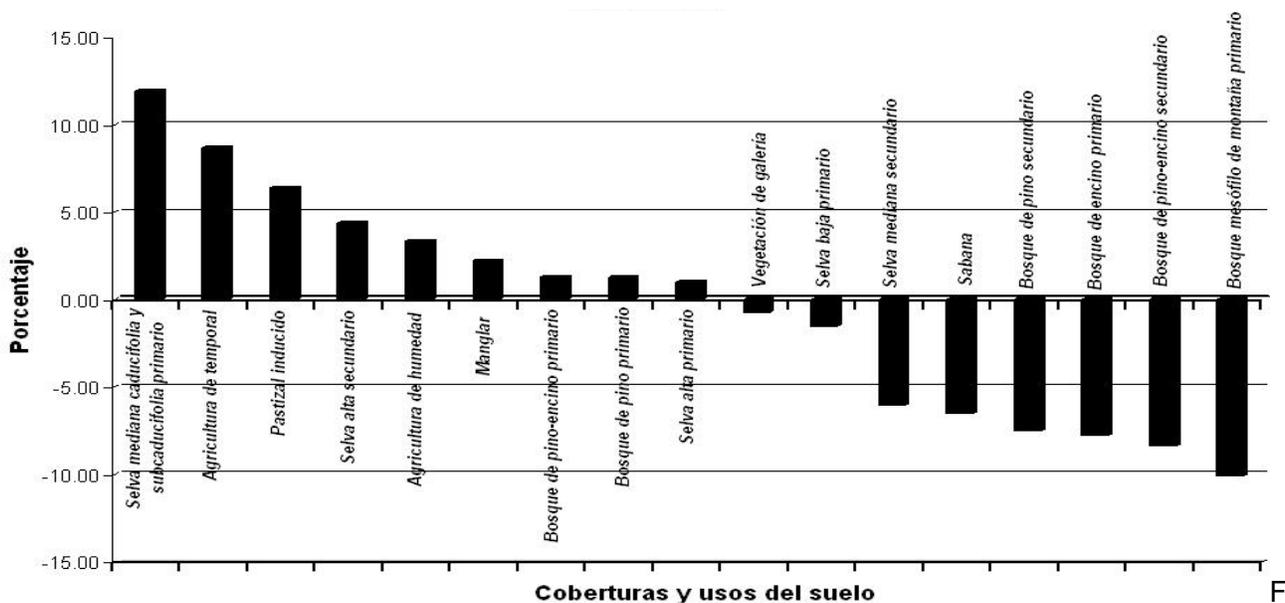


Figura 10. Porcentaje de tasas de cambio por cobertura y uso de suelo 1979 - 2000

Tabla 1. Cambio en las coberturas y usos del suelo de 1979 - 2000 en la cuenca del río Copalita, Oaxaca, México

| Tipos de coberturas y Usos de Suelo                 | Superficie (ha) |        | Frecuencia (%) |       | Tasas de cambio (%) |
|---|-----------------|--------|----------------|-------|---------------------|
|   | 1979            | 2000   | 1979           | 2000  |                     |
| Agricultura de humedad*°                            | 1,645           | 3,291  | 0.55           | 1.09  | 3.36                |
| Agricultura de riego*                               | 732             | N/P    | 0.24           | N/P   | -100                |
| Agricultura de temporal con cultivos anuales*°      | 5,842           | 33,478 | 1.94           | 11.13 | 8.67                |
| Área sin vegetación aparente°                       | N/P             | 111    | N/P            | 0.04  | -----               |
| Asentamiento humano°                                | N/P             | 1,406  | N/P            | 0.47  | -----               |
| Bosque de encino primario*°                         | 4,053           | 740    | 1.35           | 0.25  | -7.78               |
| Bosque de encino secundario*                        | 1,941           | N/P    | 0.65           | N/P   | -100                |
| Bosque de pino primarioα*°                          | 30,778          | 40,072 | 10.23          | 13.32 | 1.26                |
| Bosque de pino secundario*°                         | 13,865          | 2,696  | 4.61           | 0.9   | -7.50               |
| Bosque de pino-encino primario*°                    | 20,389          | 26,729 | 6.78           | 8.88  | 1.30                |
| Bosque de pino-encino secundario*°                  | 16,252          | 2,586  | 5.4            | 0.86  | -8.38               |
| Bosque mesófilo de montaña primario*°               | 27,815          | 2,975  | 9.25           | 0.99  | -10.10              |
| Bosque mesófilo de montaña secundario*              | 9,338           | N/P    | 3.1            | N/P   | -100                |
| Manglar*°   | 1,082           | 1,708  | 0.36           | 0.57  | 2.20                |
| Pastizal inducido*°                                 | 3,588           | 13,173 | 1.19           | 4.38  | 6.39                |
| Pastizal natural°                                   | N/P             | 87     | N/P            | 0.03  | -----               |
| Sabana*°  | 4,410           | 1,073  | 1.47           | 0.36  | -6.51               |
| Selva alta y mediana subperennifolia primario*°     | 35,345          | 43,583 | 11.75          | 14.49 | 1.00                |
| Selva alta y mediana subperennifolia secundario*°   | 6,670           | 16,338 | 2.22           | 5.43  | 4.36                |
| Selva baja caducifolia y subcaducifolia primarioα*° | 114,883         | 83,399 | 38.19          | 27.72 | -1.51               |

Tabla 3. Continuación.

| Tipos de coberturas y Usos de Suelo                     | Superficie (ha) |                | Frecuencia (%) |            | Tasas de cambio (%) |
|---|-----------------|----------------|----------------|------------|---------------------|
|   | 1979            | 2000           | 1979           | 2000       |                     |
| Selva mediana caducifolia y subcaducifolia primario*°   | 305             | 3,247          | 0.1            | 1.08       | 11.91               |
| Selva baja caducifolia y subcaducifolia secundario°     | N/P             | 23,407         | N/P            | 7.78       | -----               |
| Selva mediana caducifolia y subcaducifolia secundario*° | 1,512           | 410            | 0.5            | 0.14       | -6.04               |
| Vegetación de galería*°                                 | 389             | 335            | 0.13           | 0.11       | -0.72               |
| <b>Total</b>  | <b>300,843</b>  | <b>300,843</b> | <b>100</b>     | <b>100</b> |                     |

¤ Coberturas que fueron modificadas en alguno de sus polígonos de acuerdo con la información recabada durante el presente estudio.

\* Coberturas registradas para el año 1979

° Coberturas registradas para el año 2000

N/P Cobertura no presente en ese año

En conjunto, las coberturas primarias y secundarias que existían en la zona disminuyeron aproximadamente 10% y 20%, respectivamente y, por el contrario, las coberturas antrópicas aumentaron un poco más de cuatro veces su extensión (Tabla 4).

Tabla 2. Cambios de coberturas de 1979 a 2000. Los datos entre paréntesis corresponden a los porcentajes de tasas de cambio de 1979 a 2000.

| HECTAREAS                 | 2000                 |                        |                       | Total general 1979 |
|---------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|
|                           | COBERTURAS PRIMARIAS | COBERTURAS SECUNDARIAS | COBERTURAS ANTRÓPICAS |                    |
| COBERTURAS PRIMARIAS      | 179,551<br>(-0.65%)  | 35,457<br>(-7.65%)     | 20,036<br>(-6.98%)    | 235,044            |
| COBERTURAS SECUNDARIAS    | 23,133<br>(6.56%)    | 7,448<br>(-0.94)       | 23,410<br>(-0.23%)    | 53,991             |
| COBERTURAS ANTRÓPICAS     | 2,462<br>(-6.98%)    | 1,333<br>(6.49%)       | 8,014<br>(7.26%)      | 11,809             |
| <i>Total general 2000</i> | 205,146              | 44,238                 | 51,460                | 300,844            |

Con esta base se elaboró la matriz de procesos de cambio, en la que sobresalen la permanencia primaria, siendo la que más extensión territorial presentó al tener 179,551 ha, seguido por la deforestación con 43,445 ha y la alteración con 35,457 ha (Tabla 5, Figura 11).

Tabla 3. Porcentaje de cobertura de los procesos de cambio 1979 - 2000

| <i>Procesos de Cambio</i>     | <i>2000</i>                              |   |   |
|-------------------------------|--|---|---|
| <i>1979</i>                   | <i>COBERTURAS PRIMARIAS</i>              | <i>COBERTURAS SECUNDARIAS</i>             | <i>COBERTURAS ANTROPICAS</i>            |
| <i>COBERTURAS PRIMARIAS</i>   | 59.68%<br>*(Permanencia Primaria -0.65%) | 11.79%<br>*(Alteración-7.65%)             | 14.44%<br>*(Deforestación-7.89%)        |
| <i>COBERTURAS SECUNDARIAS</i> | 7.69%<br>*(Recuperación 6.56%)           | 2.48%<br>*(Permanencia Secundaria -0.94%) |   |
| <i>COBERTURAS ANTROPICAS</i>  | 1.26%<br>*(Revegetación15.63%)           |   | 2.66%<br>*(Permanencia Antrópica 7.26%) |

\* Nombre del proceso y su tasa de cambio en porcentaje.



### 3.3 Identificación de zonas con aspectos hidrológicos

Se construyó la matriz de cambios en la que se identificaron las variaciones que se presentaron en las coberturas de 1979 a 2000. Así, las “permanencias positivas” han persistido preferentemente de manera natural en 184,903 ha (61.46% de extensión de la cuenca), lo que ha manteniendo que se preserve una buena actividad hidrológica. Los “cambios positivos” que han favorecido que los diferentes procesos hidrológicos (regulación hídrica) operen de la mejor manera abarca 25,125 ha (8.35% de la cuenca). Por último, 90,816 ha (30.19% del área de estudio) representan los “cambios negativos”, es decir, corresponden a los cambios de coberturas y uso del suelo que perjudican una actividad hídrica ventajosa para la zona (Tabla 6 y 7, Figura 12).

Tabla 4. Categorías de aspectos hídricos en la cuenca del río Copalita, Oaxaca, México

| Aspecto hídrico        | Hectáreas  | Porcentaje de extensión |
|------------------------|------------|-------------------------|
| Permanencias Positivas | 184,903.05 | 61.46%                  |
| Cambios Positivos      | 25,125.11  | 8.35%                   |
| Cambios Negativos      | 90,815.64  | 30.19%                  |
| Total                  | 300,843.8  | 100%                    |







### 3.4. Zonas funcionales

#### 3.4.1 Zonas funcionales y coberturas presentes en la cuenca

Las zonas funcionales estuvieron integradas de la siguiente manera: zonas de cabecera con 192,268 ha; zonas de captación-transporte con 66,947 ha; y zonas de emisión, 41,630 ha. La cuenca es una zona con gran capacidad de captación de agua. Esto se debe a que 63.91% del área se encargan de colectar el líquido. Por otro lado, 22.25% de la cuenca se responsabiliza de la acumulación y transporte del agua superficial. Por último, 13.84% son superficies de emisión, las cuales corresponden principalmente a las zonas de playa.

La relación de la zona de cabecera con las coberturas del año de 1979 mostraron que éstas contaban con 74.81% de coberturas primarias, 22.07% de coberturas secundarias y 3.12% de coberturas antrópicas. Para el año 2000 esta relación se vio alterada, las coberturas primarias como las secundarias disminuyeron a 69.38% y 13.21%, respectivamente, en tanto que las coberturas antrópicas aumentaron su superficie con un 17.40% (Figura 13 y 14).

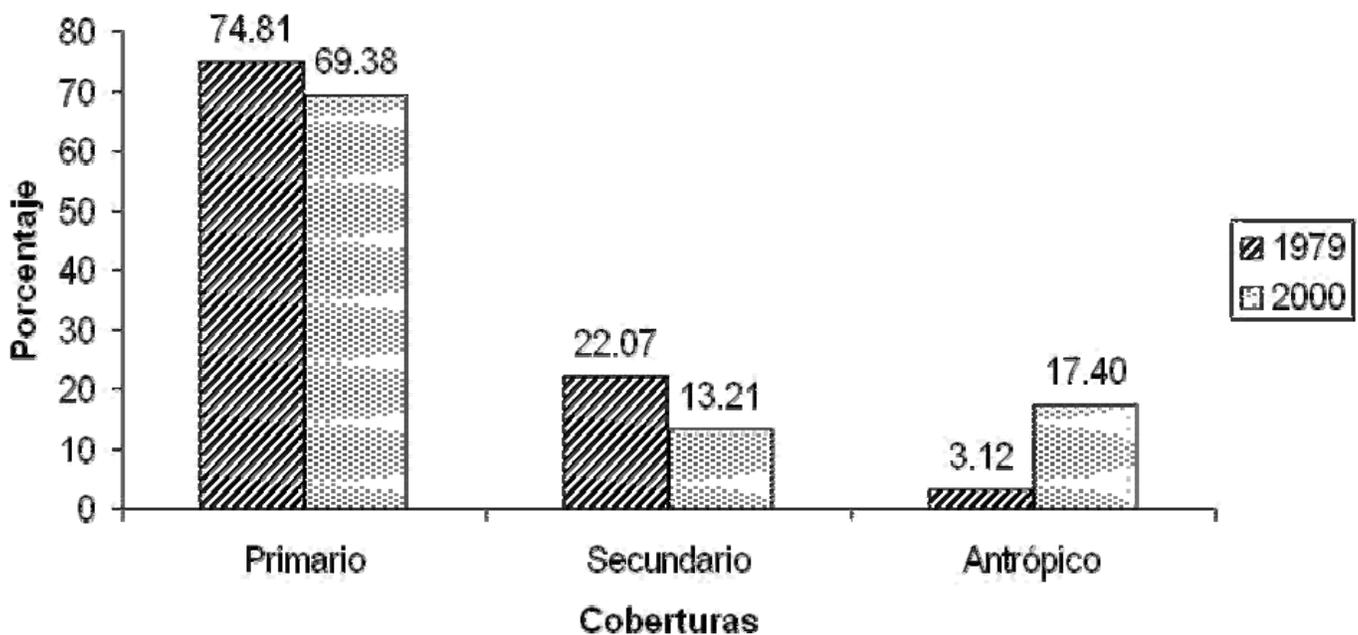


Figura 13. Porcentaje de coberturas en la cabecera de cuenca de 1979 y 2000

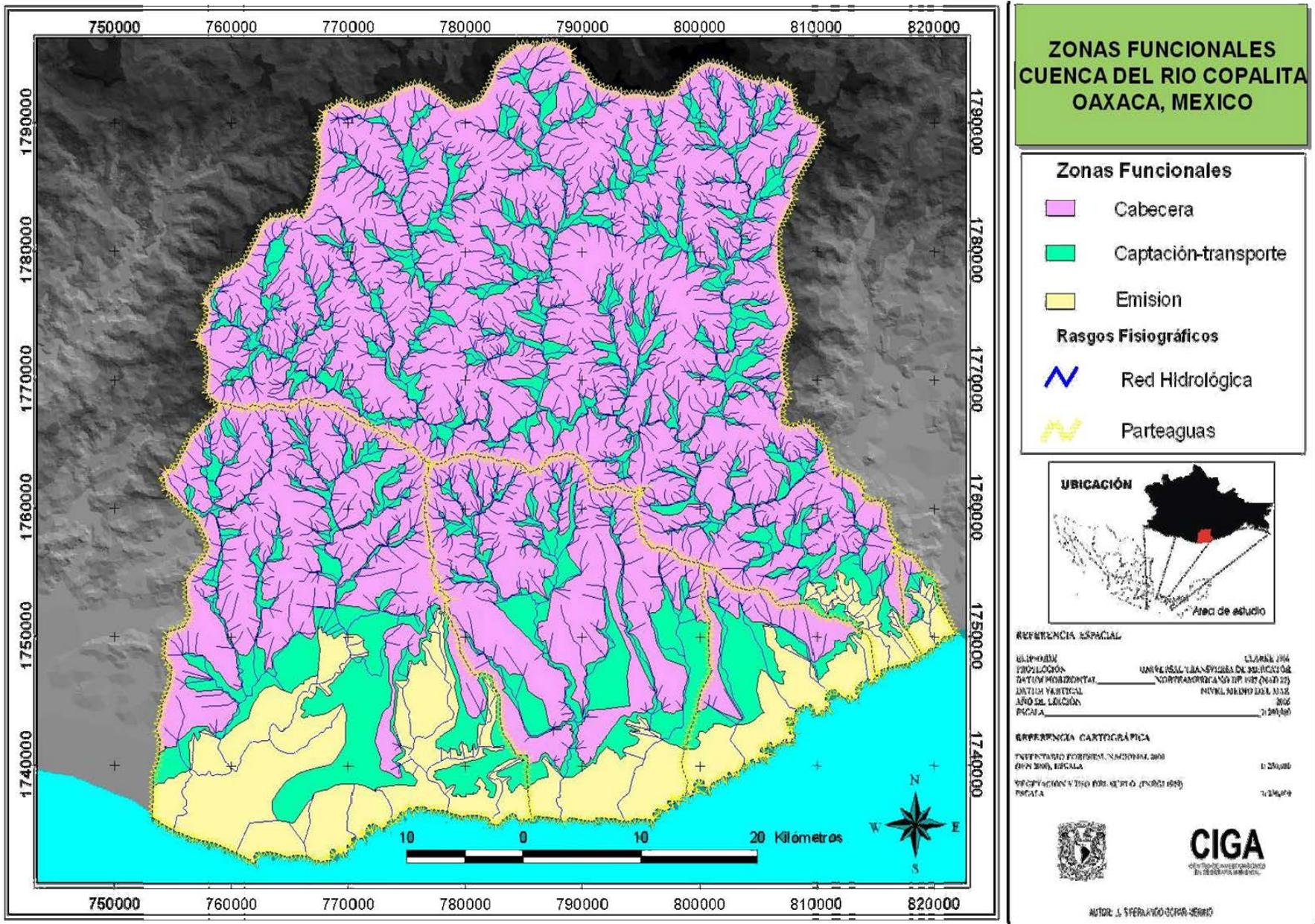


Figura 14. Zonas funcionales (cabecera, captación-transporte y emisión) en la cuenca del río Copalita, Oaxaca, México

Las zonas de captación-transporte, por otro lado, son las áreas con menor extensión. Éstas guardan una gran importancia por la recepción del agua acumulada en las zonas de cabecera y la transportan a las partes bajas de la cuenca. Ésta contaba para el año 1979 con coberturas primarias de 80.74%, coberturas secundarias de 16.50% y antrópicas de 2.76%. La relación cambió en el año 2000, ya que las coberturas primarias disminuyeron a 62.21%, las coberturas secundarias aumentaron a 20.12% y las antrópicas se incrementaron poco mas de cinco veces su extensión, para quedar con 17.68% (Figura 15).

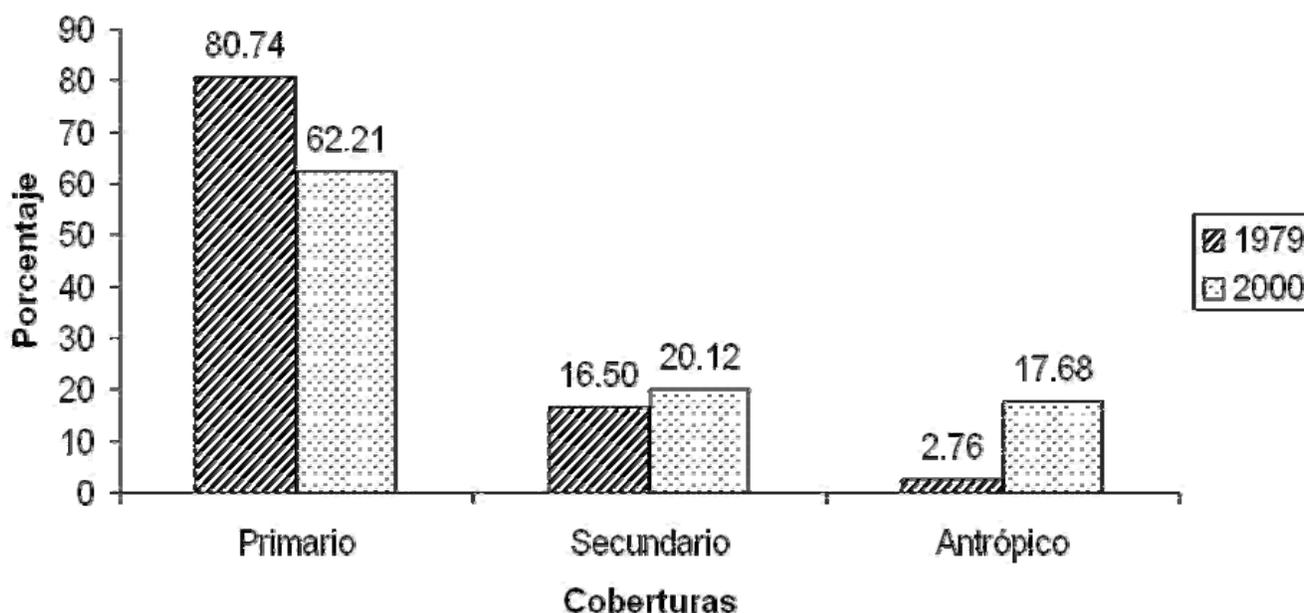


Figura 15. Porcentaje de coberturas en las zonas de captación-transporte de cuenca en 1979 y 2000

Para las zonas de emisión en el año 1979, las coberturas primarias tenían 88.19% de extensión, 1.21% de coberturas secundarias y 10.60% de coberturas antrópicas. Para el 2000 las coberturas primarias descendieron a 72.88%, las antrópicas aumentaron su extensión a 13.30% y las coberturas secundarias aumentaron casi once veces su extensión, a 13.83% (Figura 16).

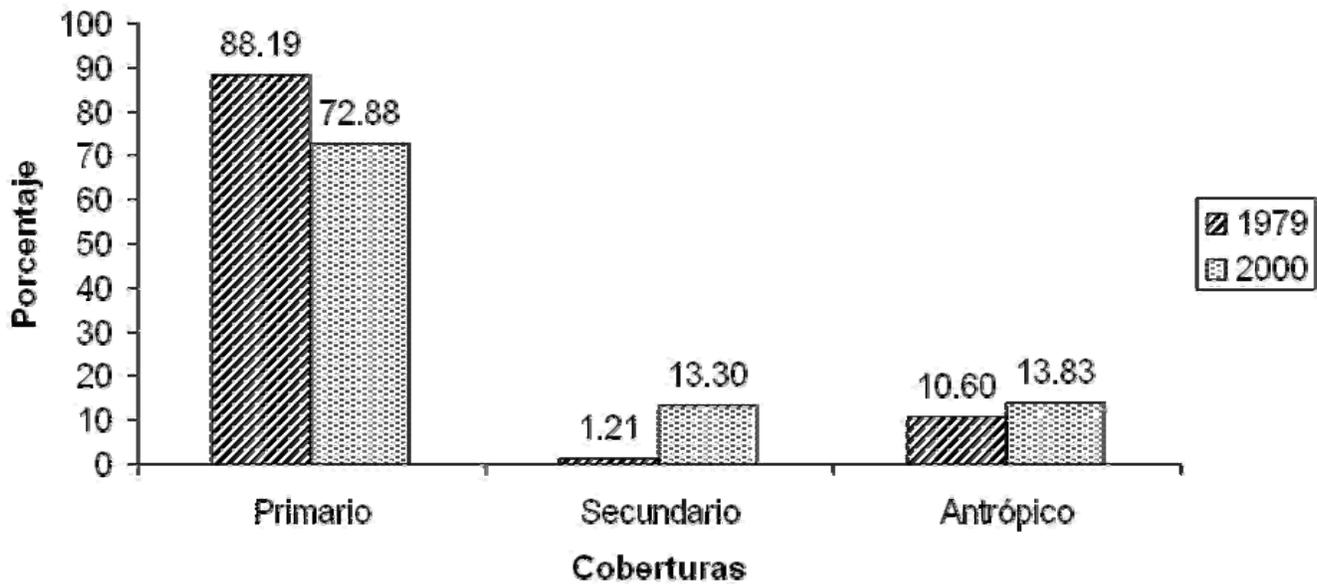


Figura 16. Porcentaje de coberturas de zonas de emisión de cuenca de 1979 y 2000

### 3.4.2 Zonas funcionales y procesos de cambio

Las zonas de cabecera presentaron fundamentalmente permanencias primarias con 112,130.55 ha, seguido de zonas con deforestación con 30,048.20 ha, alteración con 18,596.61 ha y una recuperación de 18,387.92 ha (Figura 17).

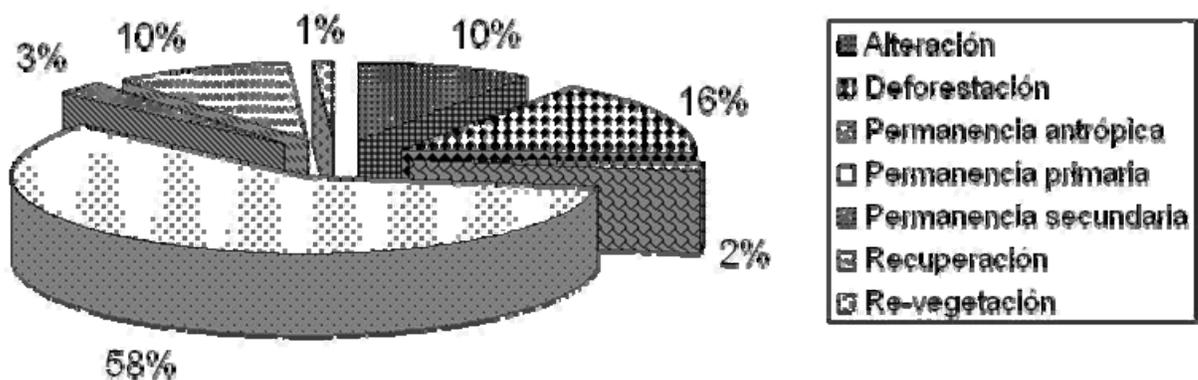


Figura 17. Porcentaje de coberturas de los procesos de cambio en zonas de cabecera.

Los procesos de cambio que se mostraron principalmente en las zonas de captación-transporte fueron los de permanencia primaria, con 38,100.07 ha,

seguidos de los procesos de alteración con 11,590.58 ha y los de deforestación con 11,039.13 ha (Figura 18).

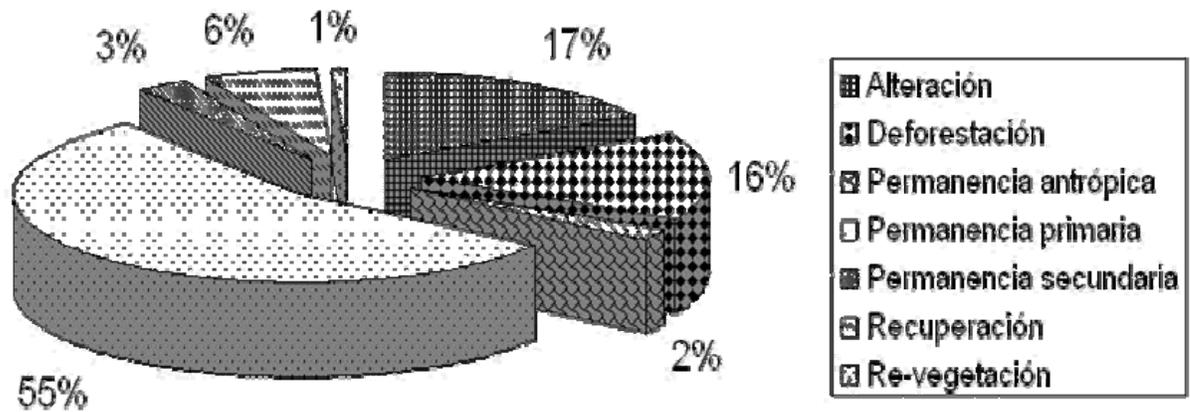


Figura 18. Porcentaje de coberturas de los procesos de cambio en zonas de captación-transporte.

Finalmente, las zonas de emisión contaban principalmente con los procesos de permanencia primaria con 29,375.16 ha y de alteración con 5,269.71 ha, siendo estos dos procesos los que ocupan poco mas del 80% del total de esta zona funcional (Figura 19).

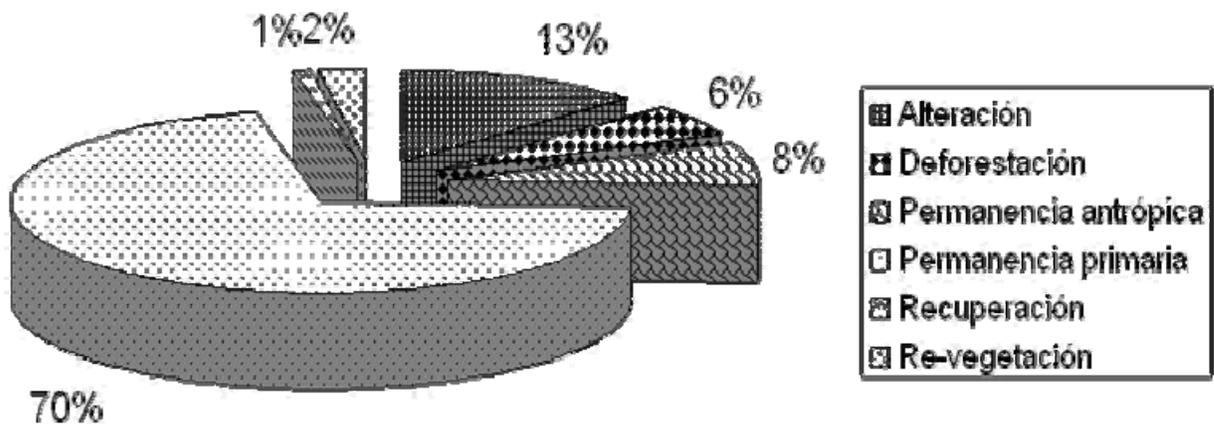


Figura 19. Porcentaje de coberturas de los procesos de cambio en zonas de emisión.

### 3.4.3 Zonas funcionales y zonas con aspectos hidrológicos

Las zonas de cabecera estuvieron conformadas en un 38.36% de permanencias positivas. Por otro lado, los cambios negativos abarcaron 18.82%, en tanto que las cambios positivos abarcaron 6.72%. Las zonas de captación-transporte estuvieron integradas en 12.76% de áreas con permanencias positivas, de 8.09% de cambios de coberturas con cambios negativos y los cambios positivos abarcaron 1.40%. Por último, las zonas de emisión estuvieron conformadas por 9.25% de permanencias positivas, de 3.52% de cambios negativos y 0.37% de zonas con cambios positivos (Tabla 8).

Tabla 6. Porcentaje de las zonas funcionales con respecto a las zonas con aspectos hidrológicos

| Zona Funcional                                       | Zonas para diversos aspectos hidrológicos |                     |                     | Total general por zona funcional % |
|--|---|---------------------|---------------------|------------------------------------|
|  | Permanencias positivas %                  | Cambios positivos % | Cambios negativos % |                                    |
|  | Cabecera                                  | 38.36               | 6.72                |                                    |
| Captación-transporte                                 | 12.76                                     | 1.40                | 8.09                | 22.25                              |
| Emisión  | 9.95                                      | 0.37                | 3.52                | 13.83                              |
| Total general de cambios o permanencias en la cuenca | 61.07                                     | 8.49                | 30.43               | 100                                |

## **4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

### **4.1 Análisis de cambios de coberturas y usos de suelo**

El estudio de la cuenca del río Copalita reflejó que en el año de 1979 contaba con coberturas primarias en un alto porcentaje y pocas zonas con actividad antrópica; sin embargo, el incremento de las zonas con coberturas secundarias facilitaba que las actividades antrópicas pudieran aumentar en la zona para los años subsecuentes. Para el año 2000 las coberturas primarias siguieron destacándose en la cuenca, aunque con respecto a 1979 éstas descendieron. Lo mismo ocurrió con las coberturas secundarias y los sitios con actividades antrópicas se incrementaron drásticamente. Sin embargo, para cada tipo de cobertura, y en particular las que son secundarias, no guardaron la misma posición geográfica que con la que contaban 21 años atrás. Las coberturas secundarias para el 2000 ocuparon principalmente la parte baja de la cuenca, lo que anteriormente eran coberturas primarias y las zonas que eran secundarias ahora son principalmente áreas de algún uso antrópico (ver Figuras 6 y 9).

Las actividades antrópicas en la cuenca están siendo un factor importante en el cambio de coberturas: por un lado, el decremento de las coberturas primarias a secundarias, especialmente en las zonas de selva baja y, por el otro, el de coberturas secundarias a antrópicas en las zonas de bosque de pino principalmente (ver Figuras 5 y 8)

De acuerdo con varios autores (Briassoulis, 2000; De Sherbinin, 2002; Geist y Lambin, 2002; Lambin *et al.*, 2001) son dos los factores que pueden desencadenar los procesos de cambio: los biofísicos y los socio-económicos. Los primeros son aquellos que ocurren de manera natural, como el paso del huracán Paulina en el año de 1997 que causó grandes daños en la zona. Los segundos están relacionados con factores antrópicos, como son las nuevas dimensiones de los asentamientos humanos, el crecimiento demográfico en la zona, las políticas

económicas y sociales que se han puesto en práctica a través de los años, entre otros. Además de estos factores sociales, De Sherbinin (2002) agrega que la triada “expansión agrícola-pastoril, extracción de madera e introducción de infraestructura” en los trópicos son los principales desencadenadores de diversos procesos de cambio, pero en particular el de deforestación. Estos procesos ocurren de cierta manera dentro de la cuenca del río Copalita, pues fueron observados durante las visitas realizadas a la zona de estudio. En la cuenca se pudo observar una importante extracción de madera, para ello, en muchas ocasiones operan programas de apoyo gubernamentales que favorecen éstas prácticas, como lo es el PROCYMAF para la zona. Éstos ejercicios están trayendo consigo la introducción de nuevas tecnologías, entre las que destacan: la introducción de maquinaria para la apertura de nuevos caminos, además de electrificación, servicios de salud y agua potable, entre otras, atrayendo familias y, con ello, consolidando la expansión de establecimientos humanos. A pesar de que dichos programas pueden ser de origen gubernamental, como el PROCYMAF, no necesariamente evitan que se realicen actividades tradicionales de alto impacto ambiental (CONAFOR, 2005; De Sherbinin, 2002; Lambin *et al.*, 2001). Lo vislumbrado en la cuenca, por lo tanto, parece coincidir con lo descrito por De Sherbinin (2002).

Las causantes principales que dirigen dichos cambios no fueron el objetivo del presente estudio; sin embargo, éste sienta las bases para que en un futuro puedan ser analizadas más a fondo. La distribución espacial de los diversos eventos que están ocurriendo en la cuenca pueden ayudar a identificar qué tan bien o mal se han llevado las políticas de desarrollo y el cuidado del ambiente en la zona.

Con el análisis de procesos de cambios se identificó que, a pesar de que se cuenta con una importante permanencia de cobertura primaria y, por consiguiente, un significativo grado de conservación, ésta está tendiendo a ser afectada por actividades antrópicas. Ello ha traído importantes procesos de deforestación y alteración, resultado principalmente de la actividad agrícola en áreas que en 1979

eran coberturas secundarias (sobresaliendo las áreas de bosque). Aunado a lo anterior, se está presentando una importante introducción de infraestructura en la parte baja de la cuenca (influenciado por la zona turística de la zona de costa) y de actividades forestales (especialmente de extracción de madera) en la parte alta de la misma, favoreciendo principalmente al proceso de alteración.

Es importante poner atención a estos tres principales procesos de cambio que se identificaron en la zona. Las áreas con permanencia primaria deben ser prioritarias en su conservación a través de programas que promuevan un uso adecuado, los cuales no comprometan de manera drástica el capital natural que en ellas se encuentran. Asimismo, se deben tomar acciones que lleven a una recuperación de aquellas áreas que estén con cierto grado de disturbio (áreas con procesos de alteración), ya que presentan grandes oportunidades de éxito de recuperación. Por último, es imperante detener el avance de la deforestación con prácticas de restauración de coberturas y planeación de uso de acuerdo con el sitio.

## **4.2. Cambios de cobertura y uso del suelo y servicios ambientales asociados con aspectos hidrológicos**

El presente estudio fue abordado desde la perspectiva de cuenca hidrográfica, es decir, desde un enfoque de morfología superficial, que a diferencia de una cuenca hidrológica, no toma en consideración toda la estructura hidrogeológica subterránea (INE, 2005; Lugo Hubp, 1989).

Siguiendo los criterios propuestos por PLADEYRA (2003), la cuenca fue dividida en tres zonas de funcionamiento hidrológico que responden a características fisiográficas: cabecera, captación-transporte y emisión (en este caso el agua es vertida hacia el mar). Esta aproximación, junto con el ACCUS, proporcionó una descripción del grado de salud y comportamiento que ha

presentado la cuenca en el lapso de dos décadas. Estas zonas funcionales hidrológicas no pueden ser ordenadas de mayor a menor importancia, ya que están estrechamente relacionadas para el buen funcionamiento hidrológico de la cuenca. Sin embargo, al analizarse por separado y a pesar de contar con un buen grado de conservación, cada una de ellas presentó variantes en los porcentajes de los procesos de cambio, principalmente en los relacionados a los procesos de deforestación y alteración.

#### **4.2.1 Zona de Cabecera**

La zona de cabecera en la cuenca del río Copalita es particular, ya que a comparación de otras cuencas, ocupa una gran extensión de ella (63.91%); en 1979 contaba con coberturas primarias (74.81%, mayoritariamente coberturas vegetales de bosques de pino, pino-encino y mesófilo de montaña, así como de selva alta-mediana y selva baja), con pocas coberturas secundarias (22.07%, localizados principalmente en las zonas de bosque) y un mínimo de actividades antrópicas (con tan sólo 3.12%). Dicha relación se modificó para el 2000: las coberturas primarias como las secundarias disminuyeron (69.38% y 13.21%, respectivamente), en tanto que las coberturas antrópicas se expandieron de manera importante en esta zona funcional (17.40%).

De acuerdo con la función de la zona de cabecera, esta extensión de la cuenca a grandes rasgos se considera como una zona importante reguladora de agua, ya que entre otras funciones, se encarga de la intercepción, condensación e infiltración del líquido producto de la precipitación. Sin embargo, cada una de las coberturas vegetales que la integran muestra diferentes características relacionadas con la forma en que el agua es integrada al sistema.

En general, y de acuerdo con lo descrito por Luce (2004), las comunidades de bosques primarios, y en menor medida los que se encuentran en fase secundaria, se caracterizan por mostrar un dosel extenso, una gran capa de

materia orgánica que cubre el suelo, proveniente principalmente de la caída de las hojas (que además contribuye al reciclaje de nutrientes) y de un enorme sistema radicular. Éste último se caracteriza por presentar un diámetro considerable y de extenderse a capas de suelo profundo, contribuyendo a que se forme una extensa red de poros en el suelo. Éste autor, por otro lado, argumenta también que el agua de lluvia que llega al suelo lo logra ya sea de manera directa o por goteo. La primera ocurre cuando la vegetación no impide que las gotas alcancen directamente el suelo, en tanto que para la segunda ocurre lo contrario, las hojas interceptan la lluvia provocando que esta llegue a su parte basal por escurrimiento caulinar.

Franzluebbers (2002) argumenta que una vez que el agua llega al suelo, ésta se filtra principalmente, ayudada por la porosidad del suelo que es favorecida por la vegetación. Sin embargo, y de acuerdo con la FAO (2003b) y Luce (2004), el agua que no se logra infiltrar escurre hacia zonas más bajas y la falta de infiltración obedece a que la tasa de precipitación es mayor que la de infiltración.

Un caso particular es muy probable que ocurra con los bosques mesófilos de montaña, los cuales se ubicaron en zonas con ciertas características fisiográficas, climáticas y con una cobertura vegetal particular. De acuerdo con Aldrich y Hostettler (2000) y Bubb *et al.*, (2004) estos bosques tienen una alta humedad relativa en el sistema que forma nubosidad, por lo que, además de llevar a cabo las funciones mencionado por los demás bosques, la vegetación residente tiene la capacidad de condensar la casi permanente neblina, fortaleciendo el ingreso de agua en la zona. Estos autores además sugieren que, como resultado de que las plantas presenten una baja evapotranspiración, hay una importante condensación y una constante infiltración. Sin embargo, y de acuerdo con Bruijnzeel (2001) y Zhang *et al.*, (2001), el excedente del líquido satura el suelo y genera flujos de agua superficial, los cuales se mantienen casi de manera permanente y constantes en el medio.

En el caso de las zonas de cabecera, los bosques tanto de pino, pino-encino y mesófilo de montaña, ocupaban una amplia extensión en 1979, la cual se redujo considerablemente para el año 2000. Estos cambios, muy probablemente por lo descrito previamente, traen consigo una significativa repercusión en la regulación de agua en la zona, entre otros la infiltración, la calidad, la cantidad y la temporalidad. Un caso particular ocurrió con los bosques mesófilos de montaña, los cuales disminuyeron drásticamente en el transcurso de dos décadas, lo que conlleva efectos negativos significativos en el sistema por ser considerados los principales captadores y proveedores de agua, en especial en la temporada de estiaje.

Por otro lado, se localizaron selvas altas y medianas en la zona de cabecera, las cuales en condiciones primarias presentaron una ligera recuperación de 1979 a 2000. Las primeras se caracterizan por presentar una constante precipitación y encontrarse siempre verdes, en tanto que las segundas se encuentran en sitios que sufren sequía de 3 a 5 meses, temporada en la que algunas plantas tiran sus hojas (Rzedowski 1978). De acuerdo con lo reportado por Vega (2005) para sitios con vegetación similares a éstas, estas características hacen probable que el dosel de este tipo de comunidades vegetales permita tener una importante asistencia en la intercepción de la lluvia, que al igual que los bosques, disminuya el impacto directo de las gotas de agua al suelo, favoreciendo el goteo o escurrimiento hacia él por las plantas. Además, él agrega que las selvas altas, y especialmente las medianas, no se encuentran en un substrato determinado, aunque generalmente se localizan en suelos someros, pedregosos, en donde muchas de las plantas presentan raíces adventicias, son características que le confieren una menor infiltración y un drenaje superficial rápido. Por lo tanto, este autor concluye que son zonas principalmente recolectoras y alimentadoras de agua superficial. Esto es altamente probable que ocurra en la cuenca, y en especial en esta zona de cabecera, ya que estas coberturas de vegetación se encuentran aún en un alto porcentaje de buen estado conservación.

Por último, la parte baja de la zona de cabecera está integrada por selvas bajas caducifolias, las cuales disminuyeron en un porcentaje bajo. Sin embargo, es notoria entre éstas la aparición de la fase secundaria en 2000, la cual en 1979 no estaba reportada. De acuerdo con Rzedowski (1978) éste tipo de comunidad se caracteriza por presentar una temporada de secas muy marcada que oscila generalmente alrededor de seis meses, época en la cual la vegetación pierde sus hojas. Éstas selvas habitualmente se encuentran en suelos someros pedregosos, localizados sobre laderas de cerros o lomeríos (Rzedowski, 1978). Es posible que éstas selvas compartan características con la vegetación de la selva en Chamela, Jalisco, las cuales han sido descritas en un trabajo por Vegas-Vilarrubia *et al.* (1994). De acuerdo con éste último trabajo, la vegetación cuenta con raíces aproximadamente de 5 mm de diámetro y que van de 0 a 20 cm de profundidad en el suelo, dando como resultado que cuando se presenta una lluvia la infiltración es casi nula, se da una alta absorción del líquido por parte de las plantas, se presenta una alta evaporación y se favorece la captación de agua superficial en la época de lluvia. Por lo tanto es muy factible que las selvas bajas en la cuenca del río Copalita también jueguen un papel muy importante en la regulación en la provisión de agua superficial durante la época de lluvias.

Así, la zona de cabecera de la cuenca del río Copalita conformada primordialmente por formaciones de vegetación bosques y selvas, es la que, y de acuerdo con las probables semejanzas que estas puedan tener con las vegetaciones de otros sitios reportados en los trabajos arriba mencionados, proporciona el servicio ambiental de regulación hídrica. Si esto se cumple de acuerdo con lo anterior, se lleva a cabo en la forma en que suministra el líquido a los mantos freáticos por infiltración, a los cauces superficiales por escorrentía y por ende, a la calidad, la cantidad y la temporalidad que el agua pueda tener, tanto en la subterránea (preponderantemente en las zonas de bosques) como la superficial (principalmente en las zonas de selvas).

Es así que, si bien se preservan mayoritariamente coberturas primarias en esta zona de cabecera, los cambios de coberturas y usos del suelo inducidos por

el ser humano, están afectando de manera negativa al servicio ambiental de regulación hídrica. Estos cambios son evidentes en la modificación de coberturas hacia actividades antrópicas, en el incremento de la deforestación por el aumento de la agricultura de temporal e introducción de pastizales inducidos y por modificación de coberturas primarias hacia coberturas secundarias (alteración).

#### ***4.2.2 Zona de captación - transporte***

La zona de captación-transporte está relacionada con los escurrimientos de agua hacia la desembocadura de la cuenca. Esta zona funcional hidrológica prácticamente recorre toda la cuenca y está estrechamente relacionada con la vegetación riparia. Este tipo de vegetación presenta un rol importante en la estructura, la amplitud y el manejo de los cauces fluviales de la cuenca (Broadmeadow y Nisbet, 2004; PLADEYRA, 2003). En general, estas áreas sufren una fuerte influencia antrópica por su accesibilidad al agua potable, colocándose alrededor de ellas zonas industriales, agrícolas y asentamientos humanos (Broadmeadow y Nisbet, 2004; Klapproth y Johnson, 2000).

La zona de captación-transporte, al igual que la de cabecera, en su mayoría posee aún con coberturas de permanencias primarias (55%), pero ahí se presenta un fuerte proceso de deforestación (16%). Sin embargo, además se está presentando el proceso de alteración (17%), que junto con el de deforestación, está estrechamente relacionado principalmente con la transformación para zonas agrícolas, actividad que se ha incrementado en la cuenca del río Copalita en el lapso de 21 años.

De acuerdo con los trabajos de Broadmeadow y Nisbet (2004), Klapproth y Jonson (2000) y a la SCWD (2006), señalan que las coberturas vegetales riparias sirven de filtro para las partículas procedentes de las zonas colindantes, ya que las raíces de los árboles y la vegetación herbácea de los márgenes las interceptan.

Estos trabajos mencionan que la vegetación estabiliza el flujo del líquido, la velocidad con la que éste viaja, ayuda a mantener una baja temperatura por la sombra que le proporciona y regula el flujo de sedimentos y nutrientes, controla la erosión de suelo y en las áreas con las condiciones necesarias ayuda a la infiltración del agua. Los autores arriba mencionados, complementan señalando que el agua que llega y transporta es un indicador de los procesos que se están llevando a cabo en la zona de cabecera. Además, en ella se pueden cuantificar sedimentos y materia orgánica que recauda en su trayecto, determinando la calidad del líquido.

Es probable que la vegetación que se encuentra en las zonas de captación-transporte actúe de manera similar como lo hacen las zonas ribereñas. Dada sus semejanzas, se puede decir que esta zona funcional es un sistema importante para los habitantes de la región de la cuenca, ya que es muy factible que preste un servicio principal de provisión de agua potable, además de regular el flujo de nutrimentos y sedimentos, de mantener una temperatura constante y de funcionar como un filtro ante contaminantes de las zonas funcionales contiguas.

### ***4.2.3 Zona de emisión***

Para el año 1979, la zona de emisión presentaba coberturas primarias en casi toda su extensión (88.19%), muy pocas con coberturas secundarias (1.21%) y había una proporción importante de coberturas antrópicas (10.60%). Para el año 2000 dicha relación se modificó al descender las coberturas primarias (72.88%), aumentar las coberturas antrópicas (13.83%) y crecer de manera importante las coberturas secundarias (13.30%).

En un estudio realizado en la región de Chamela, Jalisco, México, en la que la vegetación es una selva baja caducifolia, señalan que ésta cumple con la función de dar un servicio ambiental de regulación, al mantener un clima constante, la fertilidad del suelo, bio-regulación, control de flujos, inundaciones y

arrastre de diversos materiales por causa de la escorrentía de agua durante las precipitaciones y eventos extraordinarios como huracanes (Mass *et al.*2005).

La zona de emisión de la cuenca del río Copalita está conformada principalmente este tipo de vegetación, por lo que es sumamente factible que lo reportado por estos investigadores se esté llevando de la misma manera, o de manera muy similar. Si es así, se puede considerar que estos servicios ambientales se están ofreciendo de manera adecuada dentro de la cuenca, ya que cuenta con coberturas de permanencias primarias en casi tres cuartas partes de su extensión. No obstante, en comparación con las zonas de cabecera y de captación-transporte, esta área se está viendo afectada por el aumento significativo de coberturas secundarias y con un incremento gradual de asentamientos humanos, principalmente por el desarrollo de zonas turísticas influenciadas por la cercanía a la playa, lo que pone en evidencia un importante proceso de alteración (13%). Estos últimos dos factores podrían afectar en un futuro la economía del área al perderse la belleza escénica, al incrementarse la escorrentía, los sedimentos por arrastre y mantenerse en suspensión en el agua, los cuales podrían acumularse en la desembocaduras de los ríos y dar un aspecto poco agradable; además, podría fomentar la presencia de tolveneras por la remoción de la cobertura vegetal, la desaparición de pozos de agua potable por compactación del suelo y la salinización de este último por la infiltración de agua de mar producto de la extracción irracional de grandes cantidades de agua potable del subsuelo, entre otros más.

Asimismo, esta zona de emisión es la beneficiaria del servicio de regulación y provisión que prestan las otras dos zonas funcionales. Esto se lo logra ya que ofrece el servicio por excelencia de provisión de agua potable por dos vías, la proveniente de la que escurre superficialmente, la cual se concentra en un cauce principal al contar con pocos escurrimientos naturales, y de la subterránea, proveniente de los mantos freáticos que generalmente es obtenida a través de pozos.

#### **4.2.4 Cuenca completa**

En general, la cuenca completa cuenta con las condiciones necesarias para prestar el servicio ambiental de soporte del ciclo hidrológico. Si bien en este trabajo nunca fue el objetivo llegar a medir éstos, sí reflejó que se ven favorecidos por la presencia de una amplia zona de cabecera (63.91% de extensión de total de la cuenca), en la cual muy probablemente se presenta un mayor suministro de agua, mediante los procesos que integran la circulación global hidrológica: evaporación, infiltración, transpiración, percolación, recarga de agua subterránea, inter-flujo y descarga de agua subterránea hacia la superficie terrestre.

Otro aspecto que favorece la conservación satisfactoria del ciclo hidrológico es que la cuenca mantiene coberturas primarias en la mayor parte de su extensión. Sin embargo, en el lapso de 21 años estas comunidades vegetales primarias han cambiado hacia coberturas de agricultura de temporal y de humedad, pastizales inducidos y asentamientos humanos, fundamentalmente, los cuales han desencadenado que haya un importante proceso de alteración en la zona de emisión y de deforestación en la zona de cabecera. Por lo tanto, si estas tendencias negativas continúan, el ciclo hidrológico se verá afectado, alterando los servicios de corte hidrológico que ofrece hacia los distintos actores sociales que la habitan y del cual obtienen múltiples beneficios. Esto se verá reflejado principalmente en la zona de emisión, ya que es en ésta, como se mencionó anteriormente, en donde se observarán los resultados de los diversos procesos que se tuvieron lugar en las otras dos zonas funcionales.

### **4.3. Incentivos y pago de servicios ambientales como fuente de conservación del capital natural**

Ante la problemática ambiental que se percibe a mayor detalle en las últimas tres décadas, surge la preocupación por mantener los servicios ambientales, los cuales son aceptados actualmente como piezas fundamentales para el desarrollo de las sociedades humana y para su supervivencia. En muchos casos, difícilmente podría recuperarse la mayoría de los beneficios que se obtienen de ellos si se perdieran, y el intento de producirlos por medios tecnológicos tendría un costo económico enorme. Justamente desde esta perspectiva hoy en día se les pone más atención conforme aumenta la problemática ambiental, en la que se ven afectados los servicios y se percibe una escasez de ellos, lo que está provocando esfuerzos en revertir esos cambios negativos (Merino, 2005).

Sin embargo y a pesar de que se percibe la problemática, los servicios ambientales todavía no son reconocidos en la economía de mercado, no reciben la atención y cuidado que requieren. Por lo general, los que gozan de los beneficios que generan los servicios ambientales se encuentran más allá del ámbito local y en ocasiones, del regional (Holling, 2001; Merino P., 2005). Es así que en los procesos de deterioro reportados en varias regiones del planeta, influye de manera importante la ausencia de incentivo a los dueños de la preservación de las regiones generadoras de servicios, prioritariamente de las forestales (Limburg *et al.*, 2002). Varios investigadores han propuesto realizar el pago por el uso de los servicios ambientales. Así, se ha planteado la creación de una nueva categoría de uso de suelo, en la que se reconozca a las personas que se encargan del manejo de estas áreas, otorgándoles derechos de propiedad sobre ellos y dándoles así un primer “activo” de percepción económica del servicio que mantienen en uso (Limburg *et al.*, 2002).

La creación de mercados de pago por servicios ambientales requiere de un desarrollo de esquemas institucionales que permitan la transparencia en la gestión

de ellos. Esta actividad pretende una eficiencia en el logro de objetivos que favorezca la investigación de los procesos que se llevan a cabo en el medio ambiente y la evaluación de acuerdo con la escala en que están trabajando. (Limburg *et al.*, 2002). Ejemplo de esto se encuentra en lo realizado por la Empresa de Servicios Públicos en Heredia, Costa Rica (ESPH S.A.) (Cordero y Castro, 2001). A grandes rasgos, ésta agregó a la tarifa del agua potable de los consumidores de la ciudad, el cobro de un porcentaje del valor económico del servicio de producción de agua que ofrece los bosques a la sociedad, además del costo ambiental requerido para recuperar y conservar las fuentes de agua potable.

En la cuenca del río Copalita la aproximación del análisis de las áreas con potencial de servicios ambientales de corte hidrológico fue mediante el cambio de coberturas y uso del suelo de 1979 a 2000. Si bien son muchos más los factores que intervienen para que éstos se logren, las coberturas vegetales son uno de los factores más importantes para que este tipo de servicios se lleven a cabo. Se detectó que en general la cuenca tiene un extensión de 61.46% del total del área de coberturas que permanecieron como primarias; aunado a ello, 8.35% de los cambios de coberturas de 1979 a 2000 fueron positivos, lo que indica que 70% de la cuenca hoy en día presenta las condiciones óptimas para que los diferentes servicios hidrológicos se lleven a cabo, por lo que los diferentes pobladores que habitan el área cuentan con servicios hidrológicos de buena calidad. Sin embargo, el restante 30% correspondiente a los cambios negativos no favorece que los diferentes servicios hidrológicos sigan existiendo. En estas últimas zonas se tiene que poner atención y evitar que se sigan extendiendo, ya que su crecimiento disminuirá la calidad de los servicios ambientales y el costo económico se incrementará ante la necesidad de querer recuperarlos conforme éste se deteriore.

Por ejemplo, el servicio ambiental de agua potable es producido por la zona de cabecera y su uso es llevado a cabo primordialmente en la zona de emisión (particularmente por la zona turística), zona en la cual depende absolutamente de lo que ocurra en la parte alta de la cuenca, que es la que le suministra el líquido. Por otro lado, esta misma zona de emisión obtiene su belleza escénica al no

presentarse inundaciones, deslaves o arrastres de material, el cual pudiera quedar depositado en los cuerpos de agua que se encuentran en esta zona. Esto último se logra gracias a que la vegetación, tanto de cabecera como la de captación-transporte, impide que estos elementos lleguen, ya que la presencia de estas coberturas naturales disminuye la erosión, regula el flujo de agua y sirve de filtro para los materiales que son arrastrados por la escorrentía. Estos dos ejemplos demuestran que es necesario crear programas de concientización acerca de los bienes que se obtienen al mantener lo más saludable posible el estado fundamentalmente primario de la cuenca. Es preciso instituir programas de estímulos que vayan encaminados a promover actividades en la que los propietarios de las tierras productoras de los servicios se vean beneficiados de algún modo. Éstas deben desarrollar actividades sostenibles que dañen lo menos posible el ambiente, mientras que los consumidores sean capaces de reflexionar sobre los beneficios que obtienen y costeen los programas para que sigan obteniendo una igual o mejor calidad de los servicios que reciben.

Ante esto se hace necesaria la realización de estudios holísticos que nos ofrezcan una integración de las ciencias naturales y las sociales. Éstos deben promover la evaluación y orientar la toma de decisiones adecuadas para resolver los crecientes problemas de deterioro ambiental que se están presentando en nuestro país.

He *et al.* (2000) recomiendan seleccionar indicadores naturales con características especiales, al igual que factores sociales, que tengan una capacidad de respuesta rápida, de fácil monitoreo y de bajos costos económicos. Éstos deben ser integrados, monitoreados y debe ser factible registrar sus cambios en el tiempo y el espacio, con la ayuda de herramientas que conjunten esta información, tal y como lo pueden ser los sistemas de información geográfica. Estas herramientas deben auxiliar a desarrollar una serie de decisiones informadas, dentro de una realidad y situación determinada. Sus resultados deben dar la base para la integración de los actores sociales, de modo que éstos puedan

participar de una manera activa, ayudando a resolver los problemas ambientales que enfrenta el país y a que ellos salgan adelante.

El presente estudio detalla e identifica geográficamente procesos de cambio en el lapso de 21 años y zonas con potencial de servicios ambientales de corte hidrológico. Esto se logró gracias a la integración de factores bióticos-sociales como las coberturas y los usos del suelo, además de factores como la topografía, el clima y la red hidrológica. La información reportada en este trabajo no se contrapone a las diversas investigaciones realizadas anteriormente, tanto de índole social como ambiental, sino más bien es un componente adicional que ayudará a obtener resultados mejores y más comprensibles. El presente estudio es una muestra tangible de lo mencionado por He *et al.* (2000), ya que este trabajo puede ayudar a tomar decisiones mejor informadas al tener ubicadas zonas físicamente con algún tipo de conflicto, con perspectivas de desarrollo, recuperación o áreas de conservación. Esto se verá reflejado en una realidad y situación específica y en la que los actores sociales podrán identificar claramente las acciones a seguir de acuerdo con las características de los diversos paisajes que integran la cuenca.

## 5. LITERATURA CITADA

- Aldrich, M., y Hostettler, S. (2000). *Tropical montane cloud forests*. Cambridge: WWF International/IUCN.
- Arnold, D. (2000). *La naturaleza como problema histórico* (1 ed.). México, D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- Arriaga C., L., Espinoza-Rodríguez, J. M., Aguilar-Zuñiga, C., Martínez-Romero, E., Gómez-Mendoza, L., y Loa Lozar, E. (Eds.). (2000). *Regiones terrestres prioritarias de México* (1 ed.). México, D.F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Briassoulis, H. (2000). *Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches* (1 ed.). Lesvos, Grecia: University of the Aegean.
- Broadmeadow, S., y Nisbet, T. R. (2004). The effects of riparian forest management on the freshwater environment: a literature review of best management practice. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(9), 286-305.
- Bruijnzeel, L. A. (2001). Hydrology of tropical montane cloud forest: a reassessment. *Land Use and Water Resources Research*, 1(1), pp 1-18.
- Brundtland, G. H. (1990). *Salud Mundial*. Revista Ilustrada de la Organización Mundial de la Salud. Enero-Febrero de 1990, pp 4
- Bruner, A. G., Gullison, R. E., Rice, R. E., y D´Fonseca, G. A. B. (2001). Effectiveness of Parks in Protecting Tropical Biodiversity. *Science*, 291(5501), 125-128.
- Bubb, P., May, I., Miles, L., y Sayer, J. (2004). *Cloud forest agenda*. Cambridge, UK.: UNEP-WCMC.

- Cernea, M. M., y Schmidt-Soltau, K. (2006). Poverty Risks and National Parks: Policy Issues in Conservation and Resettlement. *World Development*, 34(10), 1808-1830.
- CONAFOR. (2005). Programa de desarrollo forestal comunitario: PROCYMAF II. 2006
- Cordero, D. (2004). *Pagos por Servicios Ambientales (PSA) para la conservación del recurso hídrico*. Paper presented at the Curso internacional desarrollo de proyectos de reforestación y de bioenergéticabajo el mecanismo de desarrollo limpio (MDL), Tabacundo, Ecuador.
- Cordero, D., y Castro, E. (2001). Pago por servicio ambiental hídrico. *Revista forestal Centroamericana*(Octubre-Diciembre), 41-45.
- Costanza, R., D'Arge, R., De Groot, R., Farer, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Ñame, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., y Van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 15, 253-260.
- Challenger, A. (1998). *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México*. México, D.F.: CONABIO.
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección ambiental* (1 ed.). Barcelona, España: Ariel.
- Daily, G. C. (Ed.). (1997). *Nature's services*. Washington, DC.: Island Press.
- Dale, V. H., Fortes, D. T., y Ashwood, T. L. (2002). A landscape-transition matrix approach for land management. en J. Liu y W. W. Taylor (Eds.), *Integrating landscape ecology into natural resource management* (pp. 265-293). Cambridge: Cambridge University Press.
- De Sherbinin, A. (2002). *CIESIN Thematic Guide to Land-Use and Land-Cover Change (LUCC)* (1 ed.). New York, USA: Columbia University.

- Esnaola, M. F. (2006). Relaciones internacionales en el cambio climático. de <http://www.monografias.com/trabajos27/relaciones-internacionales/relaciones-internacionales.shtml>
- FAO. (1996). *Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes*. (No. 130). Roma: FAO.
- FAO. (2003a). *Payment schemes for environmental services in watersheds*. Arequipa: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2003b). *State of the world's forests* (1 ed.). Rome, Italy: FAO.
- Foley, J. A., Defries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, R. S., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., y Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309, 570-574.
- Folke, C. (1998). Ecosystem approaches to the management and allocation of critical resources. en P. M. Groffman y M. L. Pace (Eds.), *Successes, limitations and frontiers in ecosystem science* (pp. 313-354). New York: Institute of ecosystem studies and springer-Verlagi.
- Franzluebbers, A. J. (2002). Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil and tillage research*, 66, 197-205.
- Geist, H. J., y Lambin, E. F. (2002). Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience*, 52(2), 143-150.
- GRAIN. (2005). Hacia la privatización total del planeta. 2006, de [http://www.redtercermundo.org.uy/texto\\_completo.php?id=2854](http://www.redtercermundo.org.uy/texto_completo.php?id=2854)
- Guevara, S. A. (2005). Política ambiental en México: génesis, desarrollo y perspectivas. *Boletín económico*(821), 163-175.

- GWP. (2003). *Water management and ecosystems: living with change*. Estocolmo.
- He, C., Malcolm, S. B., Dahlberg, K. A., y Fu, B. (2000). A conceptual framework for integrating hydrological and biological indicators into watershed management. *Landscape and urban planning*, 49, 25-34.
- Heistermann, M., Müller, C., y Ronneberger, K. (2006). Land in sight? Achievements, deficits and potentials of continental to global scale land-use modeling. *Agriculture, ecosystems and environment*, 114, 141-158.
- Holling, C. S. (2001). Understanding the complexity of economic, ecological and social systems. *Ecosystems*, 4, 390-405.
- INE. (2005). Conceptos. de <http://www.ine.gob.mx/dgoece/cuencas/conceptos.html>
- Isch, E. El derecho al agua y dilema de los servicios ambientales. Quito: Camaren, Foro de Recursos Hídricos, 2004.
- Jansen, L. J. M., y DiGregorio, A. (2002). Parametric land cover and land-use classifications as tool for environmental change detection. *Agriculture, ecosystems & environment*, 91, 89-100.
- Klapproth, J. C., y Johnson, J. E. (2000). Understanding the science behind riparian forest buffers: an overview. *Forestry*, 420(150).
- Lambin, E. F., Turner, B. I., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P. S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E. F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P. S., Richards, J. F., Skanes, H., Steffen, W., Stone, G. D., Svedin, U., Veldkamp, T. A., Vogel, C., y Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11, 261-269.

Limburg, K. E., O'Neill, R., Costanza, R., y Farber, S. (2002). Complex systems and valuation. *Ecological economics*, 41, 409-420.

Luce, C. H. (2004). Forest and wetlands. en A. D. Ward y W. J. Elliot (Eds.), *Environmental Hydrology* (2 ed., pp. 448). USA. Florida: Lewis.

Lugo Hubp, J. (1989). *Diccionario geomorfológico* (1 ed.). México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.

Maass, J. M., 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., y Sarukhán, J. (2005). Ecosystem services of tropical dry forests: insights from longterm ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and Society*, 10(1), 17.

Masera, O., Ordóñez, M. J., y Dirzo, R. (1997). Carbon emission from Mexican forest: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change*, 35, 265-295.

Merino P., L. (2005). El desarrollo institucional de esquemas de pago por servicios ambientales. *Gaceta Ecológica*(74), 29-42.

Myers, J. P., y Reichert, J. S. (1997). Perspectives on nature's services. en G. C. Daily (Ed.), *Nature's services* (pp. 392). Washington, DC.: Island Press.

O.M.C. (2004). Comercio y medio ambiente.

[http://www.wto.org/spanish/tratop\\_s/envir\\_s/hist1\\_s.htm#Top](http://www.wto.org/spanish/tratop_s/envir_s/hist1_s.htm#Top)

Odum, E. P. (1971). *Ecología* (3 ed.). México, D.F.: Interamericana.

Palacio-Prieto, J. L., Bocco, G., Velázquez, A., Mas, J. F., Takaki-Takaki, F., Victoria, A., Luna- González, L., Gómez- Rodríguez, G., López-García, J., Palma Muñoz, M., Trejo-Vázquez, I., Peralta Higadera, A., Prado-Molina, J., Rodríguez-Aguilar, A., Rafael, M.-S., y Gonzáles M., F. (2000). La condición actual de los

recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000. *Investigaciones Geográficas*(43), 183-203.

Palacio P., J.-L., Bocco V., G., Velázquez M., A., y Mas C., J. F. (2000). *Inventario Forestal Nacional 2000-2001*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.

Parker, D. C., Berger, T., y Manson, S. M. (Eds.). (2001). *Agent-based models of land-use and land-use change*. California, USA: Anthropological center for training and research on global environmental change.

Pérez M., O., Delfín, C., Fragoso, A., y Cotler, H. (2006). Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. *Gaceta Ecológica*, 78, 65-84.

PLADEYRA, S. C. (2003). *Estudio de paisajes hidrológicos y balance hídrico de la cuenca Lerma-Chapala II. Paisaje hidrológicos y balance hídrico*. México, D. F.: INE.

Ramamoorthy, T. P., Bye, R., Lot, A., y Fa, J. (Eds.). (1998). *Diversidad Biológica de México. Orígenes y Distribución* (1 ed.). México, D.F.: Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Ramírez Santiago, G. (2002). *Evaluación del cambio de uso del suelo y la vegetación en el estado de Oaxaca mediante métodos de percepción remota*. México, D.F. Instituto Politécnico Nacional,

Rueda, S. (2006). Los principios de la sostenibilidad. 2006, de [http://www.bcnecologia.net/index.php?option=com\\_content&task=view&id=105&Itemid=52&lang=CA](http://www.bcnecologia.net/index.php?option=com_content&task=view&id=105&Itemid=52&lang=CA)

Rutledge, D. T., y Lepczyk, C. A. (2002). Landscape change: patterns, effects, and implications for adaptive management of wildlife resources. en J. Liu y W. W.

Taylor (Eds.), *Integrating landscape ecology into natural resource management* (pp. 312-332). Cambridge: Cambridge University Press.

Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. México, D.F.: Limusa.

Simonian, L. (1999). Medio Ambiente y políticas públicas en México (1980-1993). *Gaceta Ecológica*(53), 15-33.

SWCD. (2006). Establishing a riparian buffer. 2006, de [http://www.yamhillswcd.org/tech\\_info/riparianbuffer.pdf](http://www.yamhillswcd.org/tech_info/riparianbuffer.pdf)

Vega M., A. (2005). *Plan de conservación para la reserva de la biosfera pantanos de Centla y el área de protección de flora y fauna Laguna de Términos*. Yucatan, México: Nature Conservancy, The (TNC), Regional; Pronatura.

Vegas-Vilarrubia, T., Maass, J. M., Rull, V., Elias, V., Coelho Ovalle, A. R., López, D., Schneider, G., Depetris, P. J., y Douglas, I. (1994). Small catchment studies in the tropical zone. en B. Moldan y J. Cerny (Eds.), *Biogeochemistry of small catchments: a tool for environmental research* (pp. 432). Wiley, U.K.: Wiley.

Velázquez, A., Bocco, G., Romero, F. J., y Pérez V., A. (2003). A landscape perspective on biodiversity conservation. *Mountain research and development*, 23(3), 240-246.

Velázquez, A., Mas, J.-F., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P. C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E., y Palacio, J.-L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, 62, 21-37.

Velázquez, A., y Romero, F. J. (Eds.). (1999). *Biodiversidad de la región de montaña del sur de la cuenca de México*. México, D. F.: Universidad Autónoma Metropolitana.

- Veldkamp, A., y Lambin, E. F. (2001). Predicting land-use change. *Agriculture, ecosystems and environment*, 85, 1-6.
- Veldkamp, A., y Verburg, P. H. (2004). Modelling land use change and environmental impact. *Journal of environmental management*, 72, 1-3.
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J., y Melillo, J. M. (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277, 494-499.
- Watson, R. T., y Zakri , A. H. (Eds.). (2003). *Ecosystems and human well-being. Millennium Ecosystem Assessment*. Washington, DC.: Island Press.
- Zhang, L., Dawes, W. R., y Walker, G. R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water resources research*, 37(3), 701-708.

## ANEXO 1

Diccionario de coberturas y usos del suelo para el año 2000 en la cuenca del río Copalita, Oaxaca, México.

### COBERTURAS Y USOS DEL SUELO PARA EL 2000 EN LA CUENCA DEL RÍO COPALITA, OAXACA, MÉXICO

|                              |  |   |
|------------------------------|--|---|
| Cultivos                     | Superficies en el que el suelo es utilizado para la siembra de cultivos agrícolas primordialmente. | <i>Agricultura de humedad:</i> Estos cultivos aprovechan la humedad residual del suelo, la cual es beneficiada por su cercanía a corrientes permanentes de agua y ubicándose primordialmente en la parte baja de la cuenca, dotando principalmente a la zona de árboles frutales.                                     |
|                              |  | <i>Agricultura de temporal con cultivos anuales:</i> Este tipo de cultivo depende del agua que se precipita en forma de lluvia, extendiéndose por toda la cuenca y localizándose cultivos primordialmente de maíz.  |
| Área sin vegetación aparente | Fisonomía  | Área en la cual la vegetación es excesivamente escasa, en la que se observa afloramientos de rocas.   |
|                              | Estructura   | La poca vegetación existente es herbácea  |
| Asentamiento humano          | Fisonomía  | Zonas en las cuales se encuentran edificadas, urbanas y suburbanas, las cuales principalmente fueron diseñadas para el sector turístico. En el interior de la cuenca se localizan más establecimientos humanos, ocupando pequeñas extensiones no identificables a la escala en la que se trabajó pero constantes a lo |

|                  |            |   |
|------------------|------------|---|
|                  |            | largo de toda la cuenca   |
| Bosque de encino | Fisonomía  | Es una comunidad muy variable, la cual cuenta con árboles de hojas latifoliadas, gruesas y duras. Los árboles de esta comunidad son ramificados y con copas densas, con troncos en su mayoría rectos. El dosel forma un bosque cerrado.   |
|                  | Fenología  | En su mayoría, los encinares son deciduos en épocas de secas, sin embargo, los presentes en la cuenca son tendientes a presentar un carácter perennifolio   |
|                  | Estructura | Presenta árboles que oscilan de 10 a 30 m aproximadamente, y a pesar de que cuenta con una buena cobertura arbórea, empieza a presentarse señales de extracción de madera para su uso comercial.  |
| Bosque de pino   | Fisonomía  | Comunidades arbóreas de troncos generalmente rectos, con copas visualmente características por su forma semiesférica. Se encontraron tanto en la zona tropical (parte baja de la cuenca) como en la templada (parte alta de la cuenca).   |
|                  | Fenología  | Perennifolio  |
|                  | Estructura | En su fase primaria se encontraron tanto en condiciones cerradas como, en la mayoría de las ocasiones, con un aspecto moderadamente abierto, en la que en algunos lugares se observaba una tendencia hacia el manejo de estos bosques. En |

|                            |            |  |
|----------------------------|------------|--|
|                            |            | esta fase, por lo general no se encontraban asociadas con otras especies vegetales. En condiciones secundarias, hay una tendencia a la deforestación, cambio de cobertura arbolada hacia pastizales inducidos o agricultura de temporal, denotando una falta de planeación en estos lugares. |
| Bosque de pino-encino      | Fisonomía  | Mezcla de árboles aciculifolios y latifoliados, en los cuales los segundos muestran gran ramificación desde muy debajo de su tronco, en tanto que los primeros son mas rectos y menos ramificados en su base.  |
|                            | Fenología  | En la época de secas los pinos son más evidentes por su presencia siempre de hojas que los encinos, que por su carácter más caducifolio, pierden hojas son menos evidentes.  |
|                            | Estructura | En estas comunidades a pesar de que domina la cobertura arbórea, se aprecian otros estratos de vegetación, tanto hiervas como arbustos, los cuales se hacen más evidentes en aquellas áreas en la que la cobertura se encuentra en fase secundaria.  |
| Bosque mesófilo de montaña | Fisonomía  | Estas comunidades se aprecian como bosques densos, altos, con una gran humedad, en la que abundan helechos, trepadoras leñosas y una gran variedad de epífitas.  |
|                            | Fenología  | Estas comunidades se aprecian verdes casi todo el año, son pocas las especies que tiran sus hojas en la época de secas.  |

|          |   |  |
|----------|---|--|
|          | Estructura  | Estos bosques cuentan con un estrato arbóreo bien definido, un estrato arbustivo muy bien identificable y un estrato herbáceo. La presencia de una gran variedad de epífitas y trepadoras son elementos distintivos de estas coberturas. Son pocas las zonas que cuentan con una extensión definida de estos bosques, sin embargo en la cuenca, al ser sumamente accidentada topográficamente, hace que haya una gran cantidad de pequeñas cañadas en las cuales es posible identificar este tipo de vegetación. |
| Manglar  | Fisonomía   | Estas comunidades se componen primordialmente de árboles y arbustos cuya característica principal es la presencia de raíces aéreas   |
|          | Fenología   | Perennes   |
|          | Estructura  | Predominan un estrato arbóreo que va de 2 a 10 m de altura aproximadamente, la cual esta integrado por árboles de hojas anchas, suculentas o esclerófilas.   |
| Pastizal | Comunidades vegetales que agrupan coberturas de estrato herbáceo, | <i>Pastizal inducido:</i> Se desarrolla en las zonas donde la vegetación original (bosques y selvas principalmente) fue eliminada.   |
|          |   | <i>Pastizal natural:</i> Vegetación que crece en zonas semi-áridas de la cuenca, en las cuales el suelo es muy poco y el afloramiento de   |

|   |                                  |  |
|---|----------------------------------|--|
|   | en la que abundan las gramíneas. | las rocas es evidente.   |
| Sabana                                  | Fisonomía                        | Vegetación muy abierta, parecido al de una pradera, con árboles bajos y dispersos, en la que sus troncos se encuentran torcidos.   |
|   | Fenología                        | Elementos perennes y caducifolios.   |
|   | Estructura                       | Gran presencia de gramíneas, árboles pequeños y escasos que van de 3 a 5 m.  |
| Selva alta y mediana subperennifolia    | Fisonomía                        | La principal característica de esta vegetación, es la apreciación de árboles perennes y deciduos que van de entre 25 y 30 metros, en los cuales los segundos pierden sus hojas en la época de secas.   |
|   | Fenología                        | La mayoría del tiempo los árboles son perennes, sin embargo un 25% son caducifolios en la época de secas.  |
|   | Estructura                       | Estas selvas son muy similares a las selvas altas principalmente, en la que se pueden observar un estrato arbustivo y uno herbáceo. En este tipo de vegetación se observó que los árboles son utilizados para darle sombra a cultivos de café, los cuales son difíciles de identificar como otra cobertura diferente por encontrarse mezcladas una con otra. |
| Selva baja caducifolia y subcaducifolia | Fisonomía                        | Vegetación que muestran un dosel cerrado o semi-cerrado, con árboles que van de entre 4 a 15 metros de altura, los cuales comúnmente carecen de espinas y pierden su follaje en época de   |

|  |            |   |
|--|------------|---|
|  |            | secas.  |
|  | Fenología  | Pierden sus hojas en épocas de secas, entre 4 y 6 meses, lo que le da un aspecto grisáceo, aspecto que contrasta en la época de lluvias, el cual muestra un verdor intenso y una cobertura cerrada.   |
|  | Estructura | Esta caracterizado principalmente por árboles, por muy poca cantidad de herbáceas, algunos cactus y agaves. En condiciones secundarias, se presenta una disminución de árboles, hay una tendencia hacia cultivos y zonas con erosión por localizarse en suelos muy someros. |
| Selva mediana caducifolia y subcaducifolia | Fisonomía  | Son comunidades vegetales que se muestran cerradas y densas, en especial durante la época de lluvias, lo que las hace muy similares a las selvas altas, aunque los árboles son de menor tamaño, de entre 15 y 30 metros de altura.  |
|  | Fenología  | Un 50% de su vegetación pierde sus hojas en la época de secas, sin embargo no se aprecia similar al grisáceo de las selvas bajas.   |

|                       |            |  |
|-----------------------|------------|--|
|                       | Estructura | Se muestra una mezcla de árboles de entre 15 a 30 metros, distinguiéndose dos estratos arbustivos claramente, en la que se solo se observa un estrato herbáceo en las zonas con coberturas secundarias.  |
| Vegetación de galería | Fisonomía  | Presenta árboles siempre verdes y relativamente altos con respecto a la vegetación contigua. Su ubicación a lo largo de flujos de agua permanentes favorece la abundancia y desarrollo de arbustos, herbáceas y algunas lianas.                                  |
|                       | Fenología  | Predominantemente perennifolios, sin embargo presentan algunos elementos caducifolios.   |
|                       | Estructura | Son comunidades complejas, presentan estratos herbáceos, arbustivos y arbóreos, sin embargo son muy inestables por la cantidad de agua que pueden tener los causes, llegando a disminuir drásticamente en épocas de secas o inundar la zona durante las lluvias. |

Fuente: Ramírez S. (2002), Rzedowski (1978) y Palacio P. et al. (2000)