



REGIÓN PLANICIE  
COSTERA Y GOLFO  
DE MÉXICO

IDENTIFICACIÓN DE CAMBIOS EN EL USO  
DEL SUELO Y VEGETACIÓN, Y CÁLCULO DE  
LA TASA DE TRANSFORMACIÓN DEL  
HÁBITAT EN EL PERIODO 2000-2010

ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA  
CAÑÓN DE USUMACINTA

Blanca Patricia Velasco Tapia  
Octubre 2010



## Introducción

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) son el instrumento legal para lograr la conservación de la riqueza natural de México; constituyen porciones terrestres y acuáticas del territorio nacional, representativas de diversos ecosistemas y su biodiversidad, en donde el ambiente original no ha sido esencialmente alterado por el hombre y están sujetas a regímenes especiales de protección, conservación, restauración y desarrollo (Lgeepa, 2007).

Hoy día se reconocen 174 ANP de carácter federal que cubren una superficie aproximada de 25.5 millones de ha distribuidas en diferentes ambientes que posee México, tanto en la porción terrestre, como en la costera y marina. Al modelo de conservación de las ANP se ha integrado, la certificación de terrenos particulares a través de las “Áreas destinadas voluntariamente a la conservación”, incrementado de esta manera la superficie protegida.

Por otra parte, uno de los temas ambientales que mayor controversia ha generado en los últimos años en México es la magnitud y el ritmo al que se desmontan los bosques y selvas del país para convertirlos a otras formas de uso del suelo (ejem., campos de cultivo, potreros, zonas urbanas, entre otros; Semarnat, 2005). Actualmente, se estima que el 30% de la superficie terrestre (4 mil millones de ha) se encuentra bajo cubierta forestal (FAO, 2002 y 2005).

La deforestación es un tema que ha recibido una atención importante durante los últimos años, sobre todo por las consecuencias negativas que tiene sobre el clima, el ciclo hidrológico y la conservación de los suelos. La deforestación constituye una de las principales amenazas para la biodiversidad que conlleva la pérdida de numerosos servicios ambientales fundamentales (Conabio, 2000). Las actividades antrópicas son consideradas las causas principales del aumento en los niveles de desertificación, deforestación, fragmentación del hábitat y pérdida de biodiversidad (Noble y Dirzo, 1997) particularmente en las regiones tropicales, donde predomina un patrón acelerado de



cambio en las cubiertas forestales, que va de condiciones predominantemente naturales a otras donde prevalece la influencia antrópica (FAO, 1996).

En México se han elaborado inventarios de la superficie bajo diferentes usos desde hace aproximadamente 40 años. Esto permitiría hacer comparaciones entre fechas y conocer las tasas y patrones de transformación del uso del suelo. Sin embargo, estos estudios se han hecho utilizando diferentes fuentes de información por ejemplo, fotografías aéreas, imágenes de diferentes satélites, etc., y diferentes herramientas tecnológicas, como son mapas impresos, cartas digitales y sistemas de información geográfica, entre otros, disponibles en el momento. Por otra parte, la clasificación de los usos del suelo empleada no ha sido consistente en todos ellos. Éstas diferencias hacen que los resultados de los inventarios no sean entera y directamente comparables y temas como la deforestación continúan siendo materia de discusión y controversia en los diferentes medios, sobre todo centran toda la atención en los valores finales y no en los procesos que subyacen a estos cambios (Maser, 1996). Diversos autores han buscado obtener estimaciones de las tasas de deforestación del país con base en la información disponible en diversas fuentes y utilizando diversos métodos de cálculo. Las estimaciones de superficies forestales perdidas anualmente variaban de 365,000 a 1'600,000 ha (Velázquez *et al.*, 2002; Semarnat, 2005).

De los inventarios de uso del suelo y vegetación disponibles a nivel nacional, los más directamente comparables entre sí son las cartas de Uso del suelo y vegetación series: I, II y III elaboradas por el Instituto nacional de estadística y geografía (Inegi) (Semarnat, 2005) y, actualmente, la serie IV. Con los datos de la series I, II y III de Usos del suelo y vegetación del Inegi, la Comisión nacional forestal (Conafor) calculó y reportó a la FAO (Food and Agriculture Organization) la información sobre la dinámica de cambio, de acuerdo con las especificaciones de la evaluación de los recursos forestales a 2005 (FRA2005 por sus siglas en inglés). Con una tasa de cambio entre el periodo 1990-2000 de



---

-0.5%, que corresponde a una superficie de -348,000 ha/año, mientras que para el periodo 2000-2005 se obtuvo una tasa de -0.4%, que representan -260,000 ha/año.

A nivel mundial, México ocupó en el 2005 el lugar número 12 en cuanto a existencia de superficie de bosques y selvas, después de Brasil, Estados Unidos, Canadá, China, Indonesia, Perú, India y Sudán, entre otros; aunque ocupó el lugar número 51 respecto de su tasa de cambio, con -0.4% anual de pérdida de superficie cubierta con bosques y selvas durante el mismo periodo (Semarnat, 2009).

Ante esta situación, se requiere cuantificar continuamente el grado de conversión del hábitat y expresarlo en términos de los factores desencadenadores del cambio, dando énfasis al resultado de la acción antrópica. Una manera confiable para medirlo es a través del estudio de la dinámica espacio temporal de la cubierta vegetal (Berry *et. al.*, 1996). Las transformaciones del uso del suelo son uno de los temas de mayor interés actual en las disciplinas ambientales. De hecho, actualmente se reconoce que, aún cuando los cambios de uso de suelo ocurren a nivel local, pueden tener consecuencias globales. El uso del suelo está ligado con la sustentabilidad del uso de los recursos naturales (Conabio, 2000), la forma e intensidad en que se modifica la cubierta vegetal determina la persistencia de los ecosistemas y por ende, de los recursos y servicios que éstos proporcionan. Es fundamental, por tanto, entender en detalle los procesos de cambio de uso del suelo y sus efectos, así como mejorar los mecanismos de evaluación, predicción y seguimiento para que sean más confiables y describan la dinámica del capital natural que resguarda México dentro de las ANP.

La Comisión nacional de áreas naturales protegidas (Conanp) ha desarrollado a partir de 2000 el Proyecto “Tasa de transformación del hábitat” en ANP, cobrado gran interés por parte de las diferentes direcciones de área protegida. Toca el turno en esta ocasión al Área de protección de flora y fauna (Apff) Cañón de Usumacinta recientemente establecida mediante decreto presidencial del 22 de septiembre del 2008, área de



importancia, ya que constituye un reservorio de agua, cuyo flujo a través del Cañón del Usumacinta permite la conservación y desarrollo de diferentes tipos de vegetación, hábitat idóneos de una alta diversidad de mamíferos, aves, reptiles y anfibios endémicos, además de aportar y abastecer de agua a la población que habita en la zona y que es necesario proteger, toda vez que, de su conservación a largo plazo, depende la calidad del agua para la preservación y conservación de la flora y fauna silvestre que en ella habita.

En este sentido es necesario conocer cuáles son los componentes o elementos que lo conforman (especies de plantas, animales, hábitats, etc.) y entender la dinámica, cómo y por qué cambian los ecosistemas en el tiempo y en el espacio. Los cambios en los ecosistemas pueden ser ocasionados de forma natural o por causas humanas y la intensidad puede variar de fuerte a ligero. Para conocer lo que existe en los ecosistemas es necesario elaborar un inventario; sin embargo, para saber cómo y por qué cambian los componentes en los ecosistemas, es necesario contar con datos en el tiempo (Mittermeier y Goettsch, 1997).

El registro continuo de datos de la biodiversidad en un área a largo plazo permitirá observar cómo funciona, por qué y qué tanto se transforma los ecosistemas en el área. Para lograr esto, es esencial el establecimiento de la línea de base, ya que mostrará cómo estaban las condiciones en el tiempo cero, la cual se compararan los datos obtenidos a través del tiempo. Esta herramienta permite detectar los cambios naturales y aquéllos provocados por actividades antropogénicas sobre los ecosistemas. Este puede ser un elemento a considerar, junto con otros datos del ANP, para conocer si se está logrando la misión la Conanp, que es la de conservación de los recursos naturales de nuestro país a través de las ANP.

El monitoreo de la vegetación puede proporcionar a los administradores y otros tomadores de decisiones la información necesaria para llevar a cabo y de manera eficiente, las acciones relacionadas con el manejo sostenible del área. Los ecosistemas



dentro de las áreas protegidas son el objeto de conservación, por lo que es importante establecer el estado actual en el que se encuentran. Por ello, conocer aspectos generales como la superficie, forma y extensión de un área, permite establecer los parámetros básicos para la posterior valoración de cada ecosistema, apoyado con las herramientas que brinda la percepción remota y los Sistemas de información geográfica (SIG). De esta manera, los ecosistemas se pueden identificar, tipificar y cuantificar, aunque siempre se requiere de datos de campo, ya sea mediante observación directa del personal técnico del área o por el trabajo específico de especialistas sobre aspectos biológicos, geomorfológicos o geológicos. Este tipo de información posibilita construir mapas con la distribución de cada ecosistema, los que posteriormente pueden ser cruzados con otras coberturas temáticas (como edafología, población y tenencia de la tierra) para establecer mapas de valoración para cada área.

Con la elaboración del “Protocolo para la evaluación del uso del suelo y vegetación en Áreas naturales protegidas federales de México” (Conanp, 2007a) la Conanp busca realizar la evaluación de la ANP utilizando las imágenes de satélite disponibles. El protocolo fue modificado por Velasco (2010), con la intención de integrar mejores técnicas que permitan obtener una mejor separación de clases al momento de clasificar las imágenes de satélite.

Para el análisis se utilizan imágenes Landsat como información histórica en sus diferentes sensores MSS (Multispectral Scanner), TM (Thematic Mapper) y ETM (Enhanced Thematic Mapper) y las imágenes Spot de fechas más recientes y con mejor resolución espacial, gracias a la distribución que hace la Estación de recepción México de la constelación Spot (Ermexs). Esto con apoyo de la información vectorial de Uso del suelo y vegetación Inegi en la serie IV.



## Objetivo general

Calcular la tasa de transformación del hábitat del Área de protección de flora y fauna “Cañón de Usumacinta”, en el periodo: 2000 al 2010, empleando técnicas de SIG y teledetección, para el seguimiento de los recursos forestales, utilizando el protocolo diseñado por la Comisión nacional de áreas naturales protegidas.

## Área de estudio

La cuenca del Usumacinta es el principal cauce de agua en Mesoamérica, es compartida por México y Guatemala y es la cuenca más grande de la Selva Maya; mantiene un corredor biológico y conforma una misma y extensa masa forestal, pese al intenso proceso de transformación que ha ido afectando a la selva en las últimas décadas (Lazcano *et. al.*, 1992, Iñigo *et. al.*, 2004).

La unión de los ríos La pasión, Salinas y Lacantún en el territorio mexicano forma el río Usumacinta. Desde el lugar, conocido como el raudal de Anaite, hasta el sitio de Boca del cerro, a unos 70 Km río abajo, se considera como la cuenca media del Usumacinta. Esta parte del río se caracteriza por su recorrido entre riscos y cañones calcáreos, la pendiente del cauce es más pronunciada y el río corre con alta velocidad (Amezcuca *et. al.*, 2007). Esta cuenca tiene un papel muy importante en los diversos ecosistemas, por ser reguladora de procesos ecológicos y mantener la conectividad de varias áreas naturales protegidas en México y Guatemala.

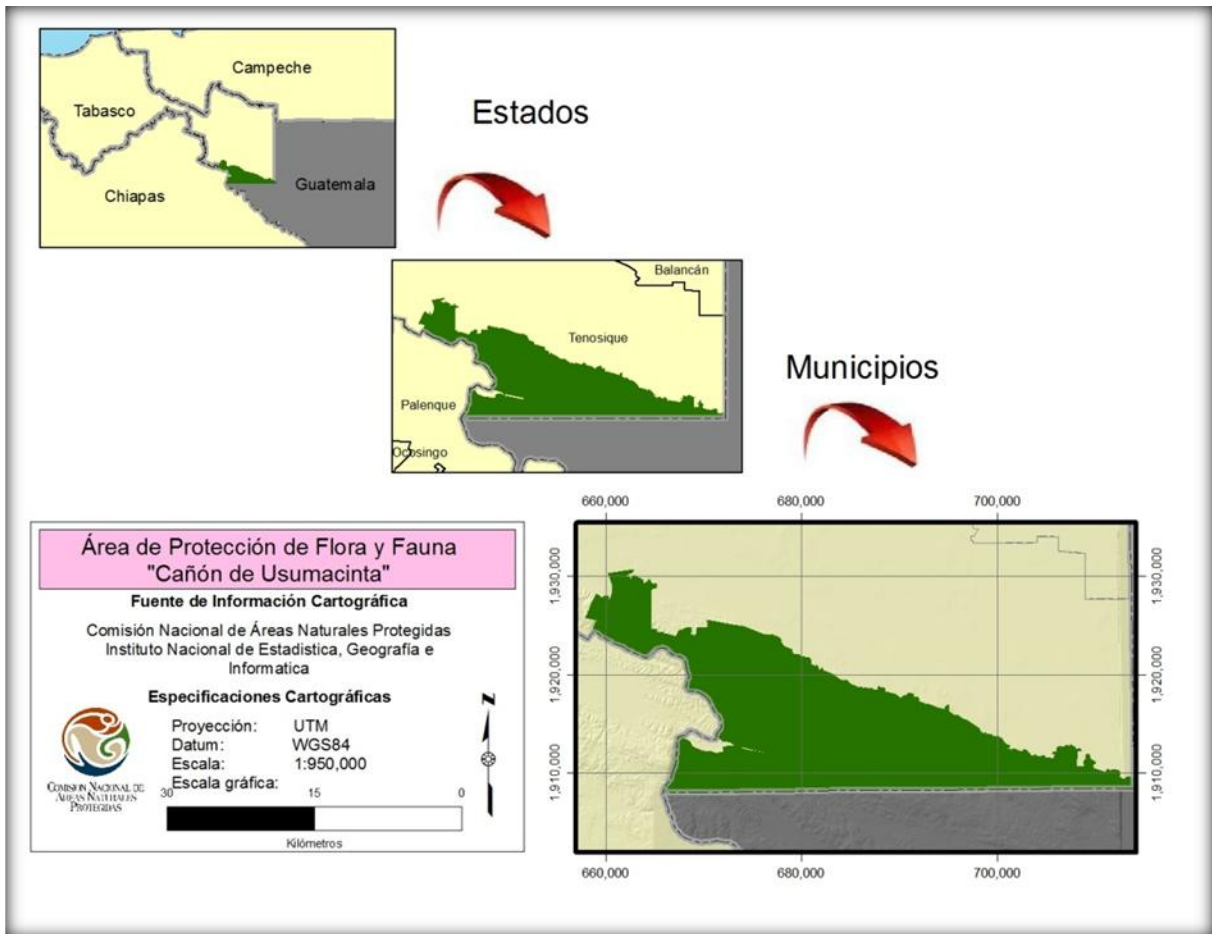


Figura 1.- Ubicación geográfica del Área de protección de flora y fauna “Cañón de Usumacinta”.

En México el Área de protección de flora y fauna (Apff) “Cañón del Usumacinta” está ubicado al sur del municipio de Tenosique en el estado de Tabasco (Figura 1). En el año 2008 se publicó el decreto federal por la Secretaría de medio ambiente y recursos naturales (Semarnat) a través de la Comisión nacional de áreas naturales protegidas (Conanp), con una superficie de 46,128 ha, constituyendo de esta forma un reservorio de agua, cuyo flujo a través del Cañón del Usumacinta permite la conservación y desarrollo de diferentes tipos de vegetación, hábitats idóneos de una alta diversidad de mamíferos, aves, reptiles y anfibios endémicos, además de aportar y abastecer de agua a la población que habita en la zona (DOF, 2008).





El Cañón del Usumacinta forma parte del Corredor biológico mesoamericano, que se extiende desde México hasta Centroamérica, el cual protege una de las regiones más ricas del mundo en biodiversidad, e integra políticas de conservación mediante el establecimiento de corredores biológicos entre las áreas naturales protegidas del sureste del país con el fin de evitar el aislamiento biológico y geográfico de estas áreas y garantizar el equilibrio ecológico de los ecosistemas terrestres bajo esquemas de desarrollo sustentable.

La zona está considerada por la Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (Conabio) como una Región prioritaria terrestre para la conservación, dentro de la región 138 denominada Selva lacandona por ser una zona que contiene mayor riqueza biológica del país, toda vez que incluye 625 especies de mariposas.

Además en esta región existen ecosistemas representativos de la selva alta perennifolia, de cuyas especies resaltan el chicozapote (*Manilkara zapota*), zapote (*Pouteria zapota*), ramón (*Brosimum alicastrum*), guapaque (*Dialium guianense*) y cansan (*Terminalia amazonia*), que mantienen su estructura y funcionamiento en buen estado de conservación y que constituye el hábitat de diversas especies de flora y fauna que se distribuyen en la región.

Al menos 38 especies de mamíferos, varias de ellas consideradas bajo alguna categoría de riesgo según la Norma oficial mexicana Nom-059-Semarnat-2001: Protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres, Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo, como son: venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), tigrillo ocelote (*Leopardus pardales*), ardilla (*Sciurus deppei*), tepezcuintle (*Agouti paca*), puerco de monte (*Dicotyles tajacu*),



nutria (*Lontra longicaudis*), manatí (*Trichechus manatus*), armadillo (*Dasyus novemcintus*), puma (*Puma concolor*) y mapache (*Porción lotor*).

Se tiene registro de que en dicha región se desarrollan 43 diversas especies de aves, algunas de ellas consideradas bajo alguna categoría de riesgo conforme la norma oficial mexicana señalada en el considerando anterior, tales como: guacamaya (*Ara macao*), tucán (*Ramphastos sulfuratus*), gavilán (*Accipiter* sp), loro (*Amazona* sp), y hocofaisán (*Crax rubra*), así como diversas especies de anfibios, peces y reptiles de los cuales destacan: coral (*Antipathes* sp), lagarto (*Crocodylus moreleti*), cocodrilo (*Crocodylus acutus*), iguana (*Iguana iguana*), masacuata (*Boa constrictor*), castarrica (*Cichlasoma urophthalmus*), robalo (*Centropomus* sp), pejelagarto (*Astrachtosteus tropicus*), tortuga guao (*Staurotypus triporcatus*), tortuga (*Trachemys scripta*), tortuga pochitoque (*Kinosternon acutun*), tortuga chiquiguo (*Chelydra serpentina*).

Que no obstante el buen estado de conservación de la selva alta perennifolia en la región conocida como Cañón del Usumacinta, en ella se realizan actividades productivas como la agricultura, ganadería y aprovechamiento forestal, entre otras, que resulta imprescindible orientar hacia un esquema de sustentabilidad congruente con la protección del patrimonio natural de la región, reduciendo los impactos ambientales sobre los ecosistemas del área y garantizando mejores condiciones de vida para la población.



## Método

Uno de los objetivos de la Conanp es contar con el seguimiento de la cubierta vegetal que se encuentra en las áreas protegidas del país. Para lograr esto se realiza la evaluación del uso del suelo y vegetación a través de un análisis de imágenes de satélite de los sensores Landsat y Spot en diferentes áreas protegidas. Para Apff “Cañón de Usumacinta” se llevó a cabo el análisis para el periodo comprendido del 2000 al 2010.

El método de análisis que se utilizó fue con base en el “Protocolo para la evaluación del uso del Suelo y vegetación en Áreas naturales protegidas federales de México” establecido por la Conanp (2007), y modificado por Velasco (2010). El cual integra los diferentes componentes mediante la interconexión de los objetos de conservación, actividades humanas productivas y extractivas, dinámica socio-económica, conflictos sociopolíticos y gestión del ANP. El desarrollo del método se divide en tres fases: pre-procesamiento, clasificación de imágenes y análisis de detección de cambios.

## Pre-procesamiento

Se efectuó la búsqueda de las imágenes del satélite Spot de los diferentes años en el catalogo Sirius (<http://sirius.spotimage.com/>), las cuales fueron solicitadas a la Ermexs, a través de la Subdirección encargada de la coordinación de geomática como gestor oficial de la Conanp, quien mantiene bajo resguardo todas las imágenes que fueron utilizadas para el presente trabajo. En total se emplearon 9 imágenes de tipo TIF (Tabla 1), en formato multiespectral de 4 bandas (Green 0.50-0.59  $\mu\text{m}$ , Red 0.61-0.68  $\mu\text{m}$ , NIR 0.79-0.89  $\mu\text{m}$  y SWIR 1.58-1.75  $\mu\text{m}$ ) y una resolución de 10 metros; así como pancromáticas de resolución espacial a 2.5 metros, las imágenes cuentan con un nivel de procesamiento 1A (con correcciones radiométricas). La imagen del año 2000 pertenece al acervo de imágenes de satélite ortorectificadas del cubrimiento global GeoCover Landsat disponible en la página de la NASA (National Aeronautics and Space Administration)



(<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>) que cuentan con referencia geográfica en un compuesto de 3 bandas (7,4,2), con una resolución de 15 metros.

Tabla 1.- Descripción de los metadatos requeridos para las 3 fases del protocolo, en la última columna se muestra el error medio cuadrático obtenido de la ortorectificación de las imágenes.

Fecha	Imagen	Modo	XS1 (Green)	XS2 (Red)	XS3 (NIR)	XS4 (SWIR)	Error medio cuadrático
			Gains				
01/04/2008	E56053150804012J1A09006	Multiespectral	2.088700	2.225207	1.719888	6.2985	0.000097
01/04/2008	E56053150804012T1A00003	Pancromática	2.472593				0.0000004
29/07/2008	E56053150807291J1A09001	Multiespectral	2.283242	2.785675	1.739503	10.635245	0.015208
26/12/2009	E56053150912262J1A08003	Multiespectral	2.027292	3.787209	2.34087	10.56495	0.0194174
26/12/2009	E56053150912262T1A08003	Pancromática	3.285604				0.0004054
30/04/2010	E56053151004302J1A08001	Multiespectral	2.027292	2.795202	1.278	6.255	0.0020257
30/04/2010	E56053151004302T1A08001	Pancromática	2.406280				0.0000006
19/08/2008	E56063150808192J1A03001	Multiespectral	2.834345	3.84142	1.29396	10.638167	0.0028663
19/08/2008	E56063150808192T1A03001	Pancromática	3.352758				0.0039511
21/02/2010	E56063151002212J1A01005	Multiespectral	2.751015	3.787209	1.698675	10.564695	0.0002649
21/02/2010	E56063151002212T1A05004	Pancromática	3.285604				0.0000005
02/07/2005	E56043150507022J1A00002	Multiespectral	2.139452	2.23992	1.308	10.694748	0.0211428
02/07/2005	E56043150507022T1A00003	Pancromática	2.435659				0.0000743
22/01/2005	E56043150501222J1A04004	Multiespectral	2.139452	3.86682	1.73855	10.694748	0.129506
22/01/2005	E56043150501222T1A01002	Pancromática	3.302677				0.0004809
22/01/2005	E56043150501222J1A00003	Multiespectral	2.139452	3.86682	1.73855	10.694748	0.0188869
22/01/2005	E56043150501222T1A04002	Pancromática	3.302677				0.0000726



La ortorectificación se realizó en el programa Erdas 9.1 para PC, empleando el modulo Leica photogrammetry suite, para la referencia de altura se utilizó el Modelo Digital de Elevación (MDE) del continuo de elevaciones mexicano 1:50,000 de la página del Inegi, (<http://mapserver.inegi.org.mx/DescargaMDEWeb/?s=geo&c=977>), con una resolución espacial a 30 metros y una referencia geométrica con un datum ITRF92; la primera etapa consistió en importar de un formato \*.BIL a \*.IMG (formato nativo de Erdas), posteriormente reproyectar al datum WGS84 en proyección UTM 15N; la introducción de los datos altimétricos resulta clave cuando las imágenes no se adquieren verticalmente (como puede ser el caso de las adquiridas por el sensor Spot), en las que los errores debidos al relieve son muy notables. La base para los puntos de control GCP (Ground Control Points) fue la imagen Landsat de la NASA, por no contar con otro insumo de mayor resolución se optó por utilizar esta imagen con realce espacial a 15 metros, como la base para la obtención de GCP para el proceso de ortorectificación de las imágenes Spot.

Todas las imágenes fueron cubiertas con un mínimo de 50 puntos distribuidos uniformemente en cada una de las escenas los cuales fueron identificables y estables en el tiempo (cruce de carreteras, puentes, etc.), con la mayor precisión posible con el fin de obtener valores mínimos del error medio cuadrático (0.01). La validación se llevo a cabo superponiendo la imagen resultante con la imagen de la Nasa junto con información vectorial 1:50,000 de ríos, carreteras y cuerpos de agua del Inegi.

Una vez ortorectificadas las imágenes se procedió a realizar las correcciones atmosféricas, para esto se utilizó información contenida en el metadato (Tabla 2). Cada imagen nativa contiene 256 niveles digitales (ND) calibrados que son cuantificados como enteros a 8 bits sin signo. Los ND calibrados pueden ser convertidos a valores de radiancia (porción que capta la energía que recibe el sensor) usando la inclinación (pendiente), los parámetros de compensación a partir del coeficiente de conversión de unidad disponible para cada banda, así como los parámetros de ganancia conocidos. Esta conversión de ND a valores



de radiancia se llevó a cabo empleando un modelo programado en Erdas, el cual es capaz de convertir los valores de ND a valores de radiancia en punto flotante ( $Wm^{-2}Sr^{-1}\mu m^{-1}$ ) usando para ello la información de ganancia del archivo metadato. Utilizando la siguiente fórmula:

$$L=ND/Gain$$

Donde: L es la radiancia en la longitud de onda de cada banda de la imagen, ND los valores de niveles digitales en la imagen y Gain coeficiente de calibración de la sensibilidad del sensor.

Tabla 2.- Metadatos requeridos para realizar la corrección atmosférica, fue necesario calcular el día juliano.

Fecha	Imagen	Día Juliano	Angulo de Elevación	Irradiación Solar			
				XS1 (Green)	XS2 (Red)	XS3 (NIR)	XS4 (SWIR)
01/04/2008	E56053150804012J1A09006	91	62.22685	1858	1575	1047	234
01/04/2008	E56053150804012T1A00003	91	62.21619	1773			
29/07/2008	E56053150807291J1A09001	211	67.90079	1858	1573	1043	236
26/12/2009	E56053150912262J1A08003	360	44.19209	1858	1575	1047	234
26/12/2009	E56053150912262T1A08003	360	44.18854	1773			
30/04/2010	E56053151004302J1A08001	120	69.68397	1858	1575	1047	234
30/04/2010	E56053151004302T1A08001	120	69.67244	1773			
19/08/2008	E56063150808192J1A03001	232	67.08314	1858	1575	1047	234
19/08/2008	E56063150808192T1A03001	232	67.07548	1773			
21/02/2010	E56063151002212J1A01005	52	53.75167	1858	1575	1047	234
21/02/2010	E56063151002212T1A05004	52	53.74647	1773			
02/07/2005	E56043150507022J1A00002	183	69.14387	1858	1575	1047	234
02/07/2005	E56043150507022T1A00003	183	69.13683	1773			
22/01/2005	E56043150501222J1A04004	22	46.29831	1858	1575	1047	234
22/01/2005	E56043150501222T1A01002	22	46.29219	1773			
22/01/2005	E56043150501222J1A00003	22	46.67386	1858	1575	1047	234
22/01/2005	E56043150501222T1A04002	22	46.66984	1773			



Para el cálculo de la reflectividad se aplicó la ecuación del método de Warner (2008), el cual está basado en el método publicado por Chávez (1996) y Lut *et. al.* (2002). El procedimiento se efectuó en el programa Erdas y se realizó un modelo para la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{\pi * (L_{\text{sat}} - L_{\text{haze}}) * d^2}{E_{\text{sun}_\lambda} * [\cos \theta_s]^2}$$

Donde:  $\rho$  = reflectividad para la banda N;  $\pi$  = constante de la geometría euclidiana y representa la relación entre la longitud de una circunferencia y su diámetro (3,141592655897...);  $L_{\text{sat}}$  = radiancia registrada en el sensor para esa banda;  $L_{\text{haze}}$  = radiancia atribuible a los efectos atmosféricos, la resta de la radiancia del objeto oscuro de la radiancia del sensor “dark object subtraction” está enfocado a determinar la porción de la radiancia en el sensor que es atribuido a la atmósfera. Este método ha demostrado ser bastante exacto y es el enfoque más viable para la corrección atmosférica cuando los datos de terreno no están disponibles (Chavez 1996, Lut *et. al.*, 2002). Para determinar el  $L_{\text{haze}}$  para cada banda de las imágenes, se obtuvo de los datos en el histograma seleccionando el valor mínimo de radiancia, ya que este valor se le atribuye a la atmósfera;  $d$  = distancia del sol a la tierra, calculada mediante la siguiente fórmula (Achardm y D’Souza, 1994, citado por Eva y Lambin, 1998; Smith, 2004):

$$d = (1 - 0.01672 * \cos(\text{RADIANS}(0.9856 * (\text{Julian Day} - 4))))$$



Esun = irradiación exo-atmosférica de cada banda;  $\theta$  = ángulo cenital solar, el cual es ángulo complementario del ángulo de elevación solar en radianes. Algunas versiones de esta ecuación mantienen a  $\theta$  sin elevarlo al cuadrado, pero aquí se hace para aproximar a la transmisividad atmosférica. Warner (2008) y USU (2008), afirman que este método es apropiado para climas húmedos o tropicales, tales como el caso del área de estudio.

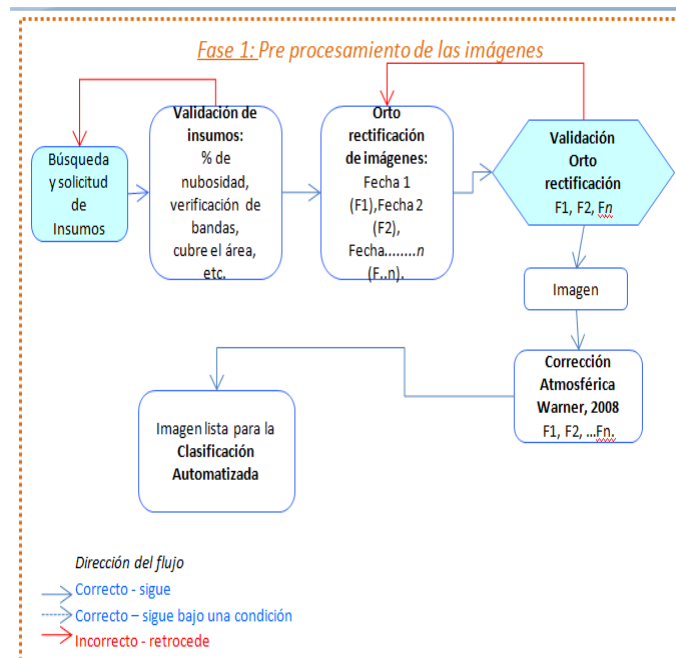


Diagrama 1.- Incluye desde la solicitud y búsqueda de las imágenes requeridas, hasta la imagen lista para clasificar.





## Clasificación de imágenes (diagrama 2)

Con las imágenes corregidas del satélite Spot, se procedió a realizar una clasificación supervisada aplicando el algoritmo de máxima probabilidad. Para obtener los sitios de entrenamiento se generaron dos falsos colores RBG 4,3,1 y 1,2,3, para visualizar las diferentes coberturas que ocupan el área, definiéndose los sitios de entrenamiento para formar el conjunto de firmas espectrales que precisaron unas muestras de estos conglomerados. Este proceso fue iterativo, para generar firmas que representaron con exactitud las 6 categorías de usos del suelo y vegetación a ser identificadas, basándose en la clasificación de Rzedowski (1983), UNAM (2000) y datos del Inegi serie IV, por lo cual se tiene definidas las siguientes clases: Cuerpos de agua, infraestructura agropecuaria (pastizales y cultivos), asentamientos humanos, selva alta perennifolia, selva baja espinosa subperennifolia (inundable o no), selva alta perennifolia con vegetación secundaria, vegetación de tular.

La imagen resultante se recodificó para las categorías de Inegi antes señaladas y se le aplicó un filtro que permitiera el suavizado o realce de los píxeles de la imagen, cuyo objetivo es mejorar el contraste o resaltar los rasgos de interés.

Para mejorar la clasificación digital se efectuó una interpretación visual para lo cual fue necesario la transformación de los datos de las imágenes de formato raster a vector. Se eliminarán áreas menores a la unidad mínima cartográfica (umc) correspondiente a 4 mm<sup>2</sup>, la cual según la Asociación Cartográfica Internacional (ICA por sus siglas en inglés) no recomienda que sea menor a esto para una escala de trabajo de 1: 50.000 (Salichev, 1979, Paniagua, 2009, Prieto *et. al.*, 2008). Esta parte es clave en el proceso, ya que de ella depende la buena interpretación y corrección visual para continuar con las otras fechas. Se trata de una fotointerpretación asistida por el ordenador, que elimina diversas fases de la interpretación visual clásica (restitución, inventario). Con la interacción visual con el intérprete se pueden resolver algunos problemas del tratamiento digital, que encuentra



notables dificultades para automatizar la interpretación de ciertos rasgos de la imagen (presencia de nubes, áreas urbanas, etc.) que son bastante obvios al análisis visual (Conanp, 2007; Paniagua, 2009).

Es una alternativa para modificar la cartografía generada a partir de un análisis digital, identificando clases heterogéneas. Auxilia la clasificación digital, aislando sectores de potencial confusión sobre la imagen, o estratificando algunos sectores de la imagen para aplicarles tratamientos específicos (Paniagua, 2009).

Para la validación de la clasificación de la fecha uno, se utilizó una matriz de confusión. Dicha matriz, se elaboró con las áreas correspondientes a las clases definidas y los puntos test facilitados por la Comisión nacional forestal (Conafor). Estos datos fueron obtenidos en campo para el proyecto del Inventario nacional forestal y de suelos 2004-2009 (Figura 2), también se utilizaron los datos de la cobertura del uso del suelo y vegetación del Inegi serie IV. Ambos datos fueron cruzados con su respectiva matriz con la fecha uno.

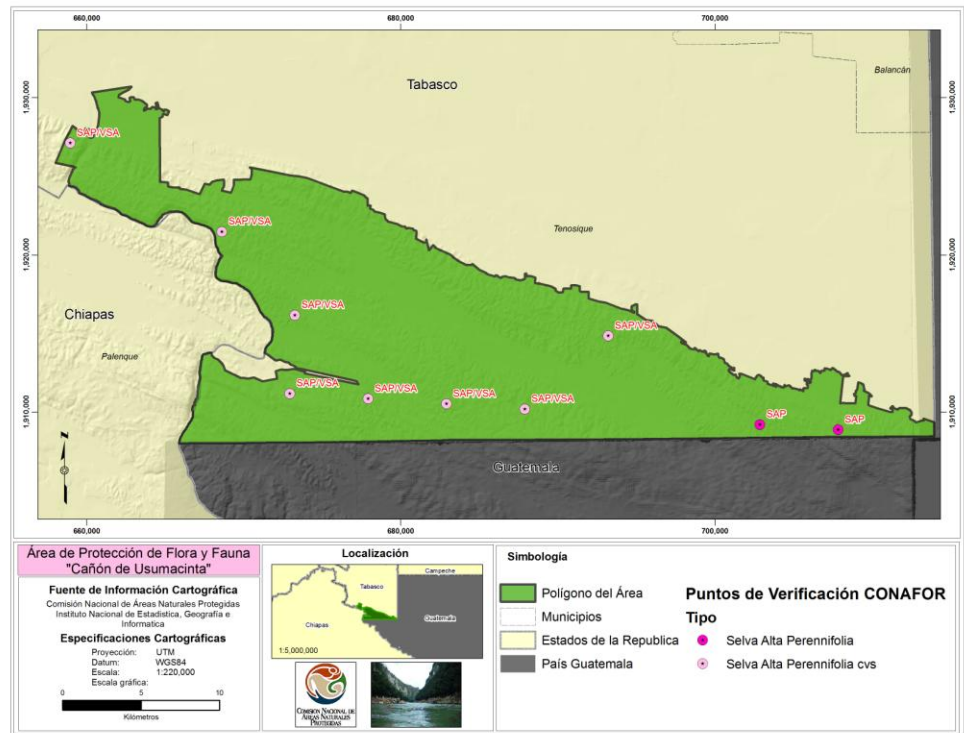


Figura 2.- Puntos de verificación de Inventario Forestal Nacional, para el Apff “Cañón de Usumacinta”.

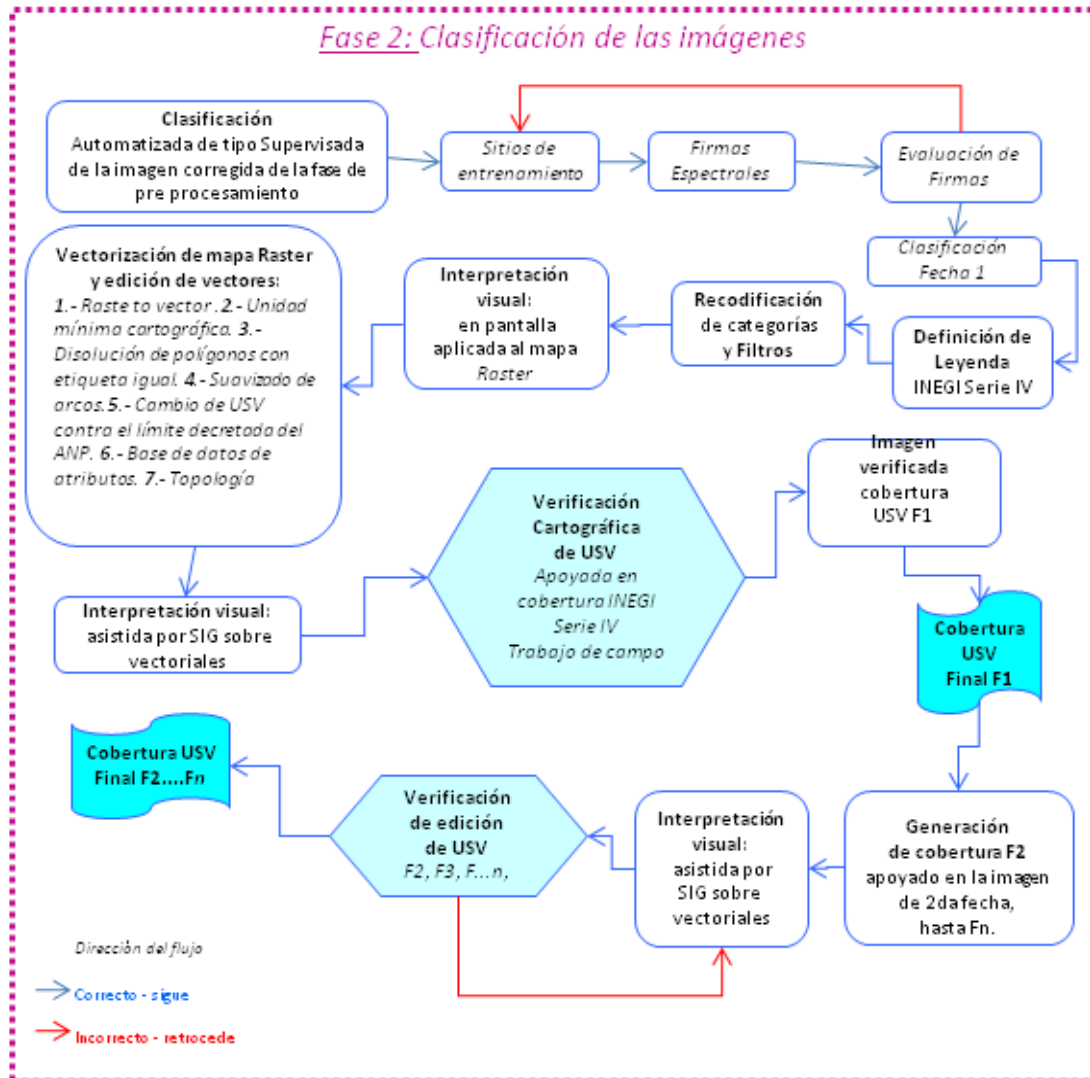


Diagrama 2.- Cuando la imagen resultante del pre-procesamiento esta lista, se realiza la clasificación supervisada siguiendo la línea de flujo se pasa por diferentes procesos para obtener la fecha uno y de ahí derivar las siguientes fechas.



### ***Análisis de detección de cambios (diagrama 3)***





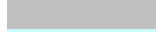

La cuantificación del cambio resulta de la diferencia de la superposición cartográfica entre la cobertura de la fecha uno y la siguiente fecha, de ello resulta una matriz de transición, con un valor de cada clase que ha cambiado (dinámica), y una indicación de aquellas clases que no han cambiado (estable). También se deriva una evaluación de las superficies de clases de cobertura y su uso de territorio de otras clases, así como las coberturas que pierden territorio con otras clases (UNAM, 2000).

Utilizando herramientas implementadas en los SIG, se realizó la intersección entre las coberturas de cada fecha, obteniendo los polígonos que marcan el cambio de uso de suelo. Esto se realizó solapando primera fecha/segunda fecha, etc. Una vez efectuado esto, se calculó el área de los polígonos que sufrieron transformación, posteriormente se actualizó la base datos, con las propiedades de cada uno de ellos. El software para hacer estos cruces de los mapas fue el programa Arcinfo. La base de datos correspondiente al mapa de cambio se exportó a un archivo Dbase (\*.dbf), para luego calcular los datos de superficies totales por categoría y la diferencia entre clases de una fecha a otra.

De acuerdo con Ramírez y Zubieta (2005), se obtiene la siguiente matriz de transición que incluye la reagrupación de categorías de acuerdo al tipo de transformación al que hayan sido sometidos dentro del periodo:



		Uso de Suelo y Vegetación Fecha 2											
Clases		B1	B2	B...n	Bp1	Bp2	Bp...n	A1	A2	A...n	U	Agua	TOTAL 1
Uso de Suelo y Vegetación Fecha 1	B1												0.00
	B2	Bp											0.00
	B...n		A										0.00
	Bp1												0.00
	Bp2												0.00
	Bp...n												0.00
	A1												0.00
	A2												0.00
	A...n												0.00
	U												0.00
	Agua												0.00
	TOTAL 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

	Deforestación	<b>B</b>	Vegetación conservada sin cambio
	Perturbación	<b>Bp</b>	Vegetación perturbada sin cambio
	Recuperación	<b>A</b>	Usos agropecuarios sin cambio
	Revegetación	<b>O</b>	Otras cubiertas sin cambio
	Crecimiento urbano		
	Cambios en el nivel de agua		

Diseño de la matriz de Transición. Los datos se ordenan de mayor a menor grado de antropización de la cubierta, excepto el agua. B= Vegetación Primaria (Bosque-Selva Denso; Bp= Vegetación Secundaria (Bosque-Selva perturbados); A= Usos Agropecuarios; U= Zonas Urbanas; Agua= Lagos, ríos, etc

**Deforestación.** Pérdida del arbolado, denso o abierto, por cambio a usos No Forestales.

**Perturbación.** Pérdida o aclarado del arbolado sin cambio en el uso de suelo.

**Recuperación.** Restablecimiento de arbolado denso sobre áreas perturbadas, aclaradas o de vegetación arbustiva.

**Revegetación.** Establecimiento de vegetación secundaria por abandono de parcelas agrícolas, pecuarias o vegetación recuperada después de algún evento de rápida transformación sobre la cobertura vegetal (áreas afectadas por incendios, deslaves, inundaciones, etc).

**Crecimiento urbano.** Incremento de la superficie ocupada por áreas habitacionales o industriales.

**Cambios en nivel del agua.** Aumento o descenso en el nivel de los cuerpos de agua.



El análisis de cambio se obtuvo de las capas de Uso del Suelo y Vegetación (USV) generados a partir de las imágenes resultantes del procesamiento anteriormente citado: 2000, 2005, 2008, 2009 y 2010.

Los tipos de uso de suelo y vegetación presentes en cada fecha, se agruparon en las categorías “Forestal y No Forestal”, la primera contiene al conjunto de plantas dominadas por especies arbóreas, arbustivas o crasas, que crecen y se desarrollan en forma natural formando bosques, selvas y vegetación de zonas áridas y la segunda agrupa los usos de suelo derivados de actividades antrópicas y/o eventos naturales que modifiquen de alguna forma las cubiertas del suelo (SEMARNAT, 1997). En este estudio el grupo de las forestales son: áreas sin vegetación aparente, bosque de encino primario y con vegetación secundaria, bosque de pino encino primario y el secundario abierto; vegetación riparia; para la categoría de no forestales serían: agricultura, áreas impactadas por incendios, asentamientos humanos y pastizales. Con base en la información obtenida de la agrupación de los tipos de vegetación, se calculará la tasa de transformación del hábitat de acuerdo a la ecuación utilizada por la FAO (1996):

$$\delta = 1 - \left( 1 - \frac{S1 - S2}{S1} \right)^{1/n}$$

Donde:

$\delta$  = tasa de cambio.  $S1$  = superficie forestal, al inicio del periodo.  $S2$  = superficie forestal, al final del periodo.  $n$  = número de años entre las dos fechas

Una vez obtenido la tasa de transformación del hábitat, se realizó la cartografía correspondiente: mapas de los usos del suelo y vegetación por tiempo y mapas de los polígonos detectados con transformación.

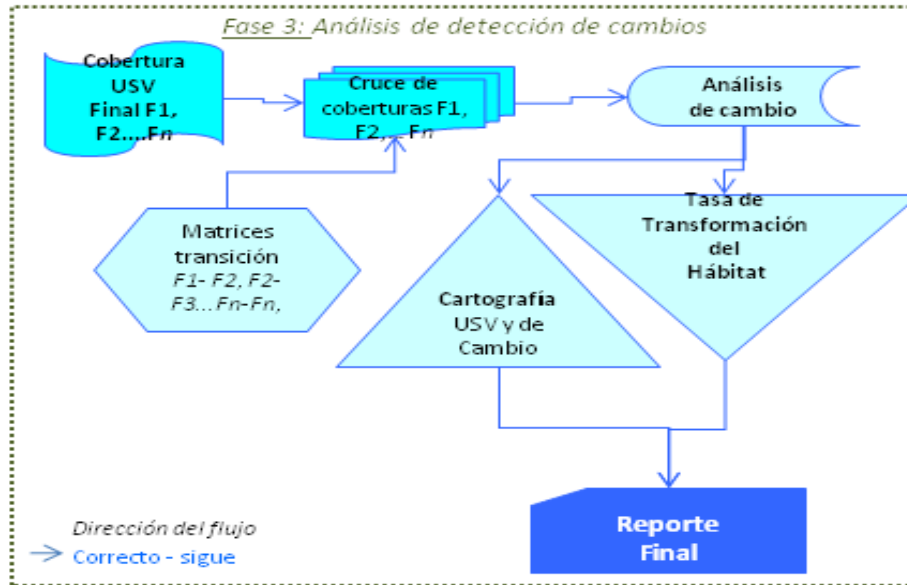


Diagrama 3.- En esta fase se concluye obteniendo la cartografía temática de los USV y los polígonos de cambio, también la TTH por periodo de estudio y las superficies transformadas.



## Resultados

De las imágenes procesadas se obtuvieron 5 mapas del Apff Cañón del Usumacinta (Figura 3, 4, 5, 6 y 7) que corresponden a los años 2000, 2005, 2008, 2009 y 2010. En las imágenes se puede observar la complejidad estructural que presenta, montañas plegadas, la altitud de estos elementos topográficos varía de 200 a 700 msnm, siendo afectados intensamente por procesos de erosión fluvial, controlada en parte por los sistemas de fallas transcurrentes. De ahí su apariencia cortada por profundos cañones y gargantas.

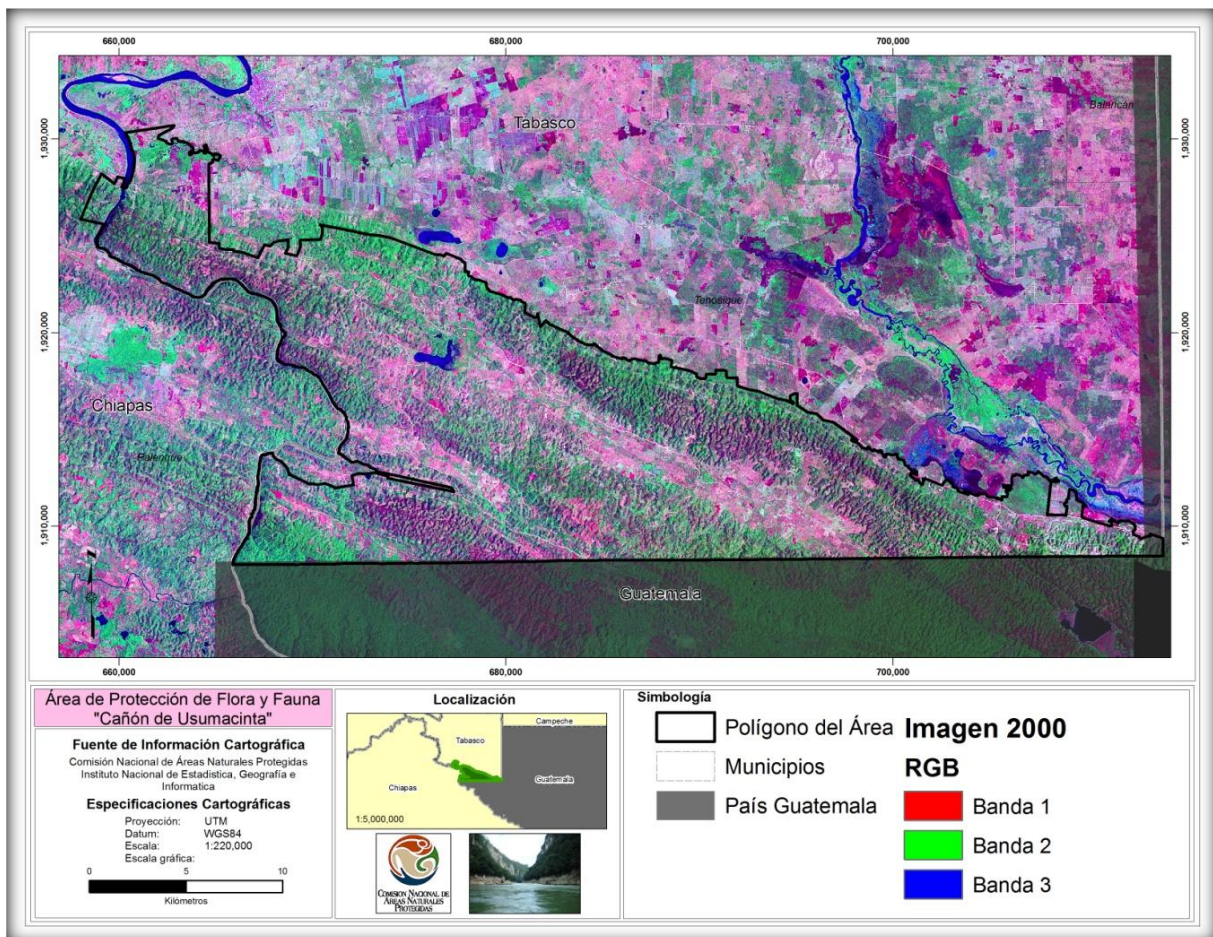


Figura 3.- Imagen Landsat del Apff Cañón del Usumacinta, año 2000.





La cuenca media del Usumacinta se caracteriza por su transcurrir entre abruptos cerros y colinas calcáreas en muchas ocasiones constituyendo verdaderas paredes rocosas de más de 300 m de altura. La pendiente es mayor en este tramo del río por lo que fluye con mayor velocidad, creando flujos turbulentos y torrenciosos en muchos sectores con secciones de poca anchura y mucha profundidad. Comprende unos 70 km entre Anaité y el cañón Boca del Cerro que es el final de la cuenca media del Usumacinta.

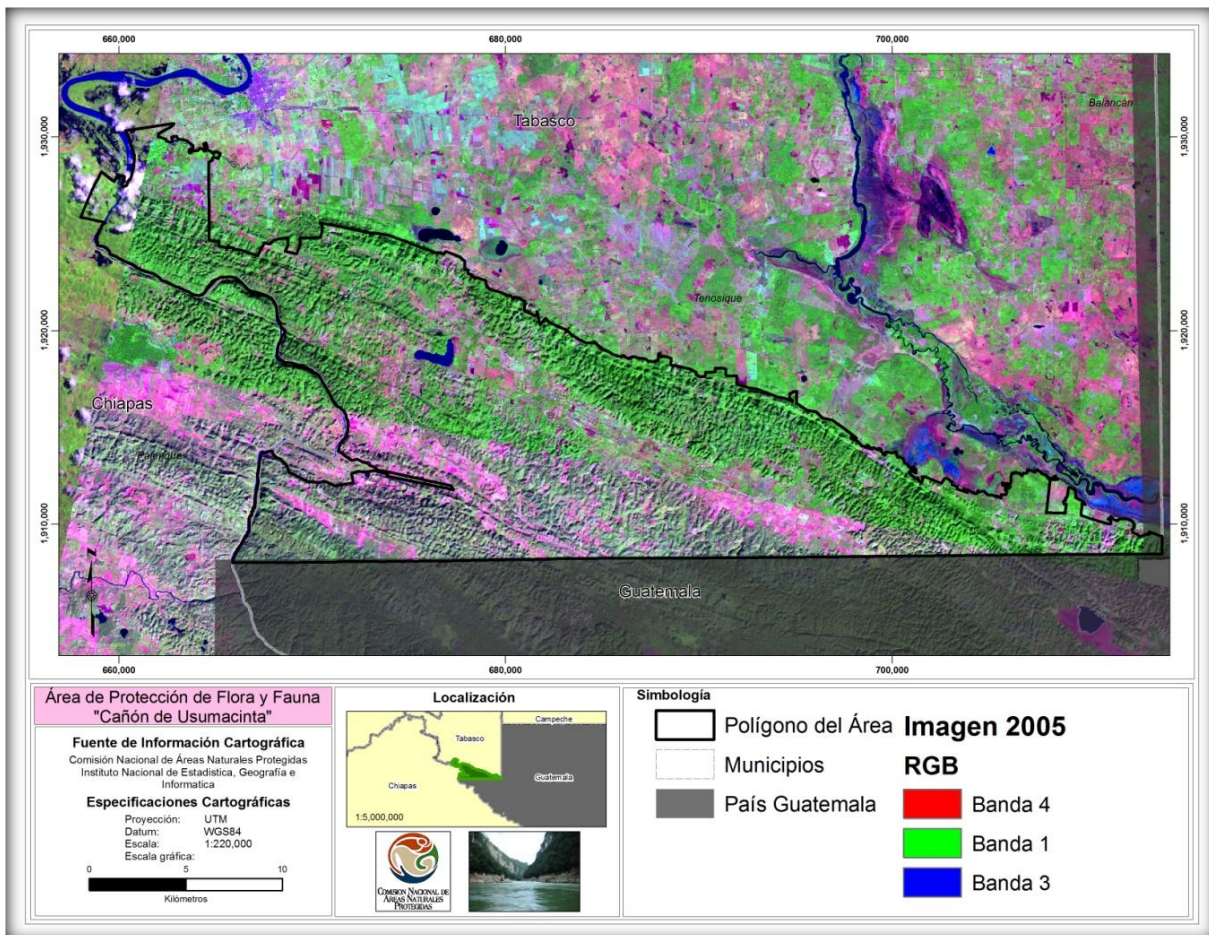


Figura 4.- Imagen Landsat del Apff Cañón del Usumacinta, año 2005.



El área de estudio, presenta un tipo de vegetación de selva alta perennifolia, con dominancia de algunos árboles como chicozapote (*Manilkara zapota*), zapote (*Pouteria zapota*), ramón (*Brosimum alicastrum*), guapaque (*Dialium guianense*) y canshán (*Terminalia amazonia*). A pesar de que existe una gran superficie cubierta con vegetación original que aún no ha sido alterada, también existe una superficie amplia que ha sido utilizada para diversas actividades de tipo agropecuaria y extractiva, sobre todo de maderas preciosas locales.

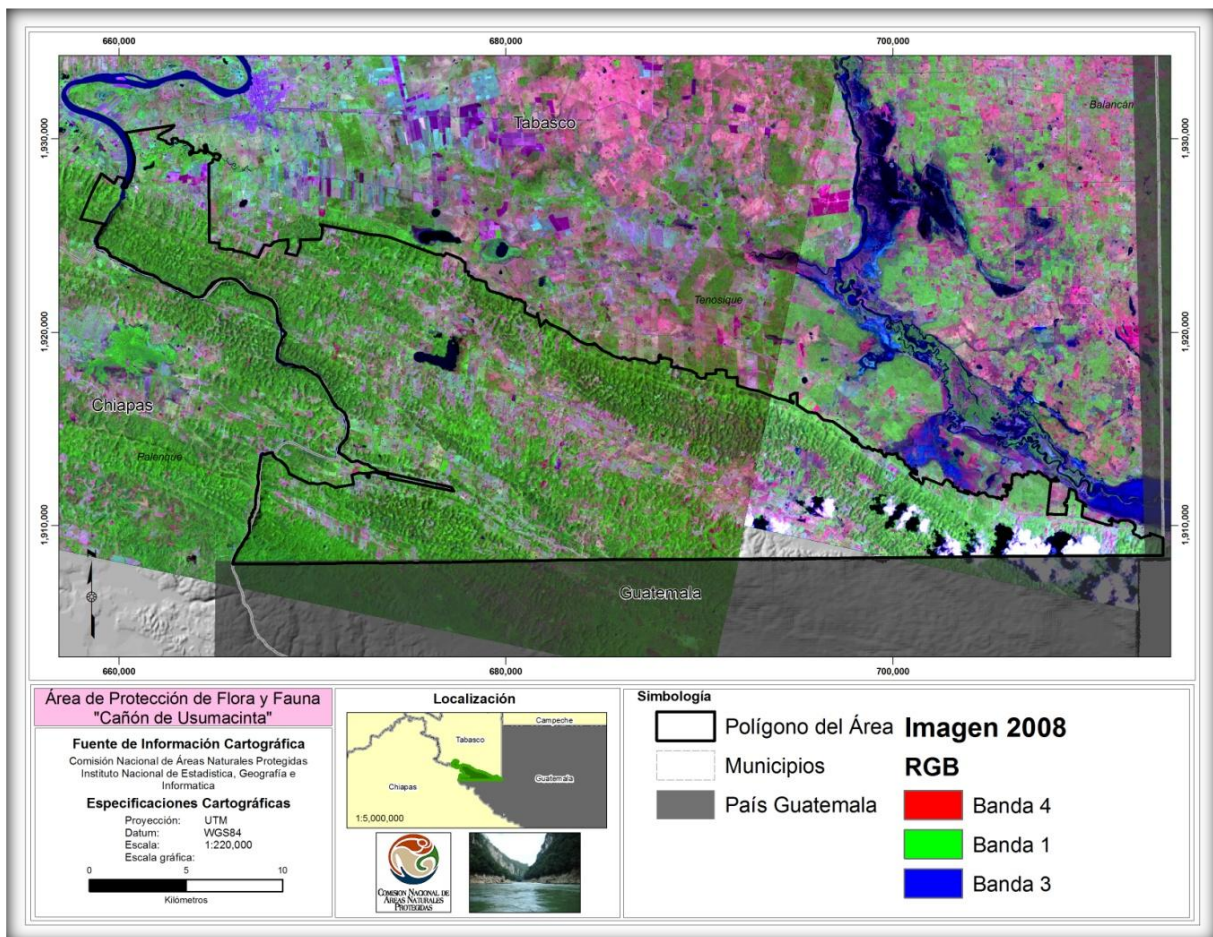


Figura 5.- Imagen Landsat del Apff Cañón del Usumacinta, año 2008.



La selva puede considerarse como ambiente primario, ya que aunque ha sufrido algunas alteraciones, aún se encuentran elementos primarios de gran talla que la caracterizan desde diferentes puntos de vista, tales como la fenología, diversidad y fauna entre otros; mientras que los otros ambientes se consideran secundarios ya que han sido alterados y carece en su totalidad de elementos primarios.

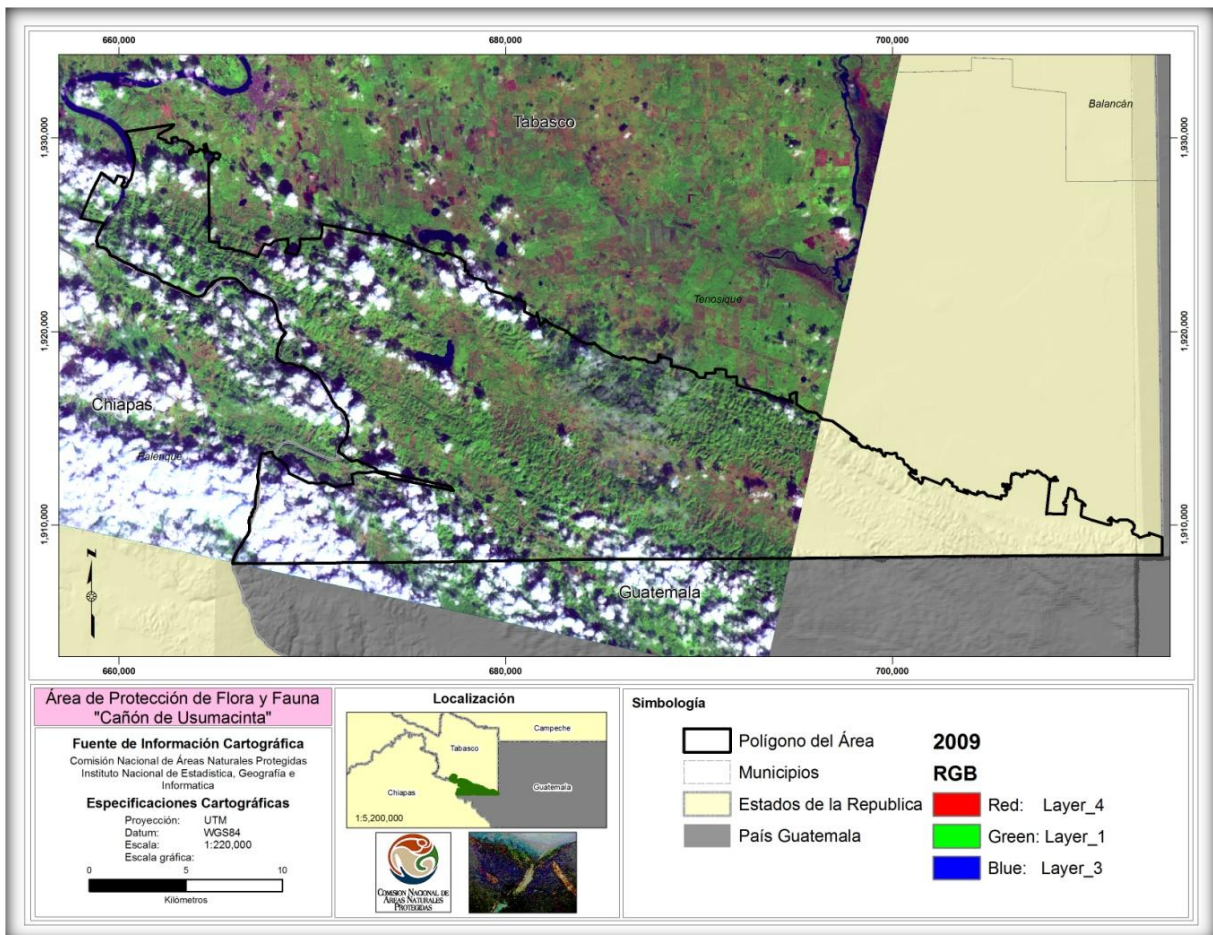


Figura 6.- Imagen Landsat del Apff Cañón del Usumacinta, año 2009.



Las áreas en sucesión o acahuales corresponden a ambientes primarios de selva que han sido alterados por diversas actividades, principalmente para establecer cultivos de maíz. Estos acahuales se localizan en las faldas de los cerros o en áreas con menor pendiente. En la zona existen acahuales de diversas edades y dependiendo de la edad es la composición florística de los mismos. Las áreas agrícolas se observan en los valles de la zona donde existen terrenos relativamente planos que permiten las labores agrícolas.

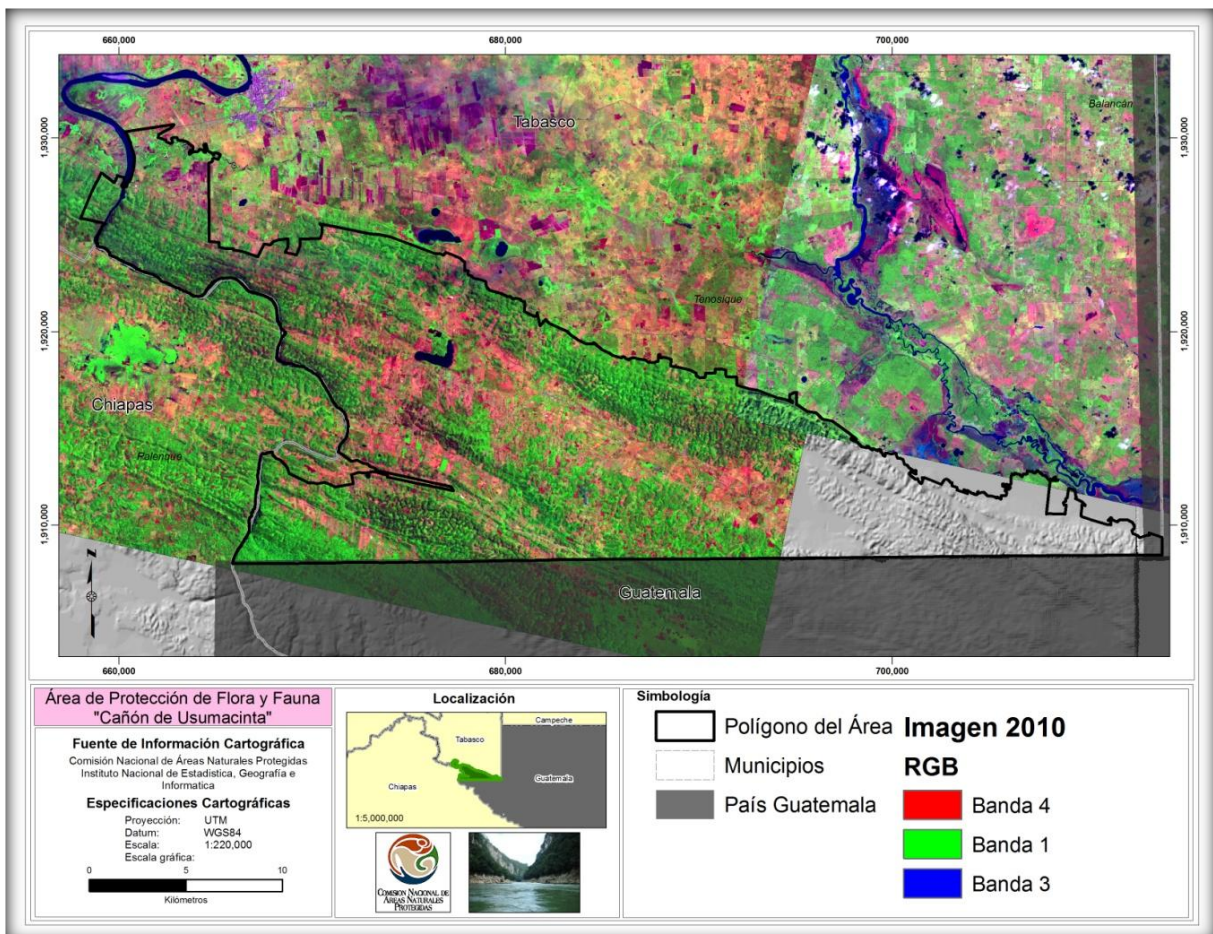


Figura 7.- Imagen Landsat del Apff Cañón del Usumacinta, año 2010.



Fue seleccionada como primera fecha el año 2008, como base para la clasificación, debido a la calidad de las imágenes y por cubrir por completo el área de interés, posteriormente se clasificaron las otras fechas con base en el método de clasificación interdependiente.

Para evaluar la clasificación del 2008 se obtuvo la gráfica de las firmas espectrales que se muestra la figura 8, donde se observa las respuestas en las 4 bandas, para las 6 clases. El valor promedio de la divergencia transformada es de 1924 lo que supone una buena separación entre las clases (Chuvienco, 2008; García y Mas, 2008).

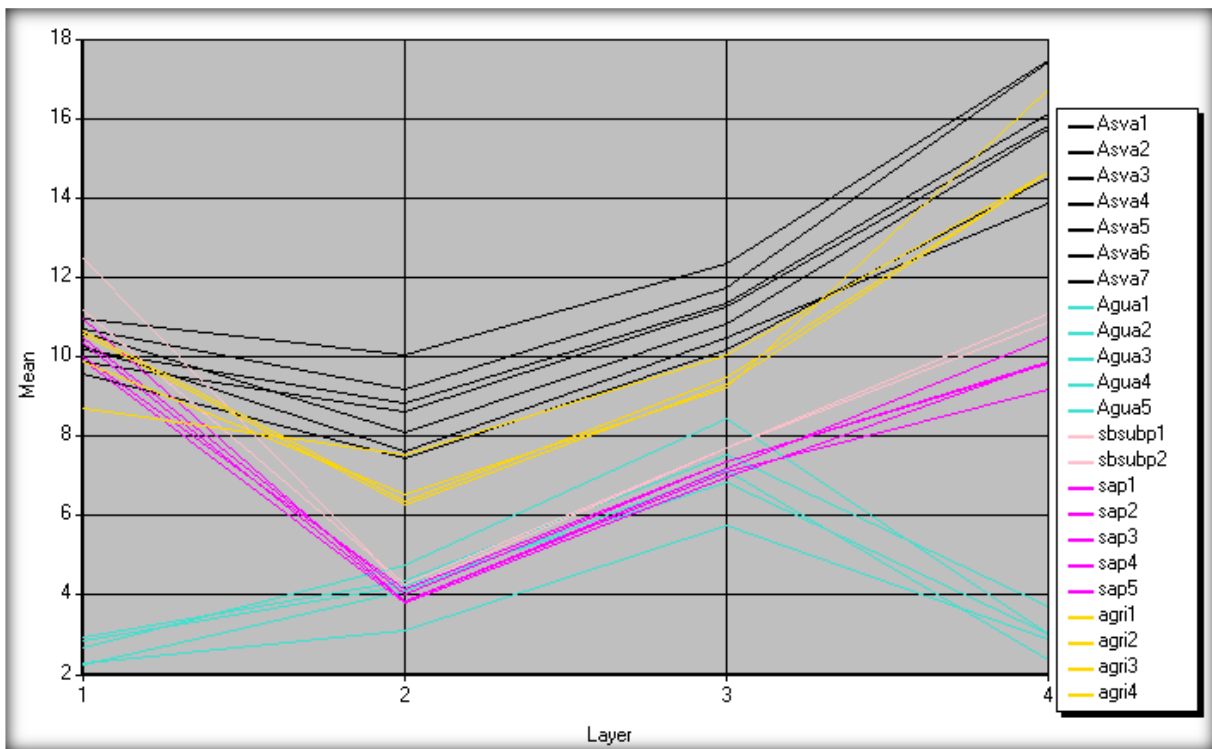


Figura 8.- Gráfica de las firmas espectrales para las 4 bandas, asva= asentamientos humanos, agua=cuerpos de agua, sbsubp= selva baja espinosa subperennifolia, sap= selva alta perennifolia, agri= infraestructura agropecuariaforestal (agriculturas y pastizales), sapveg= selva alta perennifolia con vegetación secundaria arbórea y arbustiva, vt= vegetación de tular.



Para el cálculo en hectáreas de la superficie de los usos del suelo y vegetación obtenidas de las clasificaciones correspondientes a los diferentes periodos, está representada en la Tabla 3; cabe mencionar que no fue posible obtener datos de la imagen del año 2009 debido a la cantidad de bruma y nubosidad que presentaba, dificultando notoriamente su clasificación. También es importante mencionar que el decreto como ANP establece una superficie total de 46,128 ha, sin embargo los cálculos obtenidos con base en la descripción del decreto se obtiene una superficie de 45,625 ha, cifra que será utilizada en lo sucesivo para los diferentes cálculos.

Tabla 3.- Uso del suelo y vegetación para el Apff Cañón de Usumacinta.

Uso de Suelo y Vegetación	2000		2005		2008		2010	
	HA	%	HA	%	HA	%	HA	%
<b>FORESTAL</b>								
Selva alta perennifolia	19,529	42.80	19,493	42.72	18,402	40.33	17,979	39.41
Selva baja espinosa subperennifolia / inundable	501	1.10	466	1.02	333	0.73	320	0.70
Tular	12	0.03	4	0.01	4	0.01	4	0.01
Selva alta perennifolia c/vegetación secundaria	14,724	32.27	12,999	28.49	12,324	27.01	12,151	26.63
Selva baja espinosa subperennifolia c/vegetación secundaria	0	0.00	0	0.00	25	0.06	42	0.09
<b>Subtotal</b>	<b>34,766</b>	<b>76.20</b>	<b>32,961</b>	<b>72.24</b>	<b>31,088</b>	<b>68.14</b>	<b>30,495</b>	<b>66.84</b>
<b>NO FORESTAL</b>								
Asentamientos Humanos	260	0.57	260	0.57	272	0.60	272	0.60
Infraestructura agrícola- pecuaria	10,310	22.60	12,187	26.71	14,022	30.73	14,615	32.03
<b>Subtotal</b>	<b>10,570</b>	<b>23.17</b>	<b>12,447</b>	<b>27.28</b>	<b>14,294</b>	<b>31.33</b>	<b>14,888</b>	<b>32.63</b>
<b>OTROS</b>								
Cuerpo de Agua	288	0.63	216	0.47	242	0.53	242	0.53
<b>Subtotal</b>	<b>288</b>	<b>0.63</b>	<b>216</b>	<b>0.47</b>	<b>242</b>	<b>0.53</b>	<b>242</b>	<b>0.53</b>
<b>TOTAL</b>	<b>45,625</b>	<b>100.00</b>	<b>45,625</b>	<b>100.00</b>	<b>45,625</b>	<b>100.00</b>	<b>45,625</b>	<b>100.00</b>



El tipo de vegetación, selva alta perennifolia es la que presenta el mayor porcentaje en el Apff Cañón de Usumacinta, en el año 2000 cubría una superficie del 42%, mientras que para el año 2008 fecha es que esta establece como ANP, ocupaba una superficie de 18,402 ha que correspondía al 40.33%. Este mismo tipo de vegetación con vegetación secundaria cubría en el año 2000 una superficie de 14,724 ha y 12,324 ha en el año 2008. La selva alta perennifolia con vegetación primaria y secundaria en el 2008 constituía una superficie de 30,727 ha que corresponde al 67% de la superficie total.

Por su parte los usos del suelo ocupados por actividades humanas en el Apff Cañón de Usumacinta principalmente debido a infraestructura agrícola-pecuaria fue de 10,310 ha en el año 2000 y de 14,022 ha en el 2008 que corresponde al 30% de la superficie total.

Los cuerpos de agua se encuentran poco representados con variaciones en la superficie debido a cambios en los niveles de agua, que en ocasiones inunda algunas porciones de la selva baja espinosa subperennifolia.

En la figura 9, se marca la tendencia de los dos grupos el forestal y no forestal, donde se puede observar la tendencia a disminuir el grupo forestal y una tendencia a incrementarse el grupo no forestal, esto principalmente debido a la presión que está ejerciendo la infraestructura agrícola-pecuaria donde se incluyen los cultivos y pastizales que se trabajan en la zona.

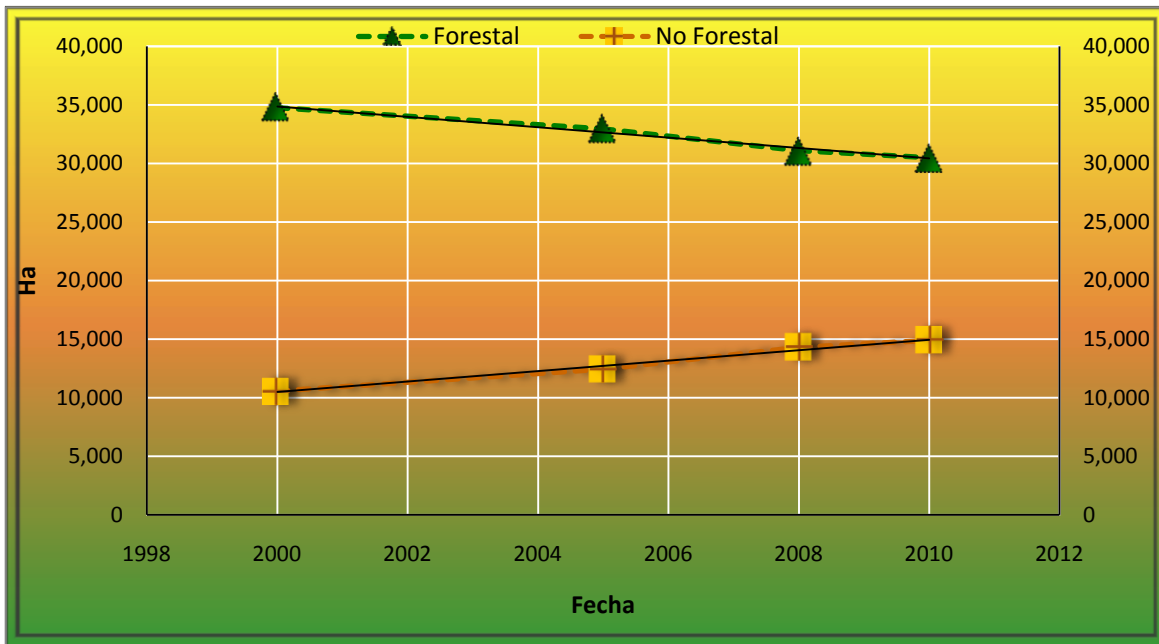


Figura 9, Representación de la tendencia de la superficie forestal y no forestal.

Los resultados de la clasificación de las imágenes se presentan en las figuras 10, 11, 12 y 13, contiene los mapas correspondientes a los años, 2000, 2005, 2008 y 2010. En los mapas se puede observar la distribución de la vegetación que se presenta con una dirección SE-NW. Cabe mencionar que el Apff Cañón de Usumacinta limita al Sur y al Este con el país de Guatemala, lo que puede representar una continuidad de los diferentes tipos de vegetación hacia esta zona de Guatemala que corresponde a la Selva Maya.

Mientras que las áreas donde se encuentran las actividades humanas se presentan principalmente en la zona de los valles, con el mismo patrón de distribución que presenta la vegetación con una dirección SE-NW. Los asentamientos humanos se encuentran distribuidos entre las áreas agrícola-pecuarias.



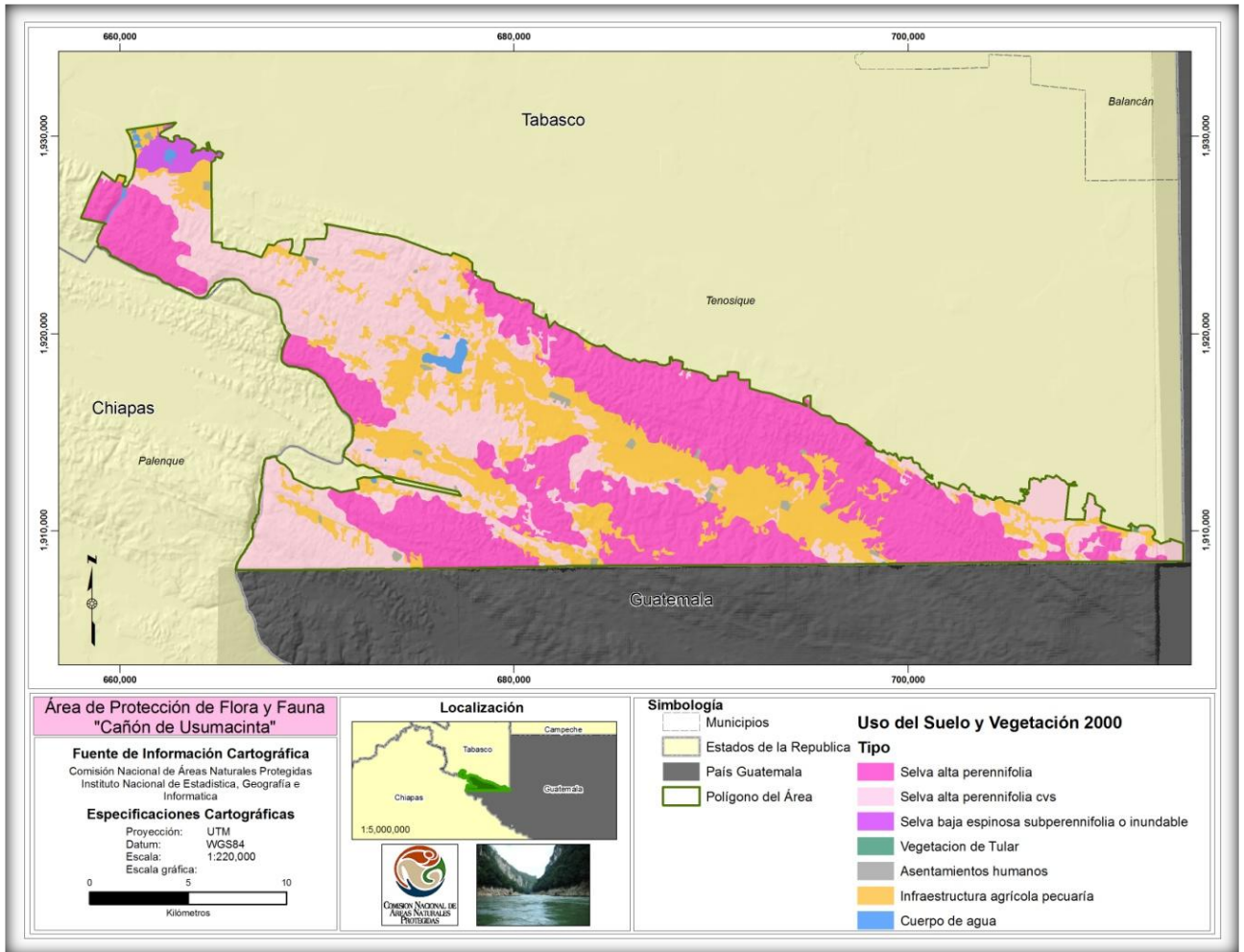


Figura 10.- Clasificación del año 2000 para el APFF Cañón de Usumacinta.

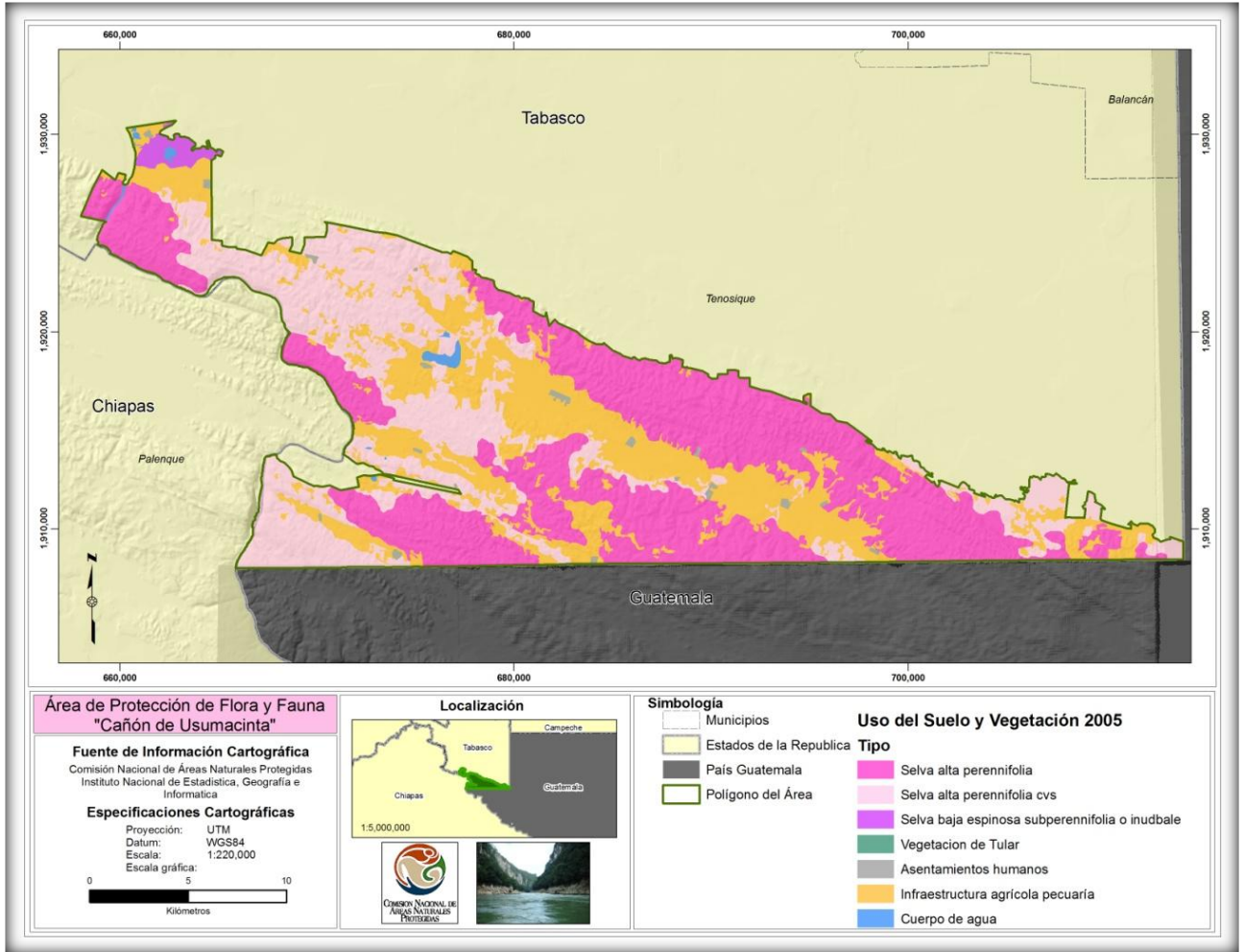


Figura 11.- Clasificación del año 2005 para el APFF Cañón de Usumacinta.

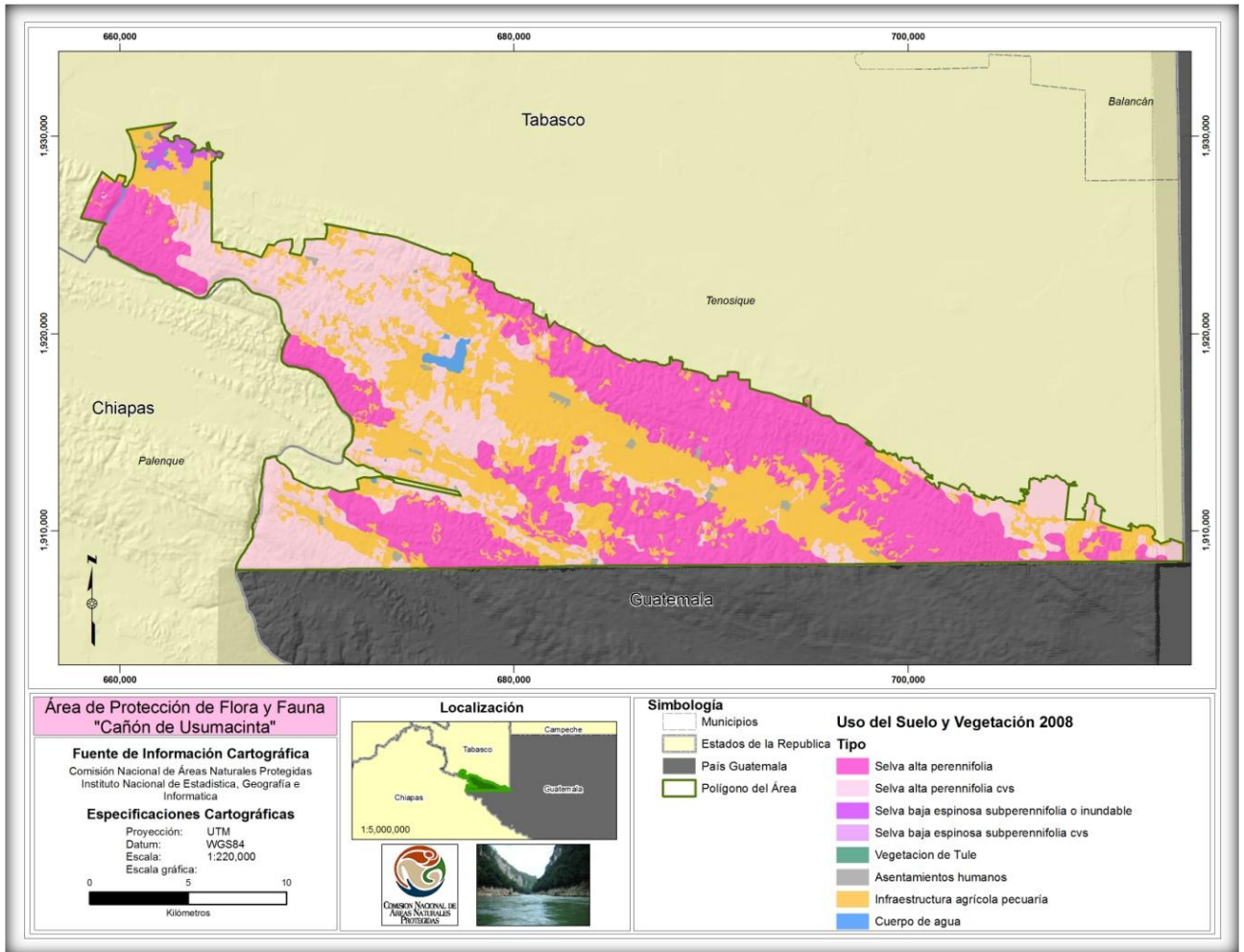


Figura 12.- Clasificación de año 2008 para el APFF Cañón de Usumacinta.

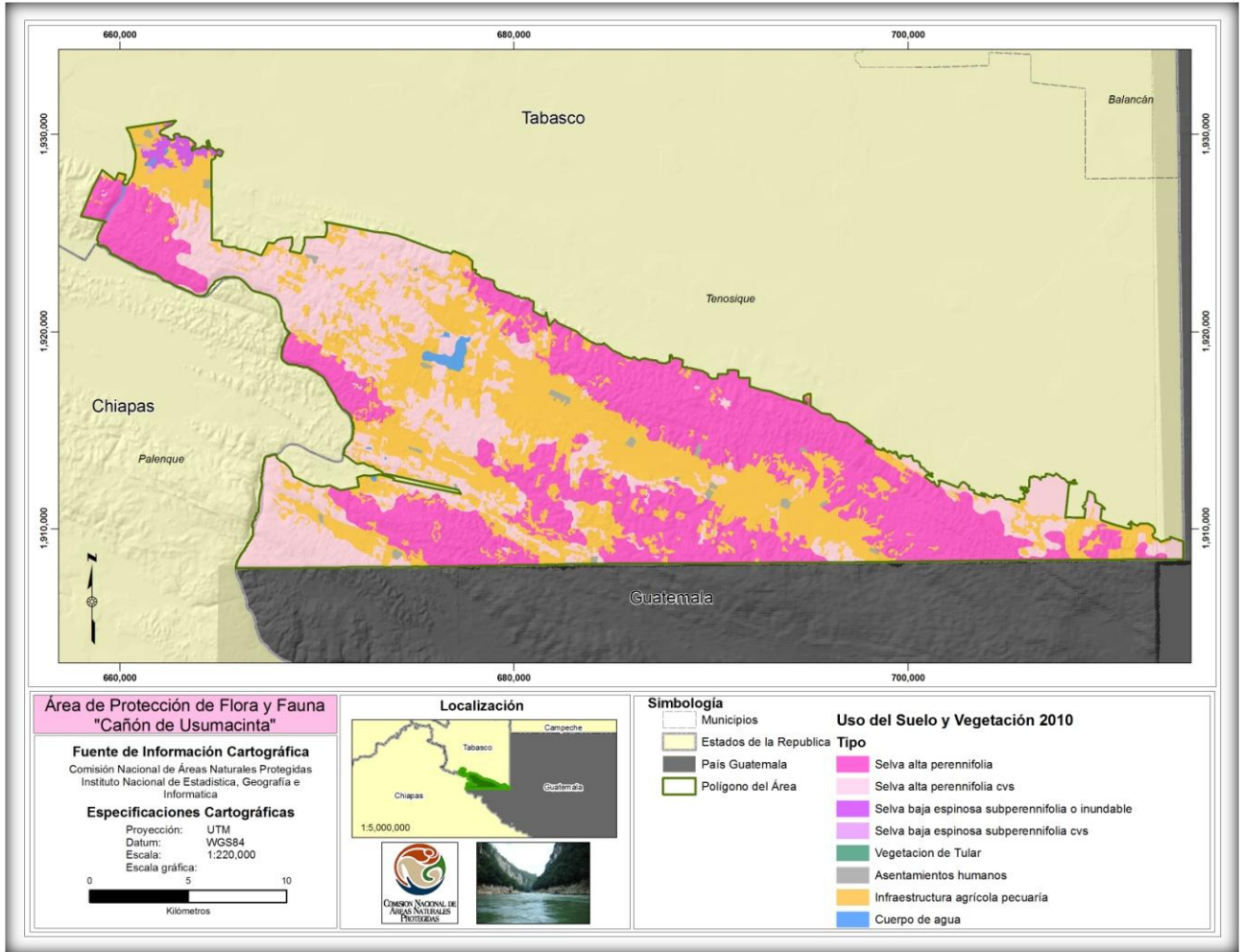


Figura 13.- Clasificación del año 2010 para el APFF Cañón de Usumacinta.



La dinámica de las transformaciones está dada por las matrices de transición que se presenta en las siguientes tablas y figuras, establecidas por los tres periodos 2000-2005, 2005–2008, 2008-2010 y el acumulado en 10 años 2000-2010.

En un periodo de 5 años (2000-2005) (tabla 4) las transformaciones se presentan una deforestación para la infraestructura agrícola-pecuaria, que incluye actividades agrícolas y pastizales para actividades pecuarias, transformando las selvas alta perennifolia, la selva baja espinosa subperennifolia con vegetación primaria y secundaria, así como el tular.

Tabla 4.- Matriz de transición para el Apff Cañón de Usumacinta, periodo 2000-2005.

Matriz de Cambio Cañón de Usumacinta 2000-2005	Selva alta perennifolia	Selva baja espinosa subperennifolia /inundable	Tular	Selva alta perennifolia c/vegetación secundaria	Selva baja espinosa subperennifolia c/vegetación secundaria	Asentamientos Humanos	Infraestructura agrícola- pecuaria	Cuerpo de Agua	Total 2000
Selva alta perennifolia	19,489						41		19,530
Selva baja espinosa subperennifolia /inundable		466					35		501
Tular			4				8		12
Selva alta perennifolia c/vegetación secundaria				12,660			2,064		14,724
Selva baja espinosa subperennifolia c/vegetación secundaria					0				0
Asentamientos Humanos						260			260
Infraestructura agrícola-pecuaria				339			9,971		10,310
Cuerpo de Agua	4			0			67	216	288
<b>Total 2005</b>	<b>19,493</b>	<b>466</b>	<b>4</b>	<b>12,999</b>	<b>0</b>	<b>260</b>	<b>12,187</b>	<b>216</b>	<b>45,625</b>



También se presenta una transformación hacia la revegetación de áreas de Infraestructura agrícola-pecuaria hacia Selva alta perennifolia c/vegetación secundaria. Cambios en el nivel del agua deja al descubierto selva alta perennifolia y áreas que habían sido utilizadas para actividades agrícolas-pecuarias.

La tabla 5 se representa la transformación de la selva alta perennifolia, selva baja subperennifolia y el tular, hacia usos del suelo agrícola-pecuario. El tipo de vegetación más afectado por la actividades humanas en el periodo 2000-2005 fue la Selva alta perennifolia c/vegetación secundaria. En total se transformaron en el periodo 1,805 ha que corresponden a 361 ha/año.

Tabla 5.- Transformación de los tipos de vegetación a usos del suelo en el periodo 2000-2005.

2000-2005	Infraestructura agrícola-pecuaria
Selva alta perennifolia	-41
Selva baja espinosa subperennifolia /inundable	-35
Tular	-8
Selva alta perennifolia c/vegetación secundaria	-1,721
Subtotal	-1,805
<b>Total de cambio en el periodo Ha</b>	<b>-1,805</b>
<b>Total por 5 año Ha</b>	<b>-361</b>



En la figura 14 se puede apreciar las transformaciones que ocurrieron en el Apff Cañón de Usumacinta en el periodo 2000-2005, en color amarillo se presentan todos aquellos cambios que se presentaban hasta el año 2000. En color rojo se presentan las transformaciones que ocurrieron en el periodo de la vegetación a usos del suelo antrópico, en tanto que el verde más intenso representa aquellas áreas que presentan una revegetación. El color verde claro corresponde a aquellas áreas que se mantienen sin cambios.

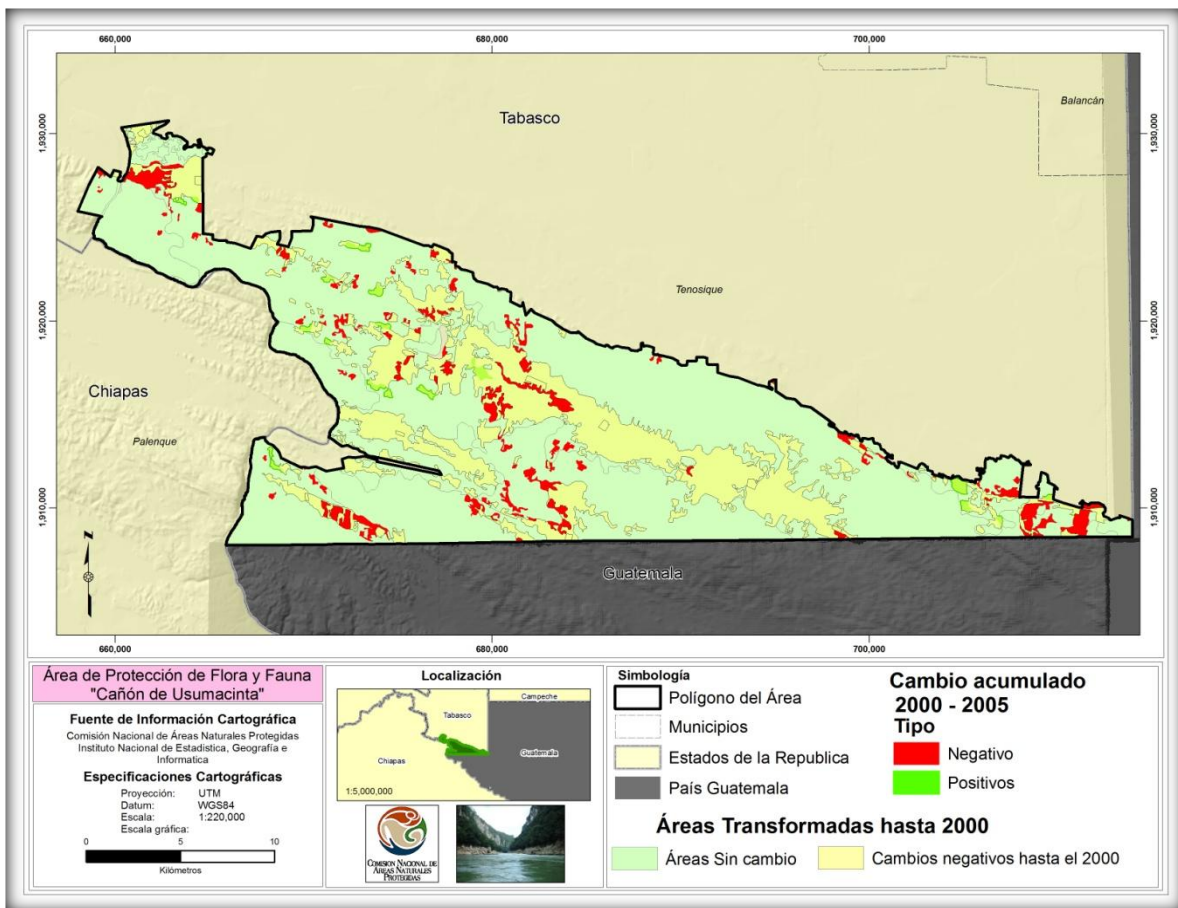


Figura 14.- Transformación en el Apff Cañón de Usumacinta, periodo 2000-2005.



En el periodo 2005-2008 (tabla 6) las transformaciones que se presentan son: perturbación de la selva alta y baja perennifolia con vegetación primaria a vegetación secundaria, así como deforestación para actividades agrícola-pecuaria, que incluye actividades agrícolas y pastizales para actividades pecuarias, transformando las selvas alta perennifolia, la selva baja espinosa subperennifolia con vegetación primaria y secundaria.

También se presenta una transformación hacia la revegetación de áreas de Infraestructura agrícola-pecuaria hacia Selva alta y baja perennifolia c/vegetación secundaria. Cambios en el nivel del agua inundan algunas porciones de selva baja perennifolia y áreas que habían sido utilizadas para actividades agrícolas-pecuarias.

Tabla 6.- Matriz de transición para el Apff Cañón de Usumacinta, periodo 2005-2008.

Matriz de transición Cañón de Usumacinta 2005-2008	Selva alta perennifolia	Selva baja espinosa subperennifolia / inundable	Tular	Selva alta perennifolia c/vegetación secundaria	Selva baja espinosa subperennifolia c/vegetación secundaria	Asentamientos Humanos	Infraestructura agrícola-pecuaria	Cuerpo de Agua	Total 2005
Selva alta perennifolia	18,402			37		4	1,050		19,493
Selva baja espinosa subperennifolia / inundable		333			1		121	11	466
Tular			4						4
Selva alta perennifolia c/vegetación secundaria				11,760			1,239	0	12,999
Selva baja espinosa subperennifolia c/vegetación secundaria					0				0
Asentamientos Humanos						260	0		260
Infraestructura agrícola-pecuaria				527	21	8	11,571	59	12,187
Cuerpo de Agua					3		41	172	216
Total 2008	18,402	333	4	12,324	25	272	14,022	242	45,625





La tabla 7 se representa la transformación de la selva alta perennifolia y selva baja subperennifolia, hacia usos del suelo agrícola-pecuario y asentamientos humanos. El tipo de uso de suelo que más afecta los diferentes tipos de vegetación fue el agrícola-pecuario, siendo la selva alta perennifolia la mayor afectada. En total se transformaron en el periodo 1,873 ha que corresponden a 624 ha/año.

Tabla 7.- Transformación de los tipos de vegetación a usos del suelo en el periodo 2005-2008.

2005-2008	Asentamientos Humanos	Infraestructura agrícola-pecuaria	Cuerpo de Agua
Selva alta perennifolia	-4	-1,050	
Selva baja espinosa subperennifolia / inundable		-121	-11
Selva alta perennifolia c/vegetación secundaria		-708	
Selva baja espinosa subperennifolia c/vegetación secundaria		21	
Subtotal	-4	-1,857	-11
<b>Total de cambio en el periodo Ha</b>			<b>-1,873</b>
<b>Total por 3 año Ha</b>			<b>-624</b>



En la figura 15 se puede apreciar las transformaciones que ocurrieron en el Apff Cañón de Usumacinta en el periodo 2005-2008, en color amarillo se presentan todos aquellos cambios que se presentaban hasta el año 2005. En color rojo se presentan las transformaciones que ocurrieron en el periodo de la vegetación a usos del suelo antrópico, en tanto que el verde más intenso representa aquellas áreas que presentan una revegetación. El color verde claro corresponde a aquellas áreas que se mantienen sin cambios. Se presenta una fuerte actividad humana en toda el área, cabe hacer notar que esta situación se ha presentado en otros ANP, en fechas previas al establecimiento, así como en los primeros años después de haber sido establecido como área protegida, ante la incertidumbre que genera la situación ante un ANP.

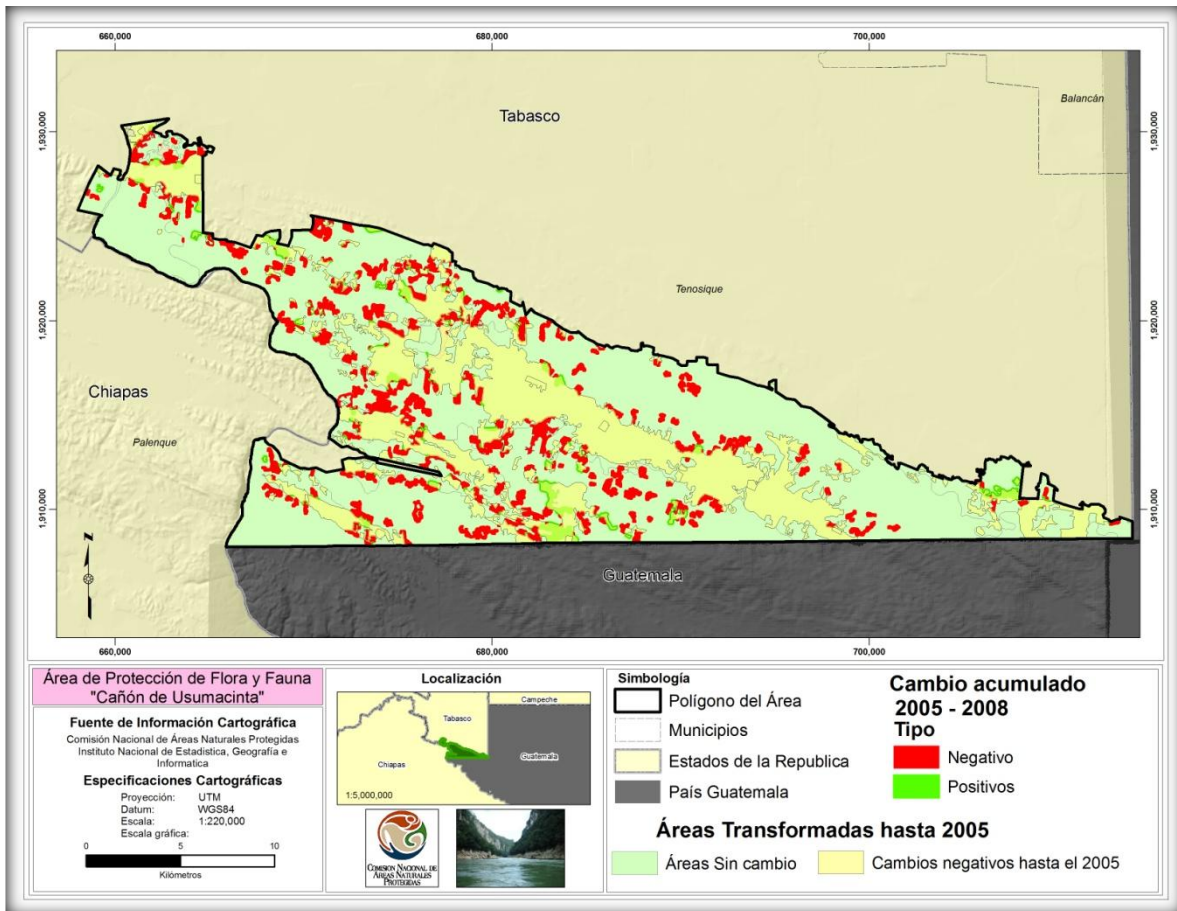


Figura 15.- Transformación en el Apff Cañón de Usumacinta, periodo 2005-2008.



En el periodo 2008-2010 (tabla 8) las transformaciones que se presentan son: perturbación de la selva alta perennifolia con vegetación primaria a vegetación secundaria, así como deforestación para actividades agrícola-pecuaria, que incluye actividades agrícolas y pastizales para actividades pecuarias, transformando las selvas alta perennifolia, la selva baja espinosa subperennifolia con vegetación primaria y secundaria.

También se presenta una transformación hacia la revegetación de áreas de Infraestructura agrícola-pecuaria hacia Selva alta y baja perennifolia c/vegetación secundaria.

Tabla 8.- Matriz de transición para el Apff Cañón de Usumacinta, periodo 2008-2010.

Matriz de Cambio Cañón de Usumacinta 2008-2010	Selva alta perennifolia	Selva baja espinosa subperennifolia / inundable	Tular	Selva alta perennifolia c/vegetación secundaria	Selva baja espinosa subperennifolia c/vegetación secundaria	Asentamientos Humanos	Infraestructura agrícola pecuaria	Cuerpo de Agua	Total 2008
Selva alta perennifolia	17,979			27			397		18,402
Selva baja espinosa subperennifolia / inundable		320			0		13		333
Tular			4						4
Selva alta perennifolia c/vegetación secundaria				11,906			419		12,324
Selva baja espinosa subperennifolia c/vegetación secundaria					25		0		25
Asentamientos Humanos						272			272
Infraestructura agrícola pecuaria				218	16		13,787		14,022
Cuerpo de Agua								242	242
<b>Total 2010</b>	<b>17,979</b>	<b>320</b>	<b>4</b>	<b>12,151</b>	<b>42</b>	<b>272</b>	<b>14,615</b>	<b>242</b>	<b>45,625</b>



La tabla 9 se representa la transformación de la selva alta perennifolia y selva baja subperennifolia, hacia usos del suelo agrícola-pecuario y asentamientos humanos. El tipo vegetación más afectado por las actividades agrícola-pecuario fue la selva alta perennifolia. En total se transformaron en el periodo 594 ha que corresponden a 297 ha/año.

Tabla 9.- Transformación de los tipos de vegetación a usos del suelo en el periodo 2008-2010.

2008-2010	Infraestructura agrícola-pecuaria
Selva alta perennifolia	-397
Selva baja espinosa subperennifolia /inundable	-13
Selva alta perennifolia c/vegetación secundaria	-201
Selva baja espinosa subperennifolia c/vegetación secundaria	16
Subtotal	-594
<b>Total de cambio en el periodo Ha</b>	<b>-594</b>
<b>Total por 2 año Ha</b>	<b>-297</b>



En la figura 16 se puede apreciar las transformaciones que ocurrieron en el Apff Cañón de Usumacinta en el periodo 2008-2010, en color amarillo se presentan todos aquellos cambios que se presentaban hasta el año 2008 fecha en que se establece como ANP. En color rojo se presentan las transformaciones que ocurrieron en el periodo de la vegetación a usos del suelo antrópico, en tanto que el verde más intenso representa aquellas áreas que presentan una revegetación. El color verde claro corresponde aquellas áreas que se mantienen sin cambios.

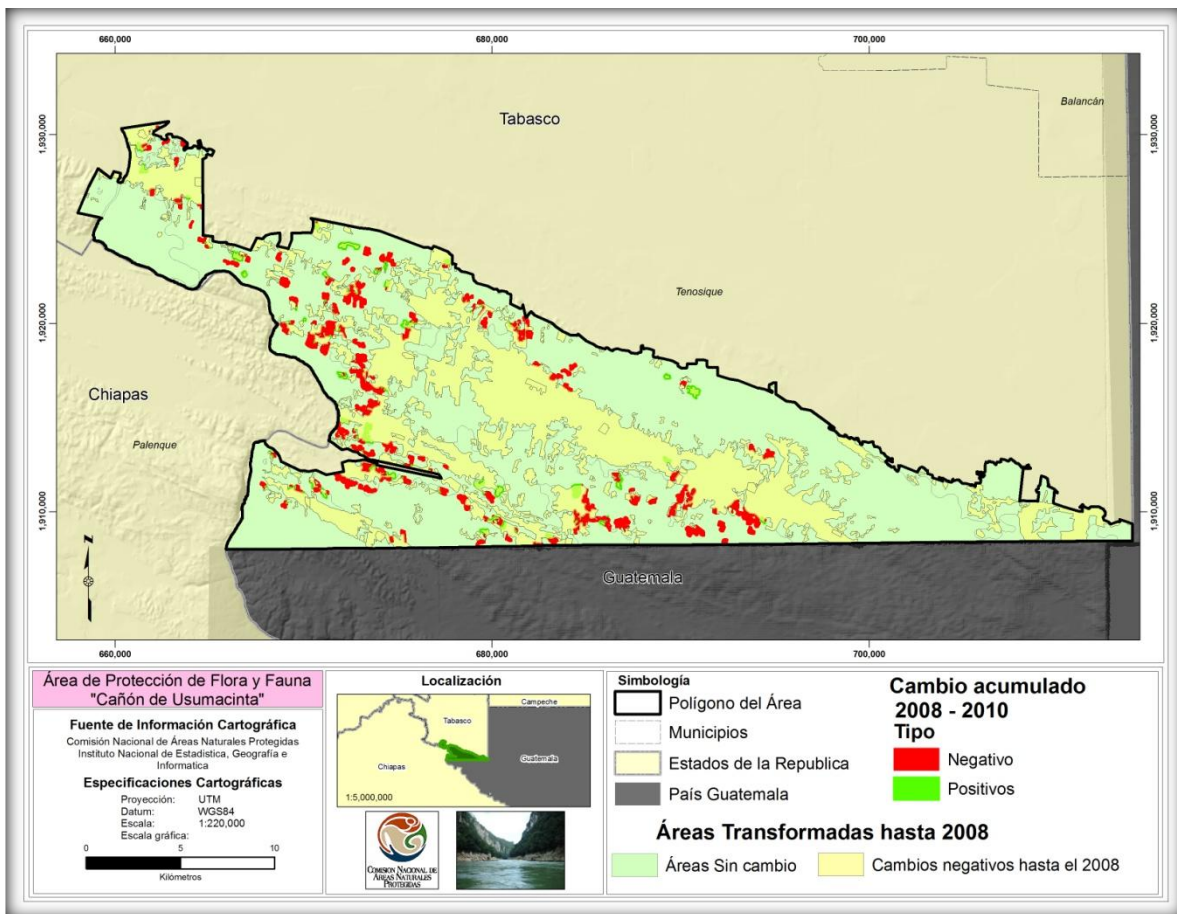


Figura 16.- Transformación en el Apff Cañón de Usumacinta, periodo 2008-2010.



En la tabla 10 se presenta las transformaciones en un periodo de 10 años (2000-2010) (tabla 10) las transformaciones que se presentan son: perturbación de la selva alta y baja perennifolia con vegetación primaria a vegetación secundaria, así como deforestación para actividades agrícola-pecuaria y asentamientos humanos, transformando las selvas alta perennifolia, la selva baja espinosa subperennifolia con vegetación primaria y secundaria, así como el tular.

También se presenta una transformación hacia la revegetación de áreas de Infraestructura agrícola-pecuaria hacia Selva alta y baja perennifolia c/vegetación secundaria. Cambios en el nivel de agua inunda porciones de selva alta y baja subperennifolia, así como áreas ocupadas para actividades agrícola-pecuaria.

Tabla 10.- Matriz de transición para el Apff Cañón de Usumacinta, periodo 2000-2010.

Matriz de Cambio Cañón de Usumacinta 2000-2010	Selva alta perennifolia	Selva baja espinosa subperennifolia / inundable	Tular	Selva alta perennifolia c/vegetación secundaria	Selva baja espinosa subperennifolia c/vegetación secundaria	Asentamientos Humanos	Infraestructura agrícola pecuaria	Cuerpo de Agua	Total 2000
Selva alta perennifolia	17,975			120		4	1,431	0	19,530
Selva baja espinosa subperennifolia / inundable		320			24		146	11	501
Tular			4				8		12
Selva alta perennifolia c/vegetación secundaria				11,403		0	3,317	4	14,724
Selva baja espinosa subperennifolia c/vegetación secundaria					0				0
Asentamientos Humanos						260			260
Infraestructura agrícola pecuaria				628	15	8	9,655	4	10,310
Cuerpo de Agua				0	3		58	227	288
<b>Total 2010</b>	<b>17,975</b>	<b>320</b>	<b>4</b>	<b>12,151</b>	<b>42</b>	<b>272</b>	<b>14,615</b>	<b>246</b>	<b>45,625</b>



La tabla 11, se representa la transformación de la selva alta perennifolia y selva baja subperennifolia, así como el tular hacia usos del suelo agrícola-pecuario y asentamientos humanos. El tipo vegetación más afectado por las actividades agrícola-pecuario fue la selva alta perennifolia con vegetación secundaria. En total se transformaron en el periodo 4,271 ha que corresponden a 427 ha/año.

Tabla 11.- Transformación de los tipos de vegetación a usos del suelo en el periodo 2000-2010.

2000-2010	Asentamientos Humanos	Infraestructura agrícola pecuaria	Cuerpo de Agua
Selva alta perennifolia	-4	-1,431	
Selva baja espinosa subperennifolia /inundable		-146	-11
Tular		-8	
Selva alta perennifolia c/vegetación secundaria		-2,685	
Selva baja espinosa subperennifolia c/vegetación secundaria		15	
Subtotal	-4	-4,256	-11
<b>Total de cambio en el periodo Ha</b>			<b>-4,271</b>
<b>Total por 10 año Ha</b>			<b>-427</b>



En la figura 17 se puede apreciar las transformaciones que ocurrieron en el Apff Cañón de Usumacinta en el periodo 2000-2010, en color amarillo se presentan todos aquellos cambios que se presentaban hasta el año 2008 fecha en que se establece como ANP. En color rojo se presentan las transformaciones que ocurrieron en el periodo de la vegetación a usos del suelo antrópico, en tanto que el verde más intenso representa aquellas áreas que presentan una revegetación. El color verde claro corresponde aquellas áreas que se mantienen sin cambios. Se presenta una dominancia del color rojo que representa cambios negativos con una tendencia a la transformación del hábitat a usos antrópicos.

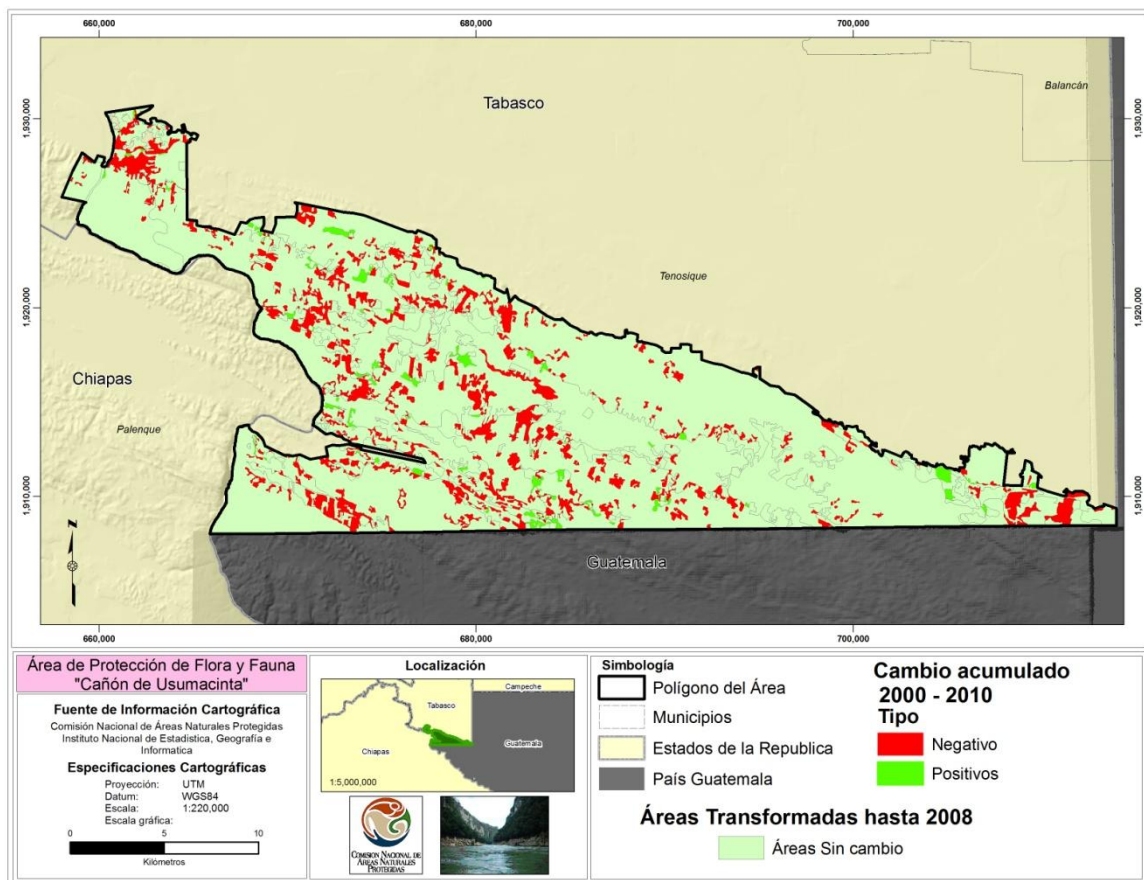


Figura 17.- Transformación en el Apff Cañón de Usumacinta, periodo 2000-2010.





La tasa de transformación del hábitat se presenta en la tabla 12, de los tres periodos, el que presenta una mayor tasa es el periodo 2005 al 2008 con 1.93%. La tasa que se presenta en el periodo 2000-2010 fue de 1.30%, transformándose en el periodo un total de 4,271 ha. La tasa de transformación se encuentra por arriba de la media nacional calculada para el periodo 2000-2005 (0.5%), lo que representa una fuerte actividad de transformación en el área, debido principalmente por actividades antrópicas itinerantes.

Tabla 12.- Cálculo de la tasa de transformación del hábitat para el Apff Cañón de Usumacinta., periodo 2000-2010.

Período	s1	s2	Cambio(HA)	Año	Tasa de cambio	(%) Tasa de cambio anual
2000-2005	34,766	32,961	-1,805	5	0.0106	1.0605
2005-2008	32,961	31,088	-1,873	3	0.0193	1.9312
2008-2010	31,088	30,495	-594	2	0.0096	0.9593
<b>2000-2010</b>	<b>34,766</b>	<b>30,495</b>	<b>-4,271</b>	<b>10</b>	<b>0.0130</b>	<b>1.3023</b>

El comportamiento de la grafica de la figura 18 muestra como aumenta la tasa de transformación del hábitat en el periodo 2005-2008, para posteriormente bajar por debajo del 1%.

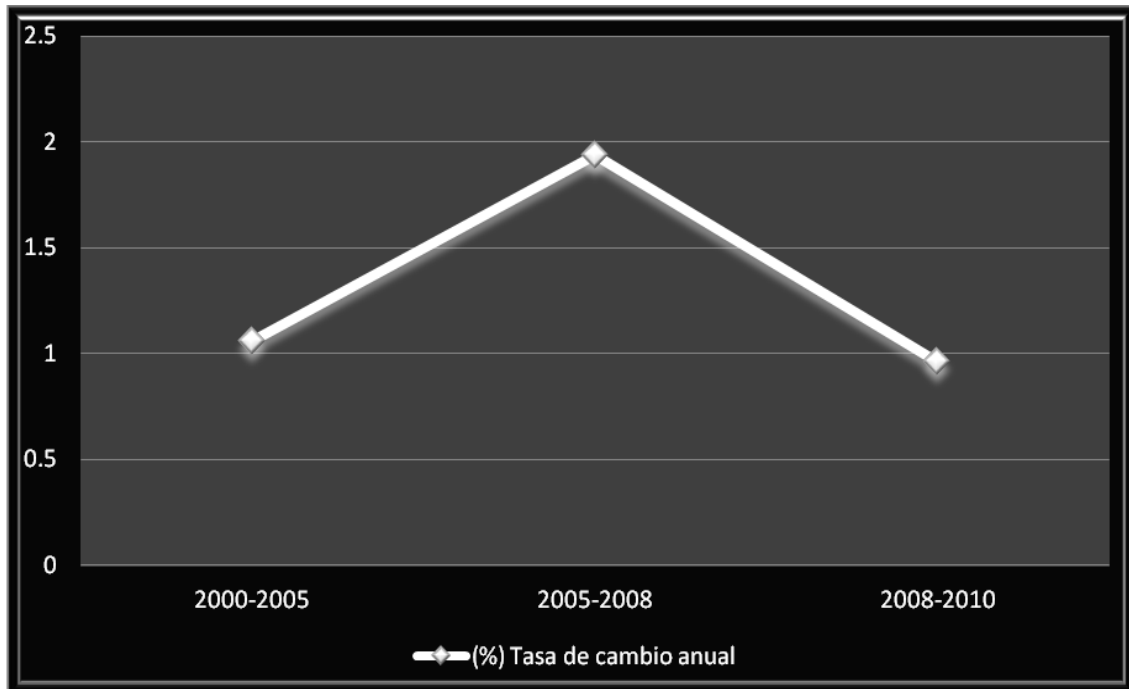


Figura 18.- Tasa de transformación del hábitat entre el 2000-2010 para el Apff Cañón de Usumacinta.



## Conclusiones

El Apff Cañón de Usumacinta que se ubica en el municipio de Tenosique en el estado de Tabasco fue establecida por decreto presidencial en el 2008, con una superficie total de 46,128 ha. Datos obtenidos en este trabajo con base en las coordenadas contenidas en el decreto dan como resultado una superficie total de 45,625 lo que indica una diferencia de 503 ha.

De la clasificación de las imágenes de SPOT, se obtiene que en el año 2008, fecha en que fue establecida el Apff Cañón de Usumacinta presentaba aproximadamente el 68% de cubierta forestal con las diferentes tipos de vegetación y una dominancia de la selva alta perennifolia y el 31% de usos del suelo antrópicos, representado principalmente por áreas dedicadas a la agricultura y la ganadería. Los cuerpos de agua se encuentran poco representados con variaciones en la superficie debido a cambios en los niveles de agua, que en ocasiones inunda algunas porciones de la selva baja espinosa subperennifolia y áreas dedicadas a las actividades agropecuarias.

Se presenta una marcada tendencia a disminuir la cubierta forestal y un incremento de las actividades antrópicas con una predominancia de apertura de la selva en zonas aledañas a aquellas donde ya presentan actividades antropogénicas, dando pie desmontes en forma irregular internandose en la selva con vegetación primaria, para posteriormente darle una forma más regular y cuadrada. Algunos de estos sitios tienen poca actividad siendo abandonadas por lo cual la vegetación llega a producir una revegetación del área.

La tasa de transformación que se presentó en un periodo de 10 años (2000-2010) fue de 1.3% muy por encima de la media calculada para el país en el periodo 2000-2005 (0.4%). Lo que muestra una fuerte actividad de perturbación y deforestación siendo las actividades agrícolas y pecuarias las que mayormente impactan, principalmente sobre la selva alta perennifolia.



Es importante señalar que también se presentan actividades de revegetación lo que denota una actividad de agricultura itinerante (roza-tumba-quema), las áreas son abandonadas a los pocos años lo que permite la revegetación.

En el periodo 2008-2010, ya como área natural protegida, la zona de Cañón de Usumacinta presentó, una tasa de transformación del 0.95%, transformándose en el periodo 594 ha. Este dato se podrá establecer como una línea de base para el futuro, para conocer el impacto que las acciones de conservación tendrán en el área.

Actividades de recuperación podrías dirigirse principalmente en aquellas áreas que han sido abandonadas, ya que permitirán la recuperación a la vegetación primaria en un periodo de tiempo largo.



## Bibliografía

Amezcuca, I., G. Marquez, R. M. Vidal, I. Burgués, S. Cordero y J. Reld. 2007. Tenosique: Análisis económico-ambiental de un proyecto hidroeléctrico en el Rio Usumacinta. *Conservación Estratégica. SERIE TECNICA* **30**:63.

Berry, M. W., R.O. Flamm, B. C. Hazen y R.L. MacIntyre. 1996. The land-use change and analysis system (Lucas) for evaluating landscape management decisions. *IEEE Computational Science & Engineering*, **3**(1): 24-35.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2007. “Protocolo para la evaluación del Uso del Suelo y Vegetación en Áreas Naturales Protegidas Federales de México”. Dirección de Evaluación y Seguimiento – Subdirección de análisis de Información Espacial. México - Julio. 56 p.

CONABIO, 2000. *Estrategia nacional sobre biodiversidad de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 103 pp.

Chavez, P. 1996. Image-based atmospheric corrections - revisited and improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **62**: 1025-1036 p.

Chuvieco E. 2008. *Teledetección Ambiental*. La observación de la Tierra desde el Espacio. 3ra Edición Actualizada Septiembre. Editorial Ariel S.A. España. 595 p.

Diario Oficial de la Federación (OD). 2008. Decreto por el que se declara área natural protegida con la categoría de área de protección de flora y fauna, la región conocida como Cañón del Usumacinta, localizada en el Municipio de Tenosique, en el Estado de Tabasco. SEMARNAT. Primera sección. Lunes 22 de septiembre. 16 p.

Eva, H. and E.F. Lambin. 1998. Burnt area mapping in Central Africa using ATSR data. *International Journal of Remote Sensing*. **19**(18): 3473-3497 p.

FAO. 1996. Forests resources assessment 1990. Survey of Tropical Forest Cover and Study of Change Processes. *Forestry Paper* **130**. Rome: FAO.

FAO. 2002. Evaluación de los recursos forestales mundiales y Informe Principal. Estudio.

FAO. 2005. *Situación de los Bosques en el mundo*. Roma. 156 pp.



García, M.T.J y Mas, J.F. 2008. Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. ISSN 0188-4611, No. **67**, 7-19 p.

Iñigo, E., C.C. Macías, A.L. Patrocinio, C.R. Jiménez, y P.E. Hernández. 2004. Evaluación del estado de conservación del hábitat de la guacamaya roja (*Ara macao cyanoptera*) 1979-2003 en la Selva Maya de México. PRONATURA-Chiapas A.C., Cornell Lab of Ornithology, Conservación Internacional, United States Agency for International Development, Defensores de la Naturaleza, CONAP y Wildlife Conservation Society. San Cristóbal de las Casas, Chiapas.

Lazcano, B., M., E. Góngora-Arones, y R. Vogt. 1992. Anfibios y reptiles de la Selva Lacandona. En: Vásquez-Sánchez, M. y M. Ramos (eds). Reserva de la Biosfera Montes Azules, Selva Lacandona: Investigación para su conservación. *Ecosfera* **1**:135-172.

LGEEPA, 2007. Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente. México, Publicado en el Diario Oficial de la Federación, México 5 de julio del 2007.

Lut, D., P. Mausel, E. Brondizio and E. Morán. 2002. Assessment of atmospheric correction methods for Landsat TM data applicable to Amazon basin LBA research. *International Journal of Remote Sensing* **23**: 2651–2671 p.

Mittermeier, R. Y C. Goettsch Mittermeier, 1997. *Megadiversidad, Los países biológicamente más ricos del mundo*. CEMEX, México.

Masera, O. R. 1996. Deforestación y degradación forestal en México. *Documentos de trabajo 19*. GIRA A. C., Pátzcuaro, México. (Enero). 37 pp.

Noble, I.R. y R. Dirzo. 1997. Forest as human dominated ecosystem. *Science* **277**:522-525.

Paniagua, I. 2009. Análisis híbrido para la identificación anual de cambios en la cubierta del suelo: La Chinantla, Oaxaca, 2004-2005. Tesis de Licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.

Prieto, A, G. Bocco, M. Mendoza y A. Garrido. 2008. Propuesta para la generación semiautomática de unidades del paisaje. Fundamentos y métodos. 1ra Edición. Editorial Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología. México. 98 p.



Ramírez, M.I. y R. Zubieta. 2005. Análisis regional y comparación metodológica del cambio en la cubierta forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Reporte Técnico preparado para el Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca. México D.F. Septiembre 2005. 52 pp.

Rzedowski, J. 1983. *Vegetación de México*. Ed. Limusa. México. D.F. 432 p.

Salitchev, K. A. 1979. *Cartografía*. Editorial Pueblo y Educación, MES, Ciudad de La Habana, Cuba. 24-27 y 54-126 p.

SEMARNAP, 1997. *Ley Forestal*. México. 51 p.

SEMARNAT, 2005. *Informe de la Situación del medio ambiente en México*. Compendio de estadísticas ambientales. México 380 pp.

SEMARNAT. 2009. Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2004-2009. México.

Smith, M.S. 2004. How to convert ASTER radiance values to reflectance. En online guide. En: University of Idaho, <http://www.cnrhome.uidaho.edu/default.aspx?pid=85984>. 3 p.; consulta: junio 2010.

Universidad Autónoma de México (UNAM). 2000. Informe del Inventario Forestal Nacional 2000-2001. Instituto de Geografía México, 266 p.

Utah State University Remote Sensing (USU) /GIS Laboratory. 2008. Image standardization: at-sensor reflectance and COST correction. USU, Logan, UT. Online: <http://ftp.nr.usu.edu/imagestd>, Consultado en mayo 2010.

Velasco, T.B.P. 2010. Tasa de Transformación del Hábitat en el Área Natural Protegida: “Bosque La Primavera”, México, provocada por actividades antropogénicas (incendios) en el periodo: 2005 al 2009. Tesis de Máster en Tecnologías de la Información Geográfica. CONANP-Universidad de Alcalá de Henares. Julio. 23p.

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

Warner, T. 2008. Conversion of Landsat DN to reflectance using the CosT approach. University of West Virginia.