UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN GEOGRAFÍA

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

MONITOREO DE LA DEFORESTACIÓN CON LA METODOLOGÍA DETER, EN LOS CHIMALAPAS, OAXACA.

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

M A E S T R O E N G E O G R A F Í A

(ORIENTACIÓN EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL)

P R E S E N T A :

IGNACIO GONZÁLEZ GUTIÉRREZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. JEAN FRANÇOIS MAS CAUSSEL

CIGA
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

MORELIA, MICHOACÁN NOVIEMBRE DE 2009.

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

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.

DEDICATORIA

A mi amado bebé Gael, eres lo máximo Avatar.

A mi esposa Xóchitl C. Ramírez Campanur por los momentos hermosos de nuestras vidas. Gracias por tu apoyo sincero e incondicional y sobretodo gracias por tu amor.

Mención especial merece mi querida Madre Marina Gutiérrez Salazar que siempre está conmigo en las buenas y en las malas, así como mis hermanos Daniel, Erick y Chepina, mi cuñado Toño y mis sobrinos Uriel, Toñito y la nena Amairani.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México que como institución nos brinda el apoyo de obtener una educación de excelencia.

Un apoyo importante en la realización de esta tesis fue el del proyecto SEP-CONACyT con clave 47198 denominado "Un sistema de monitoreo de la deforestación en México".

De manera muy especial y sincera al mi asesor el Dr. Jean François Mas Caussel por haberme inducido por el camino de la percepción remota y por ser una excelente persona, de todo corazón gracias.

Al Dr. Yosio Edemir Shimabukuro por sus comentarios y recomendaciones en la revisión de la tesis.

A mis sinodales el Dr. Luis Miguel Morales, Dr. Eduardo Treviño Garza y al Maestro José Antonio Navarrete, por aceptar ser parte de mis revisores y por el apoyo brindado desde siempre, gracias.

Mi profundo agradecimiento a todos mis docentes durante la maestría.

Al Maestro Pedro Urquijo y al biólogo Francisco Javier Torres quienes me han apoyado en mi estancia en la ciudad de Morelia.

A Luis Pérez, Yuri Quiroz, Oscar Cruz, Juan Velázquez, Julio Preciado, Felipe Flores, Edgar Talledos, Tzitziki, Jacky Mathews, Ale Acosta, Aredi Santiago y a Eduardo Martínez por su amistad sincera.

INDICE

INTRODUCCIÓN - 1 -

OBJETIVOS - 3 -

OBJETIVOS GENERALES ---------- **3 -**

OBJETIVOS PARTICULARES ---------- **3 -**

CAPITULO 1.- ANTECEDENTES DEL SENSOR MODIS - 4 -

1.1. ANTECEDENTES DEL SENSOR MODIS ---------- **4 -**

1.1.1. ANTECEDENTES DEL EOS ---------- **4 -**

1.1.2. PROGRAMA EOS ---------- 6 -

1.1.3. PLATAFORMA TERRA ---------- 7 -

1.1.4. SENSOR MODIS ---------- 9 -

1.2. LA EXPERIENCIA DEL SENSOR MODIS EN BRASIL ---------- **- 11 -**

1.2.1. PRODES ANALÓGICO ---------- - 12 -

1.2.2. PRODES DIGITAL ---------- - 13 -

1.2.3. DETER ---------- - 14 -

1.3. EL SENSOR MODIS EN MÉXICO ---------- **- 15 -**

1.3.1. CONABIO ---------- - 16 -

1.3.2. CONAFOR ---------- - 17 -

1.4. ANTECEDENTES EN EL MONITOREO DE LA DEFORESTACIÓN CON IMÁGENES MODIS- 18 -

CAPITULO 2: ÁREA DE ESTUDIO - 25 -

2.1. LOS CHIMALAPAS, OAXACA ---------- **- 25 -**

2.1.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA ---------- - 25 -

2.1.2. TOPOGRAFÍA ---------- - 26 -

2.1.3. CLIMA ---------- - 26 -

2.1.4. HIDROLOGÍA ---------- - 27 -

2.1.5. PRINCIPALES TIPOS DE VEGETACIÓN Y USO DE SUELO ---------- - 27 -

2.1.6. RECURSOS FORESTALES ---------- - 28 -

2.1.7. DEFORESTACIÓN ---------- - 29 -

2.1.8. INCENDIOS ---------- - 30 -

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODO - 31 -

3.1. IMÁGENES DE SATÉLITE ---------- **- 31 -**
3.1.1. IMÁGENES ASTER, LANDSAT Y SPOT ---------- - 31 -
3.1.2. MODIS ---------- - 31 -
3.1.3. CATEGORÍAS DE INTÉRES ---------- - 32 -

3.2. PRE-PROCESAMIENTO ---------- **- 33 -**
3.2.1. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA ---------- - 33 -

3.3. PROCESAMIENTO ---------- **- 34 -**
3.3.1. CRITERIO DE SEPARABILIDAD ---------- - 34 -
3.3.2. METODOLOGÍA DETER ---------- - 35 -
3.3.2.1. MODELO LINEAL DE MEZCLA ESPECTRAL (MLME) ---------- - 35 -
3.3.2.2. MÍNIMOS CUADRADOS PONDERADOS ---------- - 37 -
3.3.2.3. IMAGÉNES FRACCIÓN ---------- - 38 -
3.3.2.4. SEGMENTACIÓN ---------- - 38 -
3.3.2.5. EXTRACCIÓN DE REGIONES ---------- - 40 -
3.3.2.6. CLASIFICACIÓN ---------- - 40 -
3.3.2.7. EDICIÓN MATRICIAL ---------- - 42 -
3.3.3. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES SELECTIVO (ACPS) ---------- - 43 -
3.3.4. DIFERENCIA DE BANDAS ---------- - 45 -
3.3.5. MÁSCARA ---------- - 46 -

3.4. EVALUACION DE LA FIABILIDAD ---------- **- 47 -**
3.4.1. FIABILIDAD DEL PRODUCTOR Y DEL USUARIO ---------- - 47 -
3.4.2. EVALUACIÓN DE LOS MAPAS DE CAMBIO ---------- - 48 -

3.5. PERFILES Y SERIE DE TIEMPO ---------- **- 48 -**

CAPITULO 4: RESULTADOS - 49 -

4.1. PRE-PROCESAMIENTO ---------- **- 49 -**
4.1.1. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA ---------- - 49 -

4.2. PROCESAMIENTO ---------- **- 52 -**
4.2.1. EVALUACIÓN DE LA SEPARABILIDAD (DIVERGENCIA TRANSFORMADA) ---------- - 52 -
4.2.2. MÉTODO DETER ---------- - 58 -
4.2.3. ACPS ---------- - 62 -
4.2.4. DIFERENCIA DE BANDAS ---------- - 64 -
4.2.4.1. DIFERENCIA DE NDVI (ÉPOCA SECA) ---------- - 64 -
4.2.4.2. DIFERENCIA DE NDVI (ÉPOCA DE LLUVIAS) ---------- - 65 -

4.3. EVALUACIÓN DE LA FIABILIDAD ---------- **- 67 -**
4.3.1. DETER ---------- - 67 -
4.3.1.1. DETER DE 16 DÍAS (PRIMER MÉTODO DE VALIDACIÓN) ---------- - 67 -
4.3.1.2. DETER DIARIO (PRIMER MÉTODO DE VALIDACIÓN) ---------- - 68 -
4.3.1.3. DETER 16 DIAS (SEGUNDO MÉTODO DE VALIDACIÓN) ---------- - 69 -
4.3.1.4. DETER DIARIO (SEGUNDO MÉTODO DE VALIDACIÓN) ---------- - 71 -
4.3.2. ACPS ---------- - 72 -
4.3.2.1. ACPS AL NDVI (PRIMER MÉTODO DE VALIDACIÓN) ---------- - 72 -
4.3.2.2. ACPS A LA BANDA DEL ROJO (PRIMER MÉTODO DE VALIDACIÓN) ---------- - 73 -
4.3.2.3. ACPS AL NDVI (SEGUNDO MÉTODO DE VALIDACIÓN) ---------- - 74 -
4.3.2.4. ACPS A LA BANDA DEL ROJO (SEGUNDO MÉTODO DE VALIDACIÓN) ---------- - 76 -
4.3.3. DIFERENCIA DE BANDAS ---------- - 76 -
4.3.3.1. DIFERENCIA DE NDVI ÉPOCA SECA (PRIMER MÉTODO DE VALIDACIÓN) ---- - 76 -
4.3.3.2. DIFERENCIA DE NDVI ÉPOCA DE LLUVIAS (PRIMER MÉTODO DE VALIDACIÓN) - 78 -
4.3.3.3. DIFERENCIA DE NDVI EN LA ÉPOCA SECA (SEGUNDO MÉTODO DE VALIDACIÓN) ---------- - 78 -
4.3.3.4. ÉPOCA DE LLUVIAS (SEGUNDO MÉTODO DE VALIDACIÓN) ---------- - 79 -

4.4. SERIE DE TIEMPO Y PERFILES ---------- **- 80 -**

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y RECOMENDACIONES - 82 -

BIBLIOGRAFIA - 86 -

PÁGINAS EN INTERNET - 91 -

ANEXOS 92

ANEXO A.-TABLAS DEL PRIMER MÉTODO DE VALIDACIÓN. ---------- **92**
MÉTODO DETER AL PRODUCTO MOD13 (16 DÍAS) ---------- 92
MÉTODO DETER AL PRODUCTO MOD09 (DIARIO) ---------- 94
ACPS AL PRODUCTO MOD13 (16 DÍAS-NDVI) ---------- 96
ACPS AL PRODUCTO MOD09 (8 DIAS-NDVI) ---------- 97
ACPS AL PRODUCTO MOD09 (DIARIO-NDVI) ---------- 98
ACPS AL PRODUCTO MOD13 (16 DIAS-BANDA DEL ROJO) ---------- 99
ACPS AL PRODUCTO MOD09 (8 DIAS-BANDA DEL ROJO) ---------- 100
ACPS AL PRODUCTO MOD09 (DIARIO-BANDA DEL ROJO) ---------- 101
DIFERENCIA DE NDVI PRODUCTO MOD13 ---------- 102
(ÉPOCA SECA) ---------- 102
DIFERENCIA DE NDVI PRODUCTO MOD13 ---------- 103
(ÉPOCA DE LLUVIAS) ---------- 103

ANEXO B: TABLAS DEL SEGUNDO MÉTODO DE VALIDACIÓN ---------- 104
MÉTODO DETER AL PRODUCTO MOD13 (16 DÍAS) ---------- 104
MÉTODO DETER AL PRODUCTO MOD09 (DIARIO) ---------- 106
ACPS AL PRODUCTO MOD13 (16 DÍAS-NDVI) ---------- 108
ACPS AL PRODUCTO MOD09 (8 DIAS-NDVI) ---------- 109
ACPS AL PRODUCTO MOD09 (DIARIO-NDVI) ---------- 110
ACPS AL PRODUCTO MOD13 (16 DIAS-BANDA DEL ROJO) ---------- 111
ACPS AL PRODUCTO MOD09 (8 DIAS-BANDA DEL ROJO) ---------- 112
ACPS AL PRODUCTO MOD09 (DIARIO-BANDA DEL ROJO) ---------- 113
DIFERENCIA DE NDVI PRODUCTO MOD13 ---------- 114
(ÉPOCA SECA) ---------- 114
DIFERENCIA DE NDVI PRODUCTO MOD13 ---------- 115
(ÉPOCA DE LLUVIAS) ---------- 115

ANEXO C: PERFILES DE LA SERIE DE TIEMPO ---------- 116
A).- PERFILES DE DESMONTE ---------- 116
B).- PERFILES DE FALSO DESMONTE ---------- 118

INTRODUCCIÓN

Desde hace varias décadas se puso de manifiesto que los cambios de cobertura y de uso de suelo influyen directamente en los cambios climatológicos del mundo, provocando el aumento y la intensidad de los desastres naturales en todo el planeta como son: los incendios, las inundaciones, los huracanes, las sequías y el aumento de gases que incrementan el efecto invernadero. En este contexto surgen varias iniciativas por parte de las agencias espaciales más importantes del mundo la ***Agencia Espacial Europea*** (*European Space Agency*, ***ESA), Aeronáutica Nacional y Administración Espacial (****National Aeronautics and Space Administration*, ***NASA)****,* ***Agencia Espacial Canadiense (****Canadian Space Agency*, ***CSA)*** y la ***Agencia Espacial Nacional del Japón*** (*National Space Agency of Japan*, ***NASDA)*** para el monitoreo y la evaluación de los recursos naturales y sus modificaciones en el mundo.

Es así como surgen varios proyectos entre los cuales el más importante y ambicioso es el llamado ***Sistema de Observación de la Tierra (****Earth Observing System*, ***EOS),*** que comandado por la NASA, ha puesto en órbita una serie de plataformas espaciales con diferentes sensores a bordo, que tratan de medir las interrelaciones de energía entre la atmósfera, la hidrosfera y la superficie terrestre.

Dentro de este proyecto sobresale el sensor llamado ***Espectrorradiómetro de formación de Imágenes de Resolución Moderada (****MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*, ***MODIS)*** *a* bordo de las plataformas ***TERRA*** (lanzada en diciembre de 1999) y ***AQUA*** (lanzada en mayo de 2002), que, por sus características espaciales y espectrales, es uno de los más importantes para el monitoreo de los procesos de cambio en el mundo. Estos aspectos son tratados en el primer capítulo.

Uno de los países con mayor número de superficie forestal en todo el mundo es Brasil, en donde la denominada ***Amazonia Legal*** cuenta con más de 4 millones de km^2 de bosques que en su mayoría son selvas tropicales bien conservadas. Sin embargo también es el principal país con mayor deforestación en el mundo, por lo qué, desde la década de los 70´s el ***Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (****Instituto Nacional de Pesquisas Espaciaies*, ***INPE)*** tiene la tarea de monitorear esta región y así poder determinar la extensión y lugar de la deforestación para la acción gubernamental.

El INPE inicialmente basaba su metodología para calcular las tasas de deforestación en la fotointerpretación de imágenes de satélite ***Landsat MSS y TM****.* Esta metodología se le conoce como ***Programa de Cálculo de la Deforestación de la Amazonia (****Projeto de Estimativa do Desflorestamento Bruto da Amazônia,* ***PRODES Analógico)****.* Después el procedimiento se automatizó y se empezaron a utilizar diferentes algoritmos de clasificación digital para la evaluación de la deforestación. A esta metodología automatizada se le conoce como ***PRODES Digital*** y está

basada en el ***Modelo Lineal de Mezcla Espectral (MLME)*** para el cual se siguieron usando imágenes Landsat TM y Landsat ETM+. Sin embargo los resultados de esta metodología son publicados anualmente y se considera que son de carácter informativo, porque los gobiernos federal y estatal no podían anticiparse a los procesos de deforestación teniendo como base esta información.

Por estos motivos el INPE desarrolló una metodología que sirviera como complemento al PRODES Digital llamado ***Detección de Áreas Deforestadas en Tiempo Real (****Projeto de Detecção de Áreas Desflorestadas em Tempo Real,* ***DETER)*** cuya finalidad es detectar la deforestación en tiempo casi real para que las autoridades puedan actuar de forma más rápida y eficaz en el combate a la deforestación. El programa DETER utiliza datos del sensor MODIS que permite tomar una imagen diaria en las latitudes por arriba del trópico, mientras que en las zonas tropicales pasa cada dos días y así se pueden publicar los resultados cada mes.

En este contexto el DETER ha tenido buenos resultados en la prevención y detección de la deforestación y sirve de base para esta investigación ya que lo que se propone en este trabajo es evaluar la metodología DETER en el contexto mexicano, en la zona de estudio ubicada en la región de los Chimalapas, Oaxaca. Las metodologías PRODES y DETER del proyecto se describen en el capítulo 3.

La región en estudio se localiza en la enorme zona selvática conocida como Selva Zoque y corresponde a la parte Oriente de los Chimalapas, abarcando una gran porción del municipio de San Miguel Chimalapa y una parte de Santa María Chimalapa, con poco más de 276,800 hectáreas. En esta zona la vegetación es muy diversa y existe bosque de pino, selva alta perennifolia, selva mediana subcaducifolia, selva baja caducifolia y una parte importante dedicada a la agricultura de riego y de temporal así como grandes zonas cubiertas por pastizales dedicados a la ganadería. Se describe la zona de estudio en detalle en el capítulo 2.

Los resultados del proyecto se presentan y analizan en el capítulo 4. En el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones.

OBJETIVOS

Con base en lo antes expuesto surgen varios objetivos:

OBJETIVOS GENERALES

1. Validar la metodología DETER en el contexto mexicano.
2. Validar los resultados obtenidos de los productos ***MODIS MOD09GQK*** (Reflectancia de la Superficie, datos diarios de 250 m de resolución), ***MOD09Q1*** (que son productos de 8 días con 250 m de resolución). ***MOD13Q1*** (NDVI producidos cada 16 días y 250 m de resolución).

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Utilizar el ***Análisis de Componentes Principales Selectivos (ACPS)*** y la ***Diferencia de Bandas Espectrales*** como métodos alternos de cambio para compararlos con los resultados de la metodología DETER.
2. Utilizar los productos MODIS de la versión ***005*** para evaluar su calidad.

CAPITULO 1.- ANTECEDENTES DEL SENSOR MODIS

1.1. ANTECEDENTES DEL SENSOR MODIS

1.1.1. ANTECEDENTES DEL EOS

En la Convención de Estocolmo de 1972 dedicada al Medio Ambiente se involucraron a los distintos formadores de opinión, que en su mayoría eran políticos y científicos de varias partes del mundo. En esta convención se puso de manifiesto que las actividades humanas podían modificar al clima y a los diferentes ecosistemas, provocando alteraciones ecológicas y ambientales a escala global (Rudorff et al., 2007).

Esta convención trajo como consecuencia que la comunidad científica se interesara en realizar una serie de investigaciones para la atmósfera, la hidrosfera y la superficie terrestre y sus interacciones para poder entender de manera más eficiente las consecuencias de las actividades humanas en el planeta. Con estos antecedentes en 1986 Estados Unidos, Europa, Japón y Canadá formaron el ***Grupo de Trabajo de Coordinación Internacional-Observación de la Tierra (****Earth Observation-International Coordination Working Group,* ***EO-ICWG)*** para coordinar planes de observación y monitoreo de la Tierra (Sadeh, 2002).

Los acuerdos técnicos, científicos, programáticos y de coordinación política del EO-ICWG fueron presentados en dos diferentes formas, los acuerdos Multilaterales y los acuerdos Bilaterales. Con esta serie de acuerdos el EO-ICWG expandió su propuesta y en 1988 estableció una misión de órbita polar llamada ***Sistema Internacional de Observación de la Tierra (****International Earth Observing System,* ***IEOS),*** con fuerte colaboración de la comunidad científica en ciencias de la Tierra de las diferentes agencias espaciales involucradas. De acuerdo con Sadeh (2002), esta misión tiene como principal objetivo el monitorear de forma constante la totalidad de la superficie terrestre y así poder elaborar modelos climáticos y determinar los factores del cambio de uso de suelo y sus consecuencias. En la tabla 1 se aprecian las diferentes misiones del IEOS.

Tabla 1: *Sistema Internacional de Observación de la Tierra* (International Earth Observing System, IEOS).

PAÍS O REGIÓN	AGENCIA	MISIÓN
Estados Unidos	NASA	EOS-AM (Terra), EOS-PM (Aqua) y EOS-CHEM (Aura)
Estados Unidos	NOAA	Polar-Orbiting Operational Environmental Satellite (POES NOAA-N series)
Europa	ESA	Environmental Satellite (Envisat)
Europa	EUMESAT	Meteorological Operational Platform (METOP)
Japón	NASDA	Advanced Earth Observing Satellite (ADEOS)
Japón y Estados Unidos	NASDA Y NASA	TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)
Canadá	CSA	Contribuciones al Terra y al Envisat

También existen otras misiones internacionales fuera del contexto del IEOS, pero que pueden ser complementarios a la observación de la Tierra como el ***Radiómetro de Exploración en el Sentido de la Trayectoria (****Along Track Scanning Radiometer****, ATSR),*** el ***Espectrómetro de Imágenes de Media Resolución (****Medium Resolution Imaging Spectrometer****, MERIS),*** y el ***Satélite de la Tierra (****Land Remote-Sensing Satellite****, Landsat)*** (Kaufman et al., 1998), así como un gran aumento en el número de científicos especialistas para hacer uso de estos datos y estudiar los procesos medioambientales.

Proyectos para el monitoreo de coberturas globales se vienen realizando desde finales de la década de los 80. Como ejemplo se tiene el ***Programa Internacional para la Geósfera y la Biósfera (****International Geosphere Biosphere Programme****, IGBP)*** para mapear la cobertura de la Tierra usando datos del ***Radiométro Perfeccionado de Muy Alta Resolución (****Advanced Very High Resolution Radiometer****, AVHRR)*** que cuenta con una resolución espacial de 1.1 kilómetros.

Otro proyecto más reciente para generar una base de datos a escala mundial lo desarrolló la ESA y es el llamado ***Cobertura de la Superficie Terrestre 2000 (****Global Land Cover,* ***2000),*** que es producto de un grupo de agencias espaciales europeas coordinado por el ***Centro de Investigación Comunitario de la Comisión Europea*** *(European Comission Joint Investigation Center)****.*** Este proyecto está basado en los productos diarios del ***SPOT 4 VEGETATION*** de un kilómetro de resolución espacial (Bartholomé y Belward, 2005).

Proyectos como ***Evaluación de los Recursos Forestales 2000 (****Forest Resource Assessment* ***2000)*** de la ***FAO***, o el de Proyecto para los ***Cambios de la Vegetación Tropical (TREES PROJECT***) son también de escala global.

1.1.2. PROGRAMA EOS

Como se muestra en el cuadro anterior uno de los acuerdos del EO-ICWG en la década de los 80 fue la creación de una misión espacial denominada ***Sistema de Observación de la Tierra (****Earth Observing System****, EOS),*** que pondría en órbita tres plataformas EOS-AM (Terra), EOS-PM (Aqua) y EOS-CHEM (Aura) para el estudio de los cambios globales, esta misión es desarrollada por la NASA.

Con los resultados de una ardua investigación en aplicaciones medioambientales y con el apoyo de los sensores activos en ese momento, en 1988 se consultó a las distintas agencias espaciales así como a la comunidad científica internacional para seleccionar de manera formal cada uno de los sensores a bordo de las diferentes plataformas que conformarían el EOS. De esta manera se seleccionaron las plataformas y sensores con sus respectivos ***"Equipos de Ciencia",*** además de una serie de Proyectos de ***"Investigaciones Interdisciplinarias"*** por parte de la NASA. Sadeh (2002) menciona que las selecciones fueron hechas públicas en 1989, y la autorización por parte del gobierno de los Estados Unidos hacia la NASA para autorizar el EOS y sus sensores se dio en Octubre de 1990.

El EOS marcó el desarrollo de la ciencia y la tecnología con la creación de plataformas orbitales con varios sensores a bordo para colectar diferentes tipos de datos relacionados al medio ambiente. De acuerdo con Rudorff et al. (2007) estas plataformas fueron desarrolladas para operar por un largo período de tiempo, y fue establecido que las plataformas del EOS deberían operar por un período de 15 años con una misma configuración.

Una gran ventaja del EOS es que fue concebido con la participación de un amplio grupo de trabajo que fue el llamado ***Grupo de Trabajo Interdisciplinario (****Interdisciplinary Working Group,* ***IWG)*** lo cual contribuyó a que el proyecto fuera creado con tres amplios componentes:

1) ***Ciencia de observación de la Tierra.*** Es la parte teórica-científica encargada del entendimiento de los procesos de cambio del clima global y de las investigaciones de los fenómenos que los causan. Estas incluyen el ciclo de agua, ciclo de energía, océano, química de la tropósfera, las tres capas de la estratósfera, la interacción de los ecosistemas tierra-agua y los procesos glaciares.

2) ***Sistema de Información de la Tierra (Plataformas y Sensores).*** Se propuso el lanzamiento de las plataformas EOS-AM, EOS-PM y EOS-CHEM con sus respectivos sensores.

3) ***Sistema de control de datos e informaciones*** *(Earth Observing System Data and Information System,* ***EOSDIS****).* Esta es la componente del EOS que tiene la función de controlar las plataformas y sus sensores, recibir pedidos de usuarios, hacer y planificar la observación, procesar, archivar y distribuir los datos colectados (Rudorff et al., 2007).

Según Sadeh (2002), la política para el manejo de datos del EOSDIS se basa en dos estatutos:

a) la no discriminación y b) la no exclusividad.

La no discriminación está basada en la idea de un trato igual para todos los usuarios potenciales en términos de acceso y el uso de los datos al más bajo costo posible, para aplicaciones de investigación y para el beneficio público.

La no exclusividad se refiere a que nadie debe hacer un uso indebido de los datos, y que las investigaciones realizadas deben ser publicadas en la literatura científica y deben ser de libre acceso.

Es así como la primera plataforma llamada ***EOS-AM,*** a la cual posteriormente se le cambiaría el nombre a Terra, fue prevista para ser lanzada en agosto de 1998 (aunque se retardó y finalmente fue lanzada el 18 de diciembre de 1999). Su complemento el ***EOS-PM*** (posteriormente se le cambió el nombre a Aqua) cuyo lanzamiento era previsto en el año 2000 se puso finalmente en órbita el 4 de mayo de 2002. Estas dos plataformas llevan consigo al sensor ***Espectrorradiómetro de Formación de Imágenes de Resolución Moderada*** **(***MODerate resolution Imaging Spectroradiometer* **MODIS).**

1.1.3. PLATAFORMA TERRA

La novedad del EOS es que por primera vez en un programa espacial, los sensores fueron definidos por los científicos de las áreas de Ciencias de la Tierra. El equipo de EOS ciencia, hizo notar que los datos globales del Terra deberían ser útiles para hidrología, oceanografía, meteorología y otras disciplinas afines (Vincent et al., 1989). Así los principales objetivos de investigación del programa EOS contemplados en la plataforma Terra incluyen el estudio de nubes, aerosoles, balance de radiación, ciclo del carbono, cambio de uso de suelo, estudios multitemporales, entre otros.

La órbita de la plataforma Terra es cuasi-polar con inclinación de 98,2° y es helio-sincrónica pasando por el Ecuador a las 10:30 horas de la mañana en su órbita descendente, tiene una altitud media de 707 Km y su peso es de 5,190 Kg (Running et al., 1994).

Esta plataforma tiene a bordo cinco sensores:

- ***CERES (Clouds and the Earth´s Radiant Energy System):*** dependiente de la NASA, consiste de dos radiómetros de barrido de banda ancha dedicados a la medición del balance de radiación de la Tierra y a la estimación de propiedades de las nubes.
- ***MODIS* (*Moderate resolution Imaging Spectroradiometer):*** dependiente de la NASA, es un sensor multiespectral con 36 bandas.
- ***MISR (Multi-angle Imaging Spectro Radiometer):*** dependiente de la NASA., es un sensor compuesto de nueve cámaras que obtienen imágenes en nueve diferentes ángulos.
- ***ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer):*** dependiente de Japón, es un sensor que utiliza un radiómetro de barredura que tiene tres telescopios.
- ***MOPITT (Measurement of Pollution in the Troposphere):*** dependiente de Canadá, es el primer sensor que utiliza espectroscopia de correlación para gases, el sensor mide la radiancia emitida y reflejada por la Tierra en tres bandas espectrales.

En la tabla 2 se aprecian algunos datos comparativos de los diferentes sensores que componen la plataforma Terra.

Tabla 2: Características de los 5 sensores de la plataforma Terra.

SENSOR	ASTER	MODIS	MISR	CERES	MOPITT
AGENCIA	NASA-Ministerio de Industria y Comercio Internacional de Japón.	NASA	NASA	NASA	CSA
RESOLUCIÓN ESPACIAL	15 m. en el visible 30 m. en el infrarrojo de onda corta 90 m. en el infrarrojo térmico	250 m. (2 bandas) 500 m. (5 bandas) 1,000 m. (29 bandas)	De 275 m. a 1.1 km.	20 km	22 km
RANGO ESPECTRAL	14 bandas 0.5 nm. a 12 nm.	36 bandas 0.4 nm. a 14 nm.	4 bandas 0.446 nm. 0.558 nm. 0.672 nm. 0.866 nm.	3 bandas 0.3-5.0 nm. 8.0-12 nm. 12-200 nm.	3 bandas 2.3 nm. 2.4 nm. 4.7 nm.
COBERTURA	60 Km.	2330 Km.	360 Km.	2330 Km.	640 Km.
RESOLUCIÓN TEMPORAL	16 días	Diario excepto en el Ecuador	6 a 9 días	diario	3-4 días
PRINCIPALES MEDIDAS	Composición y temperatura de la superficie terrestre.	Superficie terrestre, océanos y atmósfera global.	Aplicación de imágenes multivista para la tierra, la atmósfera y el océano.	Radiación solar, térmica y fuentes de radiación total, nubes y fuerzas radiactivas.	Distribución Global de CO y CH4.

Cada uno de estos instrumentos tiene características específicas que en conjunto forman un gran apoyo para la observación de la Tierra.

1.1.4. SENSOR MODIS

Cuando se seleccionaron los instrumentos para la plataforma Terra, el sensor MODIS fue diseñado por un equipo interdisciplinario de científicos con vasta experiencia en sensores remotos, se definieron los requisitos para la colección, calibración y procesamiento de los datos (Rudorff et al., 2007).

El concepto de MODIS tiene su origen en varios sensores precursores, tales como el ***Landsat Barrido Multiespectral*** *(Multispectral Scanner,* ***MSS****),* ***Mapeador Tematico*** *(Thematic Mapper,* ***TM****),* ***Sonda de Infrarrojo de Alta Resolución*** *(High Resolution Infrared Sounder,* ***HIRS****),* ***Radiométro Perfeccionado de muy Alta Resolución (****Advanced Very High Resolution Radiometer,* ***AVHRR)*** y el ***Barredor de Color de la Zona Costera*** (*Coastal Zone Color Scanner,* ***CZCS).***

El principal de ellos es el AVHRR a bordo de los satélites de la ***Administración Nacional del Océano y la Atmósfera (****National Oceanic and Atmospheric Administration,* ***NOAA),*** que comenzó a enviar información desde 1978 para el monitoreo del tiempo atmosférico. Debido a las adquisiciones diarias de imágenes por este sensor fue posible crear una base de datos globales con una historia de más de dos décadas de colecta de información.

Otro sensor antecedente del MODIS fue el CZCS que contaba con seis bandas espectrales para captar variaciones de la reflectancia en las aguas oceánicas. El CZCS operó de Noviembre de 1978 a Junio de 1986 y fue seguido por el ***Sensor de Campo Amplio para la Observación del Mar (****Sea-Viewing Wide Field Sensor****, SeaWiFS)*** lanzado en agosto de 1997 (Rudorff et al., 2007).

Con estos antecedentes surgió el sensor MODIS que es el principal instrumento del EOS y por consiguiente de la plataforma Terra. Según Running et al. (1994) dentro de los requerimientos del sensor MODIS se refirió que la obtención de datos debería ser diaria, con una cobertura global de 250, 500 y 1,000 metros de resolución espacial, y que cubriera un amplio rango del espectro electromagnético abarcando desde el visible hasta el infrarrojo térmico y así poder medir las variaciones en la tierra, la atmósfera y el océano, de manera diaria, semanal y mensual.

Este sensor posee una alta sensibilidad radiométrica (12 bits) en 36 bandas espectrales contenidas en el intervalo que va de los 0,40 a los 14,40 nanómetros del espectro electromagnético. Dos bandas son adquiridas con resolución espacial de 250 m. otras 5 bandas con resolución de 500 m. y las demás 29 bandas con resolución de 1 km. (Rudorff et al., 2007).

Es así qué, en el sensor MODIS las primeras 19 bandas están posicionadas en la región del espectro electromagnético situado entre 400 nm. y 2,150 nm. de forma que:

- Las bandas 1 a la 7 están diseñadas para las aplicaciones terrestres;
- las bandas 8 a la 16 para las observaciones oceánicas,
- las bandas 17 a la 19 para las mediciones atmosféricas,
- las bandas 20 a la 36 que cubren la porción térmica del espectro miden la temperatura de la superficie terrestre (útil para detecciones de calor por incendios o erupciones volcánicas, entre otras) (Running et al., 1994).

Las características de estas bandas permitieron el desarrollo inicial de 44 productos MODIS disponibles en Internet en el portal http://wist.echo.nasa.gov/api/ para las investigaciones de varias disciplinas y actualmente están siendo utilizados para el estudio de cambios globales.

Desde el día 17 de marzo del año 2000 la plataforma Terra transmite continuamente los datos del sensor MODIS para las estaciones de recepción terrestres. En estas estaciones los datos MODIS son divididos en seis niveles (0 a 4) dependiendo del grado de procesamiento realizado:

- **Nivel 0:** Son los datos brutos sin ningún tratamiento.
- **Nivel 1A:** Son los productos que contienen las 36 bandas utilizadas como datos de entrada para geolocalización, calibración y procesamiento.
- **Nivel 1B:** Son los productos que contienen los datos de calibración y geolocalización para las 36 bandas generadas por el nivel 1A. Datos adicionales incluyen estimaciones de calidad, del error y datos de calibración.
- **Nivel 2:** Son los productos derivados de las radiancias calibradas de productos previos MODIS y son conocidos como niveles 2G (L2G).
- **Nivel 3:** Son los productos espacialmente remuestreados y compuestos para un determinado tiempo para producir una estimación de las variables geofísicas para cada grado de localización.
- **Nivel 4:** Son los productos generados por la incorporación de los datos MODIS en modelos, para así, estimar variables geofísicas (Rudorff et al., 2007).

De estos productos esta investigación está basada en la versión 005 que nos permitirá avanzar en el conocimiento de las diferentes cualidades del sensor MODIS.

1.2. LA EXPERIENCIA DEL SENSOR MODIS EN BRASIL

La experiencia en Brasil con datos basados en imágenes MODIS comienza desde 1988 cuando un equipo de investigadores brasileños del INPE estuvo involucrado en un proyecto de investigación interdisciplinar del programa EOS invitado por la NASA, para el análisis de los cambios en la Amazonia. Este equipo de investigadores participó como colaborador en la creación de este sensor. Desde entonces se vienen realizando diferentes aplicaciones de imágenes MODIS (Anticipadas y simuladas incluso antes de su lanzamiento con base en imágenes AVHRR y Landsat TM) por parte del INPE (Rudorff et al., 2007).

A partir de abril de 2004 existe una estación de recepción en Cuibá, Mato Grosso, Brasil, y recibe los datos brutos MODIS de la plataforma Terra. De esta forma la experiencia brasileña con estos datos es desde la recepción, el almacenamiento, el procesamiento de imágenes y la generación de productos en estudios medioambientales.

Es así como a través del INPE se viene realizando una serie de investigaciones con datos MODIS. Estas abarcan desde el estudio de la deforestación, los incendios, las condiciones atmosféricas, mediciones de reflectividad oceánica, monitoreo del cambio de uso de suelo e incluso estudios socioeconómicos que han puesto de manifiesto el gran potencial que tiene el uso de este tipo de imágenes (Rudorff et al., 2007).

Se han venido desarrollando varios ***proyectos metodológicos automatizados*** que intentan cubrir diversos fenómenos relacionados al cambio de coberturas, deforestación e incendios para el monitoreo de la totalidad del territorio brasileño. De estos proyectos nos interesa el denominado ***DETER*** que tiene sus bases metodológicas en un proyecto antecesor llamado ***PRODES Análogico y PRODES Digital*** que se describen a continuación.

1.2.1. PRODES ANALÓGICO

La región de la Amazonia Legal en Brasil abarca los Estados Federativos de Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins y parte del Estado de Maranhão, que suman en conjunto una superficie de alrededor de 5 millones de Km^2. De esta extensión el área forestal ocupa cerca de 4 millones de Km^2 con selvas tropicales primarias. Esta región viene sufriendo cambios en su cobertura forestal desde la década de los 50 cuando se impulsó la agricultura, ganadería y la creación de diversos polos de desarrollo (Câmara et al., 2006).

En ese contexto el INPE viene realizando el monitoreo de esta amplia región desde la década de los 70 por medio de levantamientos aéreos para identificar y calcular la deforestación de manera anual en donde sus principales insumos en esa época fueron la fotografía área y las imágenes Landsat MSS. Sin embargo fue hasta el año 1988 que se aplicó una metodología llamada ***Programa de Cálculo de la Deforestación de la Amazonia (****Projeto de Estimativa do Desflorestamento Bruto da Amazônia,* ***PRODES Analógico)*** y se basaba en la interpretación visual de imágenes Landsat TM, impresas en papel fotográfico y la digitalización de los resultados para calcular las tasas de deforestación. Esta metodología PRODES Analógico se aplicó desde 1988 a 2002.

Sin embargo se presentaban algunas limitaciones en esta metodología como por ejemplo: el gran número de horas-hombre de inversión, la subjetividad del fotointérprete, la dificultad para obtener imágenes libres de nubes, etc. Por estas razones, en el año 1997 se inició el desarrollo de un proyecto automatizado llamado PRODES Digital, que se puso en marcha hasta el año 2003.

1.2.2. PRODES DIGITAL

A pesar de que la metodología del PRODES Digital fue planeada desde 1997, empezó a aplicarse como un programa piloto en 2003 dando buenos resultados en la detección y cálculo de las tasas de deforestación; y desde entonces se realiza año con año. La metodología desarrollada consiste en lo siguientes pasos:

- Selección de las imágenes Landsat TM y/o TM+ de mejor calidad, con menor cobertura de nubes y con fecha de adquisición en la temporada seca del año que abarca de mayo a septiembre en el Hemisferio Sur, con buena visibilidad y adecuada calidad radiométrica.

- Corrección geométrica, la cual se hace de mapa a imagen para la fecha inicial del proyecto, con puntos de control utilizando cartas topográficas escala 1:100,000. En algunas regiones donde no existe la cartografía con esta escala se utilizan las cartas 1:250,000.

- Aplicación del algoritmo ***Modelo Lineal de Mezcla Espectral (MLME)*** para la generación de las imágenes fracción: sombra, vegetación y suelo con las bandas espectrales **TM-3** región del rojo, **TM-4** región del infrarrojo cercano y la **TM-5** región del infrarrojo medio. La imagen fracción muestra la proporción de suelo, sombra y vegetación dentro de cada píxel a partir de la respuesta espectral en cada banda.

- Segmentación de la imagen fracción suelo y/o sombra. La segmentación de imagen es una técnica de agrupamiento de píxeles, en la cual solamente las regiones espacialmente adyacentes y de características espectrales semejantes pueden ser agrupadas.

- Aplicación de una clasificación no supervisada a la imagen segmentada de suelo o sombra según la complejidad del área de estudio, se utiliza el algoritmo ISOSEG implementado en el software SPRING (que es un Software de acceso libre desarrollado por el INPE) donde la discriminación de clases tiene como base los atributos estadísticos de la segmentación.

- Una vez que se tiene la imagen clasificada, se realiza la identificación de los *clusters* (cúmulos) resultantes con la leyenda: forestal, no forestal, deforestación nueva, hidrografía y nubes.

- Finalmente se realiza la Edición Matricial, la cual consiste en corregir los posibles errores de la clasificación con base en la digitalización en pantalla de los píxeles mal clasificados teniendo en cuenta la experiencia del fotointérprete.

Las áreas deforestadas en el PRODES Digital que son detectadas a lo largo del año, son presentadas cronológicamente para mostrar la evolución de las actividades de la deforestación en la Amazonia Legal.

Los resultados de esta metodología son presentados en un mapa final para la región amazónica en escala 1:2,500,000, y para cada Estado se utiliza la escala 1:500,000. Actualmente el INPE proporciona al gobierno y a la sociedad brasileña toda la información producida por el PRODES Digital sobre la localización y la extensión de la deforestación en la Amazonia Legal en la divulgación de sus resultados por Internet en www.obt.inpe.br/prodes

1.2.3. DETER

Como los resultados del PRODES digital son anuales y con un enfoque informativo, se considera qué, son insuficientes para la acción gubernamental y como los datos son por Estado, son publicados cerca de un año después del desmonte, entonces los gobiernos federal y estatal no pueden anticiparse a una posible deforestación.

Es con esos argumentos que surge el Programa ***Detección de Áreas Deforestadas en Tiempo Real (****Projeto de Detecção de Áreas Desflorestadas em Tempo Real,* ***DETER)*** qué, gracias a la cobertura temporal casi diaria del sensor MODIS, permite monitorear en tiempo real las zonas de desmonte y así poder complementar al PRODES.

El proyecto DETER adopta la misma metodología que el PRODES Digital con la novedad de que utiliza imágenes MODIS con resolución espacial moderada (250 m), y con una amplia gama de productos que pueden ser diarios (MOD09GQK), semanales (MOD09Q1) o quincenales (MOD13Q1), permitiendo detectar los focos de deforestación.

Para llevar a cabo esta metodología, inicialmente se puso en marcha un proyecto piloto (mayo de 2004) que dio buenos resultados gracias a los recursos computacionales y a la disponibilidad de imágenes MODIS. Para el año 2005 el DETER paso a ser ejecutado de manera sistemática mes a mes.

La metodología es similar del PRODES Digital y se presentan los siguientes pasos:

- Realización de un mapa base para el año 2004 que muestre las zonas deforestadas hasta entonces. Este mapa inicial sirve para generar una máscara que aísla la región forestal primaria de las demás coberturas y en ese sentido se pueden detectar los nuevos núcleos de deforestación a partir de esa fecha.

- Selección de imágenes libres de nubes del producto diario. La resolución temporal (una imagen cada dos días en latitudes tropicales) permite aumentar la posibilidad de adquirir

imágenes libres de nubes. Otra ventaja es que se utilizan únicamente 10 imágenes para cubrir la Amazonia Legal gracias a que las imágenes MODIS tienen una anchura de 2,300 km.

- Clasificación de las imágenes con los algoritmos ya mencionados en el PRODES Digital (Aplicación del Modelo Lineal de Mezcla Espectral, segmentación de la imagen fracción suelo, clasificación de la imagen segmentada y la realización de la edición matricial).

La finalidad del DETER es proporcionar un sistema operacional de alerta de acción preventiva capaz de identificar y mapear las áreas deforestadas cada mes (tiempo casi real). En otras palabras el DETER computaliza las áreas deforestadas de forma acumulativa de un período al siguiente de tal forma que la máscara de deforestación va aumentando en medida en que aumenta la deforestación arrojando resultados que son publicados mensualmente (Câmara et al., 2006).

El resultado final está disponible en forma de tabla que contiene la información de localización y extensión de las zonas deforestadas. El proyecto DETER provee información acerca de la deforestación ocurrida a lo largo de un año de manera mensual mientras el PRODES Digital mapea y estima la deforestación más precisa pero en forma anual. Esta información presenta un gran potencial para la acción gubernamental ya sea federal o estatal.

El DETER, al igual que el PRODES, es un proyecto del INPE y se inserta en las acciones del gobierno brasileño en el combate a la deforestación de la Amazonia. Los datos se encuentran disponibles sin costo alguno a través de Internet en la dirección www.obt.inpe.br/deter/index.html

1.3. EL SENSOR MODIS EN MÉXICO

En México se hace poca investigación referente a los datos obtenidos de las imágenes MODIS y todavía es escasa la literatura referente al programa TERRA-MODIS. Sin embargo en los últimos años ha habido un aumento considerable en la investigación y desarrollo de estos datos principalmente por instancias gubernamentales y académicas (INE, CONABIO, Instituto de Geografía y CIGA de la UNAM, CONAFOR, SEMARNAT y CONANP). A nivel nacional existen dos dependencias federales que hacen uso de estos datos de manera constante: CONABIO y CONAFOR.

1.3.1. CONABIO

La ***Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO)*** es la primera institución a nivel nacional que hace uso de las imágenes MODIS. Jiménez et al. (2005) mencionan que los antecedentes de su uso se dan a partir de los incendios ocurridos en todo el país en el año de 1998, año en que según estadísticas oficiales se reportaron 14,274 incendios, afectando unas 580,000 hectáreas forestales. Es así como se planteó un proyecto de monitoreo constante en todo el país, para detectar incendios forestales, utilizando imágenes de satélite y publicar diariamente los resultados en la página de esta institución.

Este proyecto se llama ***Programa para la Detección de Puntos de Calor Mediante Técnicas de Percepción Remota***. En primer instancia fueron utilizadas imágenes del ***Programa de Satélites Meteorológicos de Departamento de Defensa- Sistema Operacional de Barrido (****Defense Meteorological Satellite Program-Operational Linescan System* ***DMSP-OPL),*** pero como su disposición no es diaria se dejaron de utilizar. En 1999 se empezaron a procesar imágenes AVHRR con resolución temporal diaria, pero con una resolución espacial de 1.1 Km. Con el lanzamiento de la plataforma TERRA se empezaron a utilizar imágenes MODIS y se amplió la gama de posibilidades para monitorear incendios.

Así en octubre de 2001 se instaló en la CONABIO la primera estación de recepción de imágenes MODIS en América Latina. La estación MODIS comenzó a operar desde mayo de 2002 y recibe imágenes provenientes de las plataformas Terra y Aqua.

El Programa para la Detección de Puntos de Calor Mediante Técnicas de Percepción Remota se realiza en tres etapas:

a) Alerta Temprana: conformada por un índice de propagación de incendios, basado en la comparación de datos históricos del NDVI.

b) Monitoreo: se pública diariamente la ubicación de incendios forestales detectados con imágenes de satélite. En la CONABIO se procesan de 8 a 10 imágenes diarias y son AVHRR, MODIS Aqua y MODIS Terra.

c) Impacto: Se implementó la evaluación rápida de las áreas afectadas aplicando algoritmos de identificación de áreas quemadas, utilizando las mismas imágenes.

Actualmente el sistema publica los incendios detectados en México y América Central diariamente a través de Internet y se tienen estadísticas semanales, mensuales y anuales desde la implementación del proyecto en:
http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/puntos_calor/doctos/puntos_calor.html

1.3.2. CONAFOR

Otra dependencia que hace uso de estos datos de manera regular es la ***Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)*** que es la encargada por ley, de generar la información de las tendencias de cambios en la cubierta forestal del país. En este contexto la CONAFOR desde el año 2004 realiza un inventario nacional de la superficie forestal del país y sus estadísticas son anuales. El inventario más reciente es el 2006-2007 y se puede consultar en Internet en www.cnf.org.mx.

El Inventario Nacional se basa en la siguiente metodología:

- ✓ Selección de las imágenes MODIS del producto MOD09GQK que son los productos diarios, que estén libres de nubes y que sea durante la época seca del año. Estas imágenes se adquieren del servidor de la CONABIO.
- ✓ Realización de la corrección geométrica y selección de las bandas a procesar, que son únicamente la **banda 1** (rojo) y la **banda 2** (infrarrojo cercano) con resolución espacial de 250 m.
- ✓ Procesamiento de los datos para eliminar las nubes y sombras.
- ✓ Generación de una máscara sobre el mar para descartar la superficie marina.
- ✓ Generación de los Índices de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) que es el principal insumo obtenido de las imágenes de reflectancia diaria.
- ✓ Las estadísticas se obtienen basadas en la comparación anual del NDVI, detectando zonas con aumento de vigor vegetal y zonas de disminución del vigor vegetal, que puedan estar relacionadas con procesos de recuperación o degradación.

La leyenda que utiliza la CONAFOR es la siguiente: Sin cambio, Otros cambios, Posible recuperación y Posible deforestación. Los resultados del último inventario 2006-2007 se muestran a continuación:

Tabla 3. Resultados del Monitoreo anual de la cubierta vegetal 2006 a 2007.

LEYENDA	SUPERFICIE EN Ha.
OTROS CAMBIOS	15,960,000
POSIBLE DEFORESTACIÓN	390,000
POSIBLE RECUPERACIÓN	75,000
SIN CAMBIO	49,700,000

Uno de los alcances de este proyecto es generar una base de datos comparable anualmente y con cubrimiento nacional, indicar posibles áreas críticas en las cuales existe una degradación o recuperación de los bosques y selvas del país (CONAFOR, 2007).

1.4. ANTECEDENTES EN EL MONITOREO DE LA DEFORESTACIÓN CON IMÁGENES MODIS

Gracias a las características del sensor MODIS y debido a sus políticas de libre acceso este se ha utilizado con mayor frecuencia en procesos medioambientales del mundo. Para esta investigación se presentan algunos antecedentes que se han publicado para el monitoreo de la deforestación.

a).- Costa y Moreira de Souza (2005) hicieron una comparación entre imágenes Landsat ETM+ y MODIS (MOD13 producto de 16 días) para la detección del aumento de la deforestación en la región del Bajo Acre en Brasil en un área que cubre cerca de 34,225 km^2.

La metodología utilizada por estos autores se muestra en la siguiente figura:

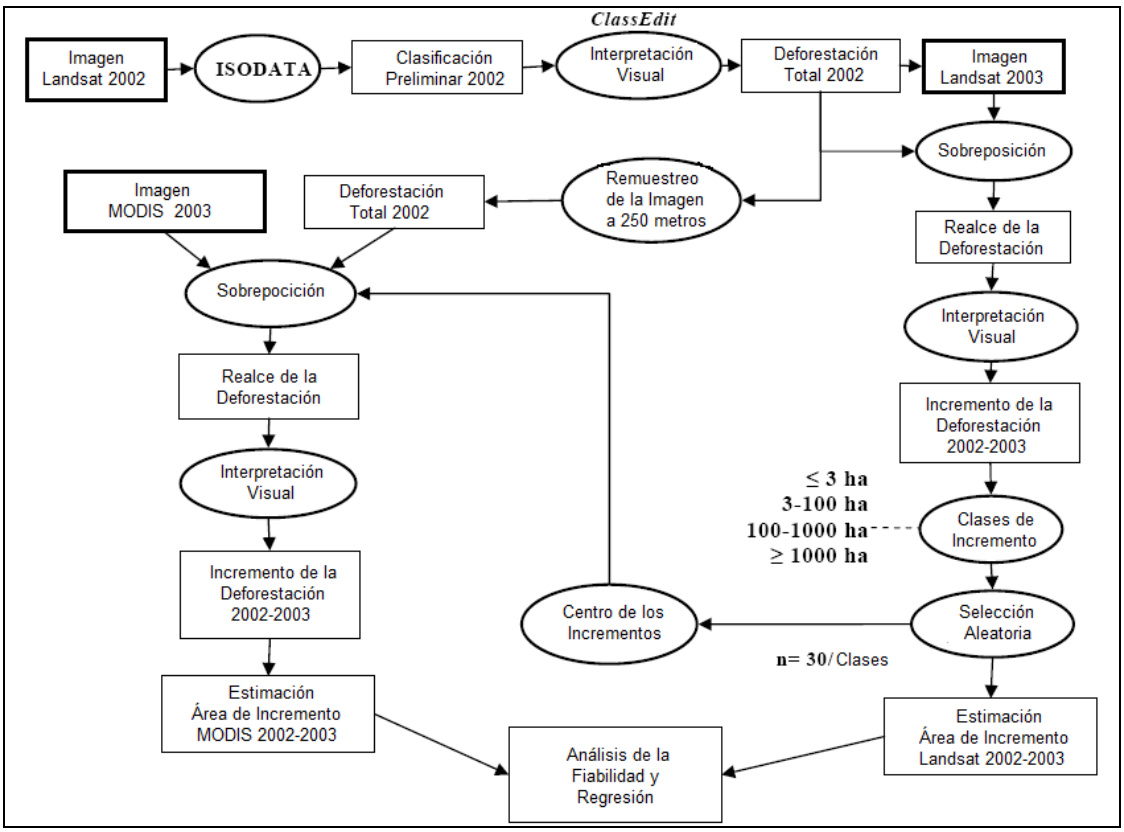


Figura 1.- Metodología utilizada para detectar, mapear y comparar los incrementos de la deforestación con imágenes Landsat ETM+ y MODIS. Se utilizaron dos fechas Landsat 10/08/2002 y 04/07/2003 y el producto MODIS de 16 días que va del 26/06/03 al 11/07/03.

El incremento del desmonte entre los años 2002 y 2003 fue identificado y mapeado con interpretación visual en las imágenes Landsat ETM+, después con esos polígonos de cambio se calcularon los centroides y se sobrepusieron a la imagen MODIS.

Se seleccionaron cuatro clases de tamaño de desmonte y se compararon entre los dos sensores, así se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4: Resultados de la comparación Landsat ETM+ y MODIS. La única clase que no detectó MODIS fue la de menor a 3 hectáreas, en los tres casos restantes detectó el 100 % de lo reportado por Landsat ETM+.

MODIS/LANDSAT ETM+			
≤ 3 ha	3 -100 ha	100-1000 ha	≥ 1000 ha
5/30	30/30	30/30	1/1

Se muestra que las imágenes MODIS con resolución espacial de 250 m. permiten obtener una elevada exactitud para detectar la deforestación en áreas mayores a 3 hectáreas. Además de que pueden ser usadas para estimar la deforestación con desmontes de más de 70 hectáreas con un error de omisión menor al 5% en comparación con las áreas detectadas con imágenes Landsat ETM+. Aunque una de las desventajas del sensor MODIS con respecto a Landsat ETM+ es su menor resolución espacial, diversos autores señalan que muchos de los cambios de las coberturas forestales se realizan en una escala compatible a las 25 hectáreas y coincide con los 250 m. de la resolución espacial del sensor MODIS.

Como parte de los resultados también se estimó que el 86 % del área deforestada entre 2002 y 2003 en todo el estado del Acre puede ser detectada y mapeada con el sensor MODIS. Los autores concluyen que estas imágenes pueden ser útiles para monitorear con mayor frecuencia los cambios de bosque debido a la deforestación en la Amazonia Brasileña superando la baja cobertura temporal de las imágenes Landsat ETM+ y superando la frecuente cobertura de nubes en la región.

b).- Otro estudio, donde se realizó una comparación de resultados obtenidos con MODIS y Landsat ETM+ lo realizaron Morton et al. (2005) para el período 2001–2004 en el estado de Mato Grosso, Brasil. Los productos MODIS utilizados fueron: MOD09 reflectancia diario, MOD13 Índices de Vegetación, MOD44A Conversión de la Cobertura Vegetal y MOD44B Campos Continuos de Vegetación. Donde se utilizaron varias técnicas de detección de cambio, así como imágenes fracción resultado del Modelo Lineal de Mezcla Espectral.

Los resultados muestran una alta fiabilidad del productor cercana al 90%, lo que significa que los diversos métodos detectan el 90% de los desmontes en la zona de estudio, además demuestran que con los datos MODIS es posible identificar más del 80% de los polígonos de deforestación de más de tres hectáreas; y que todos los métodos identificaron los polígonos de más de 20 hectáreas.

El análisis de datos MODIS, señala que son útiles para identificar de manera rápida la localización de las zonas de desmonte con una alta reducción de datos comparados con datos Landsat. Sin embargo MODIS no remplaza la alta resolución obtenida de Landsat y no son tan útiles en la identificación de áreas chicas de desmonte.

c).- Otra comparación entre Landsat ETM+ y MODIS la realizaron Valeriano et al. (2005) quienes compararon la metodología DETER utilizando imágenes MODIS (producto diario MOD09) con los obtenidos por las imágenes Landsat ETM+ en la Amazonia Legal.

El Modelo Lineal de Mezcla Espectral (MLME), (que más adelante será explicado con mayor detalle) se aplicó utilizando 3 componentes (agua, vegetación, suelo) a las siguientes bandas espectrales:

Tabla 5: Bandas utilizadas por los autores.

MODIS (MOD09)	Landsat ETM+
Azul, banda 3	Azul, banda 1
Verde, banda 4	Verde, banda 2
Rojo, banda 1	Rojo, banda 3
Infrarrojo Cercano, banda 2	Infrarrojo Cercano, banda 4
Infrarrojo Medio, banda 5	Infrarrojo Medio, banda 5
	Infrarrojo Medio, banda 7

Los resultados de esta metodología se observan en la siguiente figura:

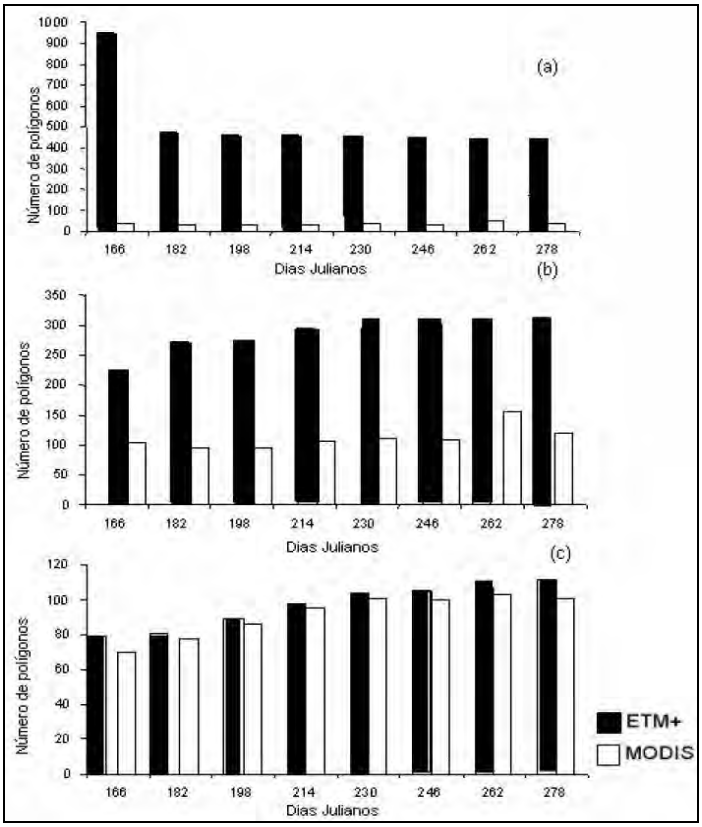


Figura 2: Polígonos detectados como deforestación en los sensores Landsat ETM+ y MODIS divididos en tres clases de tamaños: (a) polígonos de menos de 15 hectáreas; (b) polígonos entre 15 y 50 hectáreas y (c) polígonos entre 50 y 100 hectáreas.

Los resultados obtenidos por esta comparación muestran que los datos del sensor MODIS tienen una tendencia a subestimar las áreas deforestadas en relación a los datos del Landsat ETM+. También se muestra que los polígonos por debajo de 15 hectáreas fueron detectados con menor precisión con MODIS. Conforme aumenta el tamaño del desmonte los resultados del sensor MODIS se aproximan más a los resultados obtenidos por el sensor Landsat ETM+.

Los resultados mostraron que los datos del MOD09 son una fuente útil de información para el monitoreo de los desmontes, también señalan que la imagen fracción suelo se muestra como la más adecuada para aumentar el contraste entre bosque y suelo desnudo, además ayuda a reducir la dimensión de los datos.

Estos tres artículos compararon los resultados obtenidos de las imágenes MODIS en relación a los obtenidos con Landsat ETM+ y en los dos primeros casos señalan una alta fiabilidad en la detección de polígonos mayores a 3 hectáreas, sin embargo en el tercer artículo no se alcanza una buena fiabilidad incluso tenido polígonos entre 15 y 50 hectáreas y donde se utilizó la metodología DETER.

Como se puede apreciar existen algunas diferencias en cuanto a resultados obtenidos en los artículos anteriores, por lo que uno de los objetivos de esta investigación es aplicar la metodología DETER en el contexto mexicano y poder determinar con base en resultados que tan confiable puede ser. Estos antecedentes están desarrollados en la región amazónica de Brasil, por lo qué, a continuación se presentan dos casos de estudio en México usando datos MODIS.

e).- Un estudio realizado por Mas y González (2006) utilizando diferentes productos MODIS y diferentes técnicas de detección de cambio para el monitoreo de la deforestación en dos regiones boscosas se presenta.

- Región de la Monarca en los estados de México y Michoacán con bosques templados principalmente de pino y oyamel.
- Región central del Estado de Quintana Roo donde predomina la selva mediana subperennifolia.

Estas dos regiones fueron analizadas con los productos M0D44A Field Vegetation Change (FVC), y el producto NDVI a 16 días (MOD13).

Las técnicas de cambio utilizadas fueron: 1).-***Una clasificación multifecha,*** 2) ***una comparación post-clasificación*** y 3) ***técnicas de realce de cambio*** (Vector de Cambio, Diferencia de NDVI y el Análisis de Componentes Principales Selectivos (ACPS)).

Los autores reportan que las dos versiones del producto MOD44 no indicaron ningún cambio para las dos zonas de estudio durante los períodos de tiempo considerados, incluso cuando algunas zonas desmontadas alcanzaban más de 100 hectáreas.

Por otra parte los métodos de cambio permitieron generar mapas de cambio con una fiabilidad satisfactoria en el caso del ACPS aplicado al NDVI, la diferencia del NDVI y la comparación post-clasificatoria.

En el proyecto se utilizaron imágenes de alta resolución para validar los datos obtenidos con las diferentes técnicas de cambio multifecha. En el caso de la región monarca se utilizaron mosaicos de fotografías aéreas y para la región selvática en Quintana Roo se utilizó un mosaico de ortofotos y una imagen SPOT 5.

Cada uno de los mapas de cambio generado por los diferentes métodos de cambio multifecha se compararon con el mapa de deforestación de referencia. El desempeño de cada método se evaluó con base en los errores de omisión (áreas deforestadas no detectadas) y de comisión (falsa alerta, áreas no deforestadas que el método clasificó como deforestación). En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 6: Resultados obtenidos en la validación de los mapas de cambio.

MÉTODO	Error de Omisión en %	Error de Comisión en %
ACPS con NDVI	20	27
Diferencia de imagen con NDVI	20	27
Vector de Cambio	50	50
Clasificación directa multifecha	40	14
Comparación Post-Clasificación	20	27

Se aprecia que los mejores resultados se obtuvieron con el ACPS aplicado al NDVI, la Diferencia de imagen con el NDVI y la Comparación Post-clasificación por lo tanto se sugiere que métodos sencillos como la Diferencia de imagen o el ACPS aplicados al NDVI permiten obtener insumos necesarios para desarrollar un sistema de alerta que detecte la mayoría de los eventos de deforestación. Sin embargo, el desempeño de estos insumos depende de la calidad de las imágenes ya qué para Quintana Roo el NDVI estaba muy contaminado por nubes, de tal forma que las imágenes de cambio no son muy fiables.

Como puede observarse hay diferentes técnicas de cambio y diferentes insumos generados de los productos MODIS que generan diferentes resultados. A continuación se presenta un resumen de los antecedentes:

Tabla 7: Resumen de los artículos presentados.

AUTOR	PRODUCTOS MODIS UTILIZADO	IMAGEN DE VALIDACIÓN O REFERENCIA	ÁREA DE ESTUDIO	FECHAS A COMPARAR	TÉCNICAS DE CLASIFICACIÓN	RESULTADOS
a) Costa y Moreira de Souza (2005).	MOD13 (250 m.)	Landsat ETM+ (30 m.)	Bajo Acre, Brasil.	Agosto 2002 Julio 2003	No supervisada (ISODATA) e Interpretación Visual	Elevada exactitud para detectar áreas de más de 3 ha. 86% del área deforestada pudo ser detectada con MODIS.
b) Morton et al. (2005)	MOD09 MOD13 MOD44A MOD44B (250 m.)	Landsat ETM+ (30 m.)	Mato Grosso, Brasil.	Agosto 2001 Agosto 2004.	MLME e imágenes fracción.	Identificación de más del 80% de polígonos de deforestación de más de 3 ha. Todos los productos identifican polígonos de más de 20 ha.
c) Valeriano et al. (2005).	MOD09 (250 m.)	Landsat ETM+ (30 m.)	Amazonia Legal. Brasil.	Octubre 2001 Octubre 2002.	DETER (Basado en el MLME y Segmentación de la imagen fracción suelo).	Polígonos de 15 ha. fueron detectados con menor precisión. Polígonos entre 15 y 50 ha. detectados al 50% y polígonos de 50 a 100 ha. elevada exactitud.
d) Mas y González (2006).	MOD13 MOD44A (250 m.)	Mosaico de ortofotos (región 1) (4 m.) SPOT 5. (región 2). (10 m.)	1. Región de la monarca 2. Región central Quintana Roo.	Enero 2001 Enero 2003	Métodos de realce (ACPS, Diferencia de NDVI y Vector de Cambio), Clasificación directa multifecha y una Comparación Post-clasificación.	Error de omisión de 20% y error de comisión 27% en: ACPS, Diferencia de NDVI y una comparación posclasificación

Los incisos a y b, presentan una elevada exactitud con insumos parecidos y con métodos diferentes. Sin embargo, tenemos resultados con exactitud intermedia en el inciso c. La mayoría de los resultados se presentan en la región selvática amazónica, en Brasil, donde se presenta una relativa homogenización de la cobertura forestal y donde pueden ser más contrastadas las zonas de desmonte. Para el caso de México, existe menor cobertura forestal y existe mayor diversidad de ecosistemas forestales, además de que existe poca investigación con datos del sensor MODIS donde el trabajo presentado muestra resultados aceptables.

Con base en los resultados de estos estudios, es necesario evaluar, diferentes metodologías que se puedan aplicar a la heterogeneidad del territorio mexicano y que sean confiables para el monitoreo de la deforestación.

CAPITULO 2: ÁREA DE ESTUDIO

2.1. LOS CHIMALAPAS, OAXACA

2.1.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

Los Chimalapas son parte de una región más amplia que se conoce como Selva Zoque, cuya extensión alcanza cerca de un millón de hectáreas forestales, en la zona limítrofe de los Estados de Oaxaca, Chiapas y Veracruz. Dentro de esta zona, se encuentra una de las selvas tropicales húmedas y los bosques de niebla más importantes de México. La región ha sido reconocida como una de las 200 áreas prioritarias para la conservación del medio ambiente y recursos naturales en el mundo, además de ser un gran centro de biodiversidad (Cruz Hernández, 2006).

Dentro del estado de Oaxaca, los Chimalapas se encuentran en el Noreste muy cerca del Istmo de Tehuantepec que es la porción más estrecha del país entre el Océano Pacifico y el Golfo de México, lo que le da un carácter geopolítico importante.

Los Chimalapas están conformados por dos municipios, Santa María Chimalapa y San Miguel Chimalapa. La tenencia de la tierra en ambos casos es de Bienes Comunales. La Superficie en estudio abarca unas 276,800 hectáreas repartidas en los municipios de San Miguel Chimalapa, una porción considerable al sur del municipio Santa María Chimalapa, así como pequeñas porciones de Santiago Niltepec y Asunción Ixtaltepec (ver figura 3). La zona de estudio se encuentra entre las coordenadas 94°27´ W, 16°53´ N, y 94°58´ W, 16°26´ N.

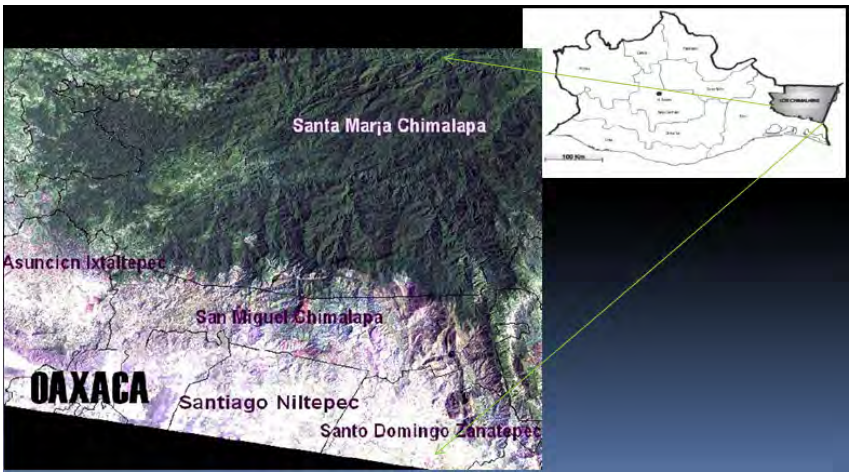


Figura 3: Localización de los Chimalapas y su división municipal.

La población para 2005 se calculaba en 15,000 habitantes de los cuales 6,500 corresponden a San Miguel Chimalapa y 8,500 a Santa María Chimalapa. La población indígena en ambos municipios

corresponde al 55%, en su mayoría de origen zoque aunque también hay otros grupos como los zapotecos, tzotziles, chinantecos, zapotecos, mixes y mixtecos (Anta, 2005).

De acuerdo con la CONAPO (2005), los municipios de Santa María Chimalapa y San Miguel Chimalapa están considerados como de muy alta marginación y ocupan el lugar 51 y 155 respectivamente dentro del contexto estatal.

Las principales actividades productivas en los Chimalapas son la agricultura, el aprovechamiento forestal y la ganadería que se complementan con actividades de recolección, caza y pesca. La ganadería se ha convertido recientemente en una actividad de importancia, si bien se emplean algunos terrenos planos para establecer esta actividad, una superficie importante se encuentra en terrenos de ladera con diferentes tipos de pendiente. El tipo de ganadería que se práctica es de carácter extensivo.

2.1.2. TOPOGRAFÍA

En la región de estudio según Anaya y Álvarez (1994), se pueden distinguir tres unidades geomorfológicas:

1. Un sistema montañoso con laderas rectas y cimas agudas que se eleva de los 1,500 a los 2,500 m.s.n.m. formado por granitos, calizas, areniscas y conglomerados al norte, noroeste y noreste de la zona de estudio.
2. Sistema montañoso de laderas convexas y cimas redondeadas, este formado por calizas al suroriente de la región.
3. Sistema de lomeríos altos, que se elevan entre los 200 y 500 m.s.n.m. ubicados en la porción oeste y sur.

2.1.3. CLIMA

La región de estudio debido a la diferencia altitudinal (200 a 2,500 m.s.n.m.), presenta climas cálidos y templados. En la vertiente del Océano Pacífico, los climas son sub-húmedos. El clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano Am (f) y Am (fm) predomina en la parte norte, donde es más intensa la acción de los vientos alisios húmedos provenientes del Golfo de México donde se encuentra la selva alta perennifolia.

Los climas sub-húmedos con lluvias en verano Aw2, (w), se encuentran en la parte media de la región. En las partes más altas se presenta el clima templado subhúmedo con lluvias en verano C (w2) (w). Mientras más hacia el sur, la condición se vuelve más seca. Por lo tanto es posible observar un gradiente de mayor a menor humedad que se presenta de norte al sur en la región.

La temperatura media anual en toda la región, fluctúa entre 22 y 24° C. Los valores medios más frecuentes de precipitación, están comprendidos entre los 200 y 2,500 mm anuales. Se presentan escasas lluvias invernales, asociadas a masas de aire continental polar, llamadas comúnmente "nortes" (Anaya y Álvarez, 1994).

2.1.4. HIDROLOGÍA

La zona de estudio es parte de lo que se conoce como Vertiente del Pacifico y donde la mayoría de los ríos y sistemas lacustres desembocan en el Océano Pacífico. Es así como las montañas de San Miguel Chimalapa conforman las cuencas de los ríos Espíritu Santo, Niltepec, Ostuta y Tapanetepec, cuyas aguas alimentan los sistemas lacustres de la Laguna Superior, la Laguna Inferior y el Mar Muerto (Anta, 2005).

2.1.5. PRINCIPALES TIPOS DE VEGETACIÓN Y USO DE SUELO

La región de estudio tiene diversos usos de suelo y es un rico mosaico de vegetación donde encontramos en un área relativamente pequeña una amplia diversidad de ecosistemas: selvas altas perennifolias en la parte norte y noreste, selvas bajas caducifolias en la zona centro, bosques de pino-encino en las partes altas de los sistemas montañosos en el oriente y oeste de la imagen y selva mediana subperennifolia en la porción noroeste.

Los usos de suelo que se alcanzan a apreciar son: agricultura de temporal, cerca de los poblados Unión Hidalgo y Niltepec así como sistemas de riego hacia el sur de la imagen. Otro uso importante es la gran cantidad de superficie con pastizales dedicados principalmente a la ganadería de tipo extensiva. En la siguiente figura se muestra un mapa de coberturas.

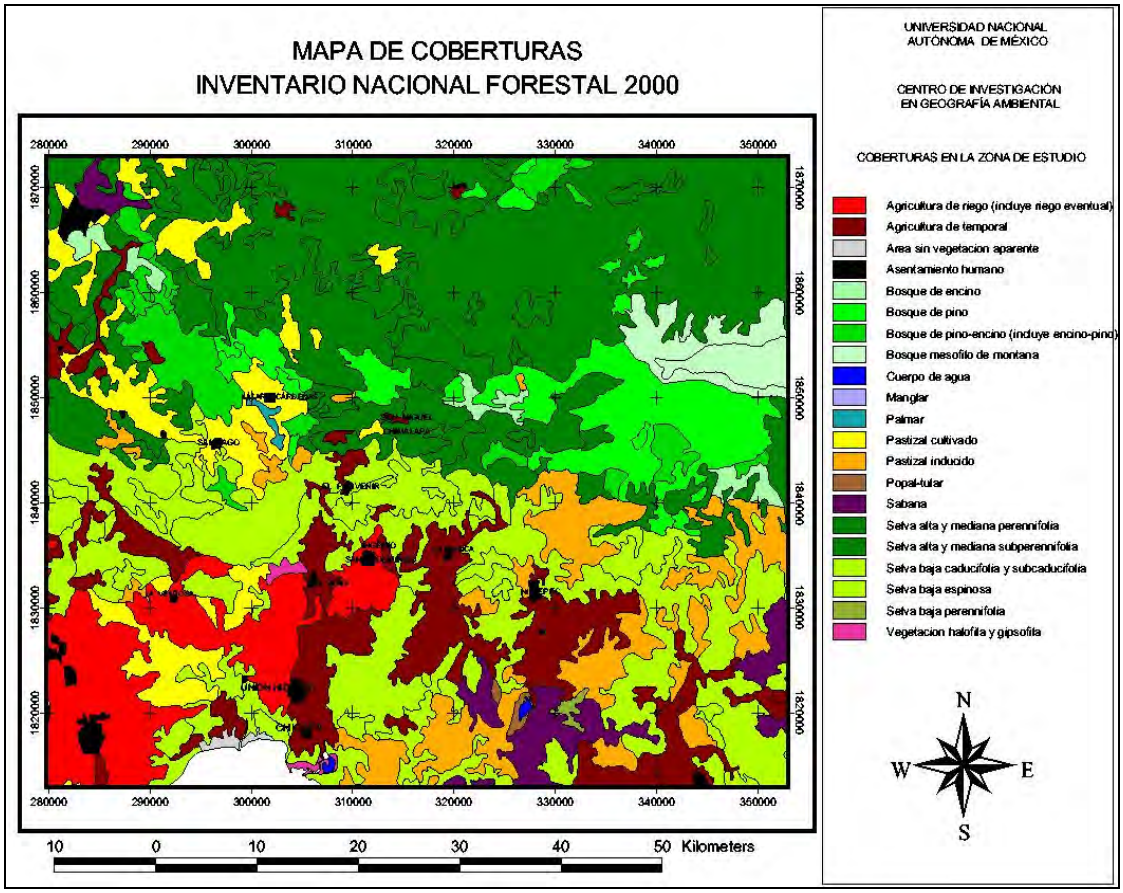


Figura 4: Imagen que muestra las diferentes coberturas y usos de suelo, tomadas del Inventario Nacional Forestal 2000.

2.1.6. RECURSOS FORESTALES

La región contiene importantes reservas de madera, incluyendo maderas tropicales de alta calidad, tales como cedro y caoba, y algunas especies endémicas que se utilizan localmente en la manufactura de madera fina; también se encuentran especies consideradas como corrientes, en total se estima que existen aproximadamente 220 especies de interés forestal.

Portador García (2004) menciona que el manejo forestal comunitario en los Chimalapas se realiza en dos tipos de ecosistemas forestales: los tropicales húmedos, como son las selvas altas perennifolias y las selvas medianas subperennifolias; así como en los templados húmedos (bosques mesófilos) y subhúmedos (bosques de pino). En los bosques mesófilos de la zona oriente, algunas localidades de San Miguel Chimalapa aprovechan las hojas de varias especies de palma camedor. Mientras que en los bosques de coníferas de la zona oriente, la comunidad de Santa María está aprovechando madera de pino. La selva baja, desde el punto de vista de la explotación forestal comercial, es de escasa importancia, pues la forma y tamaño de sus árboles,

presentan características no deseables para fines comerciales; sin embargo, les dan diversos usos locales.

2.1.7. DEFORESTACIÓN

La región de los Chimalapas es una zona de muchos conflictos a nivel nacional y que ha venido sufriendo la tala de sus bosques debido a conflictos agrarios, de límites estatales, de desarrollo ganadero, de tala ilegal, de explotación de maderas preciosas, de narcotráfico, entre otros.

Los conflictos agrarios en los límites del estado de Oaxaca y Chiapas han traído una fuerte depredación de estos bosques y selvas. A pesar de que las comunidades cuentan con Resoluciones Presidenciales desde 1967, éstas no se ejecutaron físicamente sino hasta 1992 (después de mucha presión política) lo que provoca que, bajo el pretexto del supuesto conflicto de límites estatales, se aceleraron las fuertes invasiones promovidas y/o permitidas por las diversas autoridades federales y estatales, y con ello los talamontes, ganaderos y narcotraficantes se basaron en este conflicto interestatal para la invasión, colonización y depredación de la selva (Portador García, 2004).

En este contexto la deforestación comienza a gran escala en 1947 cuando llegaron 5 empresas madereras, encabezadas por la Compañía Sánchez Monroy -de origen michoacano-, que con todo el apoyo del gobierno del estado de Chiapas comenzaron la invasión y tala de montañas comunales desde el oriente de la región. Con ello, los madereros tuvieron la puerta abierta para apoderarse y explotar durante 30 años, 100,000 ha de bosques y selvas en los Chimalapas. Esta explotación sólo cesó hasta agosto de 1977, cuando peones y obreros de las compañías se fueron a huelga y se aliaron a los comuneros que luchaban por rescatar sus tierras y juntos, expulsan a los madereros que para entonces ya eran prósperos ganaderos (Portador García, 2004).

Después vino el auge ganadero que en los años 90 se da intensamente en el sureste mexicano y por tal en la región de los Chimalapas. Es así que desde hace dos décadas y hasta 2004 la superficie de áreas deforestadas han crecido en ocho veces y que las selvas altas perennifolias conservadas han disminuido en más de 13 mil hectáreas.

2.1.8. INCENDIOS

En 1998 se registraron al fin de año 14,445 incendios en áreas forestales que afectaron unas 850,000 hectáreas en todo el país. Ese año Oaxaca también tuvo una de las peores épocas secas registradas hasta entonces. Se tienen los siguientes datos para el Estado:

- 419 incendios.
- 144,600 hectáreas de pastizales afectadas.
- 65,340 hectáreas de ecosistemas forestales afectadas.
- 31,670 hectáreas de otras cubiertas afectadas.
- En total fueron 241,700 hectáreas afectadas en el Estado.

Ese año los fuegos se extendieron sin control por sierras cubiertas de bosques y selvas primarias en la región de los Chimalapas. El ejército, los comuneros y organizaciones civiles junto con SEMARNAP se unieron para combatir los incendios pero hubo muchos problemas de accesibilidad por los diversos sistemas montañosos (Anta y Plancarte, 2001).

Uno de los tipos de bosque más afectados fue el bosque mesófilo de montaña, con aproximadamente 38,000 ha. de su extensión original quemada. Los otros ecosistemas afectados fueron los bosques de pino y la selva baja caducifolia de las cuales unas 26,000 hectáreas pertenecían a bosques en buen estado de conservación, por lo que estos incendios son considerados los más graves en la historia de la zona (Asbjornsen y Gallardo, 2005).

El uso local del fuego para la preparación de los terrenos agrícolas y pastizales, así como los conflictos agrarios y el establecimiento de cultivos ilícitos, fueron algunas de las causas que junto con la sequía extrema favorecida propiciaron los extensos incendios de 1998 en Los Chimalapas.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODO

3.1. IMÁGENES DE SATÉLITE

3.1.1. IMÁGENES ASTER, LANDSAT Y SPOT

Inicialmente se seleccionaron las dos fechas para el estudio (2001-2005), y se obtuvieron las imágenes ASTER del 26 de agosto de 2001, y SPOT del 21 de enero de 2005. Estas imágenes por su alta resolución espacial de 15 y 10 m. respectivamente sirven para evaluar la fiabilidad obtenida de las imágenes MODIS con resolución espacial de 250 m.

También se utilizaron imágenes Landsat ETM+ (Path 23 – Row 48) del año 2001 esto debido a que la imagen ASTER 2001 presentaba una mala calidad visual y no se distinguían bien las coberturas de interés, para complementar la validez de los resultados obtenidos.

Se utilizó la carta topográfica 1:250,000 correspondiente a Salina Cruz con clave E15-10, D15-1 utilizada en la corrección geométrica de las imágenes ASTER y SPOT. Otro insumo importante fue la base de datos del Inventario Nacional Forestal 2000.

3.1.2. MODIS

Las imágenes MODIS se seleccionaron tratando de que coincidieran con la misma fecha de las imágenes de alta resolución.

Tabla 8: Las imágenes MODIS que se obtuvieron para ser clasificadas son las siguientes.

PRODUCTO		RANGO ESPECTRAL	FECHA1	FECHA 2
MOD09 Reflectancia de la superficie (producto diario)	**GHK:** 500 m. resolución 5 bandas espectrales **GQK:** 250 m. resolución 2 bandas espectrales	1) Rojo 620-670 nm. 2) IRC* 841-876 nm. 3) Azul 459-479 nm. 4) Verde 545-565 nm. 5) IRMa* 1230-1250 nm. 6) IRMb* 1628-1652 nm. 7) IRMc* 2105-2155 nm.	28 enero 2001	21 enero 2005
MOD09 Reflectancia de la superficie (producto de 8 días)	**Q1:** 250 m. de resolución. 2 bandas espectrales	1) Rojo 620-670 nm. 2) IRC* 841-870 nm.	Del 24 enero al 01 febrero 2001	Del 24 enero al 01 de febrero 2005
MOD13 Índices de Vegetación (producto de 16 días)	**Q1:** 250 m. resolución. 4 bandas espectrales. 2 índices de vegetación.	1) Rojo 620-670 nm. 2) IRC* 841-876 nm. 3) Azul 459-479 nm. 4) IRM* 1628-1652 nm. 5) NDVI*	Del 17 enero al 01 de febrero 2001	17 Enero al 01 de Febrero 2005

IRC* .- Infrarrojo de onda Corta
IRMa* Infrarrojo de onda Media de 1230 a 1250 nm.
IRMb* Infrarrojo de onda Media de 1628 a 1652 nm.
IRMc* Infrarrojo de onda Media de 2,105 a 2,155 nm.
IRM* Infrarrojo de onda Media
NDVI* Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

Estos productos son del nivel 4 y la versión 005 disponibles en internet a través de la página del EOS https://wist.echo.nasa.gov/api/

3.1.3. CATEGORÍAS DE INTÉRES

Para poder definir nuestras categorías de interés se utilizaron los datos del Inventario Nacional Forestal 2000, con base en los cuales se elaboró la siguiente leyenda:

Tabla 9: Categorías que se determinaron de acuerdo con el Inventario Nacional Forestal 2000.

CUBIERTAS FORESTALES		CUBIERTAS NO FORESTALES	
CLAVE	CATEGORÍA	**CLAVE**	CATEGORÍA
1	Selva alta perennifolia	**5**	Pastizal
2	Selva mediana subperennifolia	**6**	Agricultura de temporal
3	Selva baja caducifolia	**7**	Agricultura de riego
4	Bosque de pino-encino	**8**	Cuerpo de agua

Estas categorías servirán para realizar los campos de entrenamiento sobre las imágenes MODIS y que son la base para analizar la medida de separabilidad espectral que será tratada más adelante.

3.2. PRE-PROCESAMIENTO

3.2.1. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA

La corrección geométrica de las imágenes se realiza con el fin de que tengan validez cartográfica y de que puedan representar cualquier punto en el terreno para identificar la zona de estudio en un sistema cartográfico, ya sea mediante paralelos y meridianos o con coordenadas UTM.

La corrección geométrica de la imagen ASTER 2001, se realizó con 20 puntos de control tomados de la carta topográfica 1:250,000 y la imagen se remuestreó con el método del vecino más cercano. Está imagen corregida sirvió de base para georreferenciar la imagen Landsat 2001 y SPOT 2005 con el método imagen a imagen.

Las imágenes MODIS tienen una excelente geolocalización (50 m. al nadir) y se reproyectaron con el MRT (Modis Reprojection Tools) que fue desarrollado específicamente para la manipulación de imágenes MODIS (https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/tools/).

3.3. PROCESAMIENTO

3.3.1. CRITERIO DE SEPARABILIDAD

Con las imágenes corregidas geométricamente, el siguiente paso fue determinar cuáles son las bandas que separan mejor las coberturas forestales de las no forestales.

Las medidas de separabilidad que comúnmente se utilizan son: Divergencia, Divergencia Transformada, Distancia de Bhattacharyya y la Distancia de Jeffreys-Matusita. Estas medidas de separabilidad se basan en las distancias estadísticas entre las categorías de interés tomadas de los campos de entrenamiento. Maussel et al. (1990) analizaron estás cuatro medidas de separabilidad en una región de agricultura en Texas y concluyeron que la Divergencia Transformada y la Distancia de Jeffreys-Matusita ofrecieron los mejores resultados.

Con base en este estudio se utilizó la Divergencia Transformada para analizar la separabilidad de las bandas espectrales.

La divergencia transformada se define estadísticamente como:

$$TD_{i,j} = 2000*[1 - \exp(-D_{i,j} / 8)]$$

Donde:

TD(i,j) = divergencia transformada entre clases **i** y **j**

D(i,j) = divergencia entre clases **i** y **j**

$$D(i,j) = 0.5*T\,[M(i)-M(j)]*[InvS(i)+InvS(j)]*[M(i)-M(j)] + 0.5*Trace[InvS(i)*S(j) + InvS(j)*S(i) - 2*I]$$

Donde:

M(i) = vector medio de la clase **i**, donde el vector tiene **N** elementos de bandas (N es el número de bandas usadas)

S(i) = matriz de covarianza para la clase **i,** la cual tiene **N** bandas

InvS(i) = matriz inversa de **S(i)**

Trace[ ] = trazado de la matriz (suma de los elementos de la diagonal)

T[ ] = matriz transpuesta

I = identificador de la matriz

La evaluación de la separabilidad de bandas se realizó con el software Multispec.

3.3.2. METODOLOGÍA DETER

3.3.2.1. MODELO LINEAL DE MEZCLA ESPECTRAL (MLME)

El Modelo Lineal de Mezcla Espectral (MLME) es una técnica que ofrece buenos resultados con imágenes de resolución moderada como son las imágenes MODIS, en las cuales la respuesta de los píxeles corresponde a una mezcla de varias coberturas.

Comúnmente la clasificación de imágenes tiene por objetivo asignar cada píxel a una de las categorías previamente definidas en la leyenda de trabajo, aunque resulta un enfoque algo limitado para ciertas aplicaciones. La necesidad de categorizar cada píxel de la imagen con una cobertura de suelo exclusiva, implica asumir que ese píxel es homogéneo o, dicho de otra forma, que toda su superficie está cubierta por la categoría a la cual se ha asignado. En definitiva, esa clasificación de la imagen no considera que la radiancia proveniente de un píxel, en la mayoría de las ocasiones, es una mezcla de distintas cubiertas, y que al clasificarlo simplemente optamos por asignarlo a la cubierta dominante.

Por esta razón se han desarrollado otro tipo de técnicas, que intentan extraer la información que existe dentro de cada píxel en una imagen, que se conocen como clasificadores subpíxel o de desmezcla ("unmixing" en inglés). Olivares (2001) menciona que el análisis subpíxel de mezcla se refiere a que la reflectancia de un píxel no puede ser interpretada como una sola cobertura, sino que la reflectancia de un píxel es la suma de las diversas coberturas en la superficie.

Quintano et al. (2006) mencionan que, de las técnicas de clasificación subpíxel destaca el MLME, que en inglés se llama "Spectral Mixture Analysis". Dentro del MLME se considera que "la respuesta espectral de cada píxel de una imagen, es considerada una combinación lineal de las respuestas espectrales de cada componente de las diversas coberturas existentes dentro de un píxel". La descomposición espectral trata de encontrar la proporción de los componentes espectrales puros que mejor expliquen la reflectancia observada. Como fruto de esta técnica, se obtienen tantas imágenes de salida como categorías pretendan estudiarse. Para adaptar el modelo original a las condiciones del área de estudio, se corrieron varios Modelos de Mezcla con tres (selva alta, suelo y sombra), cuatro (selva alta, suelo, sombra y selva baja) y cinco componentes (selva alta, selva mediana, suelo, sombra y selva baja). En cada una de ellas, el nivel digital de un determinado píxel indica la proporción de superficie que ocupa esa categoría.

Para descomponer espectralmente los datos originales, es necesario definir las firmas espectrales "puras" de los componentes de nuestro interés (suelo, vegetación y sombra). Estas firmas pueden ser obtenidas directamente sobre el compuesto RGB de la imagen, en campo o en laboratorio. Este es un punto débil ya que la selección de las "coberturas puras" (o "endmembers" en inglés)

son de difícil obtención ya que como se menciono los píxeles son la suma de diferentes respuestas espectrales. Para solventar este problema comúnmente se han utilizado dos enfoques:

1.- El primer enfoque utiliza medidas del espectro de reflectancia en campo o en laboratorio. Este método tiene un gran control sobre la selección de firmas espectrales.

2.- El segundo enfoque toma las "coberturas puras" directamente de la imagen de píxeles relativamente "puros", aunque a veces no se pueden encontrar tan fácilmente (Asner et al., 2003).

Con la selección de estas firmas se descompone espectralmente la imagen en los componentes sombra, suelo y vegetación.

El MLME puede ser descrito con la siguiente fórmula:

Ri=a*vegetacióni+b*sueloi+c*sombrai+ei,

Donde:

Ri es la respuesta del píxel en la banda **i** de la imagen;

a, b y **c** son proporciones de vegetación, suelo y sombra que componen el píxel;

vegetacióni, sueloi y **sombrai** corresponden a las respuestas espectrales de cada una de estas componentes para cada banda i;

ei es el error de estimación intrínseco para cada banda **i**.

Durante la metodología desarrollada por el INPE las bandas espectrales que han servido de base en la aplicación del proyecto PRODES y DETER son las siguientes:

Tabla 10: Bandas espectrales utilizadas en el proyecto PRODES y DETER.

PRODES LANDSAT TM/ETM+	Rango espectral	DETER MODIS	Rango espectral
TM-3	630-690 nm.	**MODIS-1**	620-670 nm.
TM-4	760-900 nm.	**MODIS-2**	840-870 nm.
TM-5	1550-1750 nm.	**MODIS-6**	1620-1650 nm.

Las bandas 1, 2 y 6 del sensor MODIS son utilizadas, formando un sistema de ecuaciones lineales que se resuelve utilizando el método de Mínimos Cuadrados Ponderados. Después de aplicar el MLME a estas bandas el resultado son tres bandas sintéticas que representan las proporciones de vegetación, suelo y sombra existente en cada píxel de la imagen (Shimabukuro et al., 2005).

3.3.2.2. MÍNIMOS CUADRADOS PONDERADOS

Para la solución del sistema de ecuaciones lineales, que representa el MLME existen varios algoritmos matemáticos basados en el método de los mínimos cuadrados. Los métodos implementados en el programa SPRING para estimar las proporciones dentro de un píxel procuran seleccionar las proporciones de modo que la combinación de las firmas espectrales de los componentes sea la mejor aproximación del valor del píxel observado, los siguientes métodos están disponibles:

- Mínimos Cuadrados con Restricción
- Mínimos Cuadrados Ponderados
- Combinación de Principales Componentes y Mínimos Cuadrados

De estos, el que se utiliza es el de Mínimos Cuadrados Ponderados ya que es la ecuación que se usa durante la aplicación del MLME. La ecuación de Mínimos Cuadrados considera el ajuste de curva de los datos como una curva teniendo la formula:

$$\mathbf{R = f\,(A, x1, x2,..., xn) = x1\ f\,(A) + x2\ f\,(A) + ... + xnf\,(A)\ (2)}$$

En que la variable dependiente **R** es lineal con respecto a las constantes **x1, x2, ..., xn.**

Actualmente existen muchos métodos para el ajuste de curvas, el método de mínimos cuadrados puede ser aplicado a una amplia variedad de problemas de ajuste de curvas envolviendo formas lineales con constantes indeterminadas. Las constantes son determinadas minimizando la suma de errores (residuos) al cuadrado. La solución obtenida por este método es matemáticamente aceptable, pero en algunos casos es físicamente sin significado y por lo tanto, no aceptable (algunas restricciones están involucradas: las constantes deben ser no negativas y deben sumar 1). Para resolver este problema es necesario aplicar el concepto de mínimos cuadrados ponderados (Shimabukuro et al., 2005).

En este caso, **x1 + x2 + x3….xn = 1 y 0 <= x1, x2, x3….xn <= 1** son las condiciones que deben ser satisfechas para obtener una solución aceptable, lo cual significa que las proporciones de las diferentes coberturas son positivas y que las coberturas consideradas cubren todo el píxel (suma de las proporciones igual a uno). Las variables de las proporciones dependen del número de componentes que se deseen interpretar; es decir tantos componentes como bandas espectrales estén disponibles. Entonces, cuatro ecuaciones son adicionadas a **X**; esto es, una correspondiendo la condición de suma igual a **1 (x1 + x2 + x3 … + xn = 1)** y otras tres correspondiendo la condición de que las proporciones deben ser no negativas **(xj >=0, j = 1, 2, 3…n).** Para resolver este problema, una matriz diagonal W conteniendo valores de peso asociados con el sistema de

ecuaciones a ser resueltos cuando las restricciones no son atendidas es entonces aplicada. Inicialmente los **"m"** primeros valores iguales a uno **(1)** a lo largo de la matriz diagonal W significa que las ecuaciones son igualmente importantes para la solución del problema. El valor siguiente más alto para la ecuación correspondiente a la primera restricción (suma xj = 1) que debe ser rigurosamente satisfecha. Entonces si los valores de xj's son satisfechos, esto es, si ellos están en el intervalo "cero y uno" entonces la solución final fue encontrada (Shimabukuro et al., 2005).

3.3.2.3. IMAGÉNES FRACCIÓN

Como resultado de la aplicación del MLME se obtienen bandas sintéticas llamadas imágenes fracción. Câmara et al. (2006) mencionan que las imágenes fracción se consideran como una forma de reducción de los datos y nos ayudan a realzar los datos de interés además transforma la información espectral en información física o dicho de otra forma, calcula los valores de proporción de cada componente en un píxel. En este contexto la imagen fracción vegetación realza las coberturas forestales y vegetales, la imagen fracción sombra/agua realza las áreas ocupadas con cuerpos de agua (ríos, lagos, etc.) o áreas de sombra (se considera agua/sombra porque presentan una reflectancia semejante), la imagen fracción suelo realza las zonas de suelo desnudo, pastizales y áreas deforestadas.

3.3.2.4. SEGMENTACIÓN

Después de obtener las imágenes fracción, el siguiente paso es la segmentación de la imagen fracción suelo. Los métodos de segmentación se realizan con el fin de incorporar criterios diferentes de los métodos tradicionales, basados, en la respuesta espectral de cada píxel. Estos criterios pueden ser: de textura y/o de contexto espacial, en donde los píxeles se relacionan espacialmente con otros píxeles de la imagen, del modo parecido a lo que se utiliza en la interpretación visual.

La segmentación de imágenes está relacionada con la búsqueda de objetos entre los que existen fronteras bien definidas. En estos casos pueden observarse cambios espectrales relevantes al pasar de un píxel a otro que se encuentra con un valor digital diferente (Gómez et al., 2006). Como principal problema se tiene que habitualmente las figuras asociadas a las imágenes, no muestran un borde muy claro, ni tampoco una forma estándar sino un cambio gradual entre objetos o coberturas.

Según Chuvieco (2002), coberturas diferentes pueden tener Niveles Digitales (ND) similares a otras y esto ocasionaría una confusión entre los clasificadores tradicionales, donde estas similitudes se relacionan con los siguientes factores: 1.- Resolución espectral del sensor, por contar con pocas bandas espectrales o por ser muy anchas para detectar variaciones espectrales. 2.-

Resolución espacial, que pueden dar lugar a píxeles mezclados. 3.- Resolución temporal, que conlleva a la confusión de ciertas coberturas en momentos diferentes de su desarrollo fenológico.

En estos casos los clasificadores tradicionales realizan la asignación de cada píxel por separado en función de los ND que presenta en las distintas bandas. Para tratar de aminorar estas confusiones se utilizan clasificadores basados en el contexto, que categorizan grupos de píxeles en vez de categorizar píxel por píxel. Esto implica cambiar la unidad de análisis de "píxel" a "grupo de píxeles" mediante la segmentación espectral-espacial de la imagen que tiende a definir objetos espectralmente similares y contiguos (Chuvieco, 2002).

Existen varias técnicas de segmentación de imagen, las cuales varían en su procedimiento, dentro de las cuales podemos mencionar las siguientes:

- Técnicas basadas en la detección de bordes
- Técnicas basadas en el crecimiento de regiones
- Técnicas basadas en el análisis de texturas
- Técnicas de segmentación por agrupación de píxeles o clustering

De estas técnicas la utilizada en los proyectos PRODES y DETER es el de crecimiento por regiones, la cual utiliza la imagen fracción suelo, que es la imagen con mayor contraste entre las coberturas vegetales con el suelo desnudo, dando buenos resultados para la detección de la deforestación.

Este algoritmo propone clasificar una imagen no píxel a píxel, sino con base en áreas o "regiones" compuestas por píxeles de similares características. Consiste en extraer objetos homogéneos, para luego ser asignados a las categorías de interés. La delimitación de esas áreas homogéneas se basa en criterios de similitud espectral y continuidad. Tras localizar un pequeño grupo de píxeles con ND similares, el algoritmo incorpora progresivamente píxeles vecinos, siempre que esté dentro de un criterio de homogeneidad señalado por el usuario (por decir: a menos de una determinada distancia espectral). Cuando los píxeles vecinos no son suficientemente homogéneos se identifica una frontera o un área pequeña de distinta ocupación. El proceso de crecimiento continua hasta que se encuentran píxeles muy contrastados, con lo que el proceso se detiene. En este punto la imagen aparece segmentada en áreas homogéneas, aunque estas aun no se hubieran asignado a ninguna categoría temática.

Para determinar si dos píxeles o regiones son similares, se comparan sus valores espectrales, si la diferencia es inferior a un valor de similitud, determinado por el usuario, se consideran que son

similares y aptos para juntarse dentro de la misma región. Dependiendo de este valor de similitud, la regla puede ser:

a) Muy exigente (basado en una distancia espectral pequeña, se consideran objetos con respuestas cercanas como diferentes), lo cual resulta en la definición de muchas regiones pequeñas,

b) poco exigente (basado en una distancia espectral grande, se consideran objetos con respuestas diferentes como similares), lo cual genera pocas regiones pero más grandes.

Una vez segmentada la imagen el siguiente paso es realizar la extracción de regiones para posteriormente llevar a cabo la clasificación de la imagen que se basa en los cálculos de las estadísticas elementales de los píxeles incluidos en cada área o región.

3.3.2.5. EXTRACCIÓN DE REGIONES

Ya que se tiene la imagen fracción suelo segmentada se realiza un archivo de contexto donde se almacenan la siguiente información: 1) tipo de clasificación por regiones, 2) bandas o imágenes utilizadas e 3) imagen segmentada. Con este archivo de contexto el algoritmo extrae los atributos estadísticos (media y matriz de covarianza) de cada una de las regiones definidas en la fase de segmentación.

3.3.2.6. CLASIFICACIÓN

La clasificación digital de una imagen de satélite consiste en dividir al conjunto de píxeles que la componen, en clases temáticas de nuestro interés que son previamente definidas o están por definir, esto depende del método clasificatorio que se decida utilizar. Comúnmente la clasificación se divide en dos enfoques: Clasificación No Supervisada y Clasificación Supervisada.

Clasificación No Supervisada: Este método se dirige a definir las clases espectrales presentes en una imagen. Los algoritmos que producen una clasificación no supervisada asumen que los ND de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados (clusters), más o menos nítidos según los casos. Estos grupos equivalen a píxeles con un comportamiento espectral homogéneo y por lo tanto deberían definir clases temáticas de interés. El mayor inconveniente que presentan estas clasificaciones se presenta al tratar de etiquetar los clusters resultantes, que pueden variar en el número ya que depende de las características espectrales de cada imagen.

Clasificación Supervisada: El método supervisado parte de un conocimiento previo de la zona de estudio, que permite seleccionar áreas representativas de las diferentes categorías de interés. En este caso el intérprete delimita sobre las imágenes, los campos de entrenamiento que representan las categorías que componen la leyenda, y, a partir de estos, los clasificadores calculan los ND que

definen cada categoría de interés. Este conocimiento previo puede ser adquirido a través de fotografías aéreas o con trabajo de campo (Chuvieco, 2002).

Estos métodos pueden clasificar las imágenes ya sea "píxel por píxel", o por "regiones" de imágenes previamente segmentadas. Por lo tanto podemos distinguir varios tipos de clasificación dependiendo del algoritmo que se esté utilizando, sin embargo los más utilizados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 11: Diferentes tipos de clasificación para una imagen de satélite.

CLASIFIACIÓN NO SUPERVISADA	CLASIFICACIÓN SUPERVISADA
1.- ISODATA	1.- MÁXIMA PROBABILIDAD
2.- K-MEDIAS	2.- MÍNIMOS CUADRADOS
3.- CLUSTER	3.- PARALELIPIPEDO
4.- ISOSEG	4.- REDES NEURONALES
	5.- BATTACHARYA
	6.- CLA TEX

La clasificación utilizada fue no Supervisada con el algoritmo ISOSEG basado en regiones a través de una imagen previamente segmentada. Este algoritmo se encuentra implementado en software SPRING y funciona de la siguiente manera:

ISOSEG.- Es un algoritmo de cúmulos ("clustering") que no necesita un conocimiento previo de la distribución de densidad de categorías de interés y es una técnica para la clasificación de regiones a partir de una medida de similitud entre ellas. La medida de similitud utilizada consiste en la Distancia de Mahalanobis entre la clase y las regiones candidatas a la relación de pertenencia con esta clase (SPRING ajuda).

El ISOSEG utiliza los atributos estadísticos de cada región que son la matriz de covarianza y el vector de media, así como el área de cada una de estas para estimar el valor central de cada clase. Este algoritmo se resume en los siguientes pasos:

Definición de un límite.- El usuario define un límite de aceptación dado en porcentaje. Este límite a su vez define la distancia de Mahalanobis, de forma que todas las regiones pertenecientes a una determinada clase, están distantes de la clase por una distancia inferior a esta. Cuanto mayor sea el límite, es mayor esta distancia, y consecuentemente menor será el número de clases detectadas por el algoritmo.

Detección de las clases.- Las regiones son ordenadas en orden decreciente de área y se inicia el procedimiento para agruparlas en clases. Serán tomados como parámetros estadísticos de una clase (promedio y matriz de covarianza), los parámetros estadísticos de la región de mayor área que todavía no tenga asociada ninguna categoría. En seguida se asocia a esta clase todas las regiones cuya distancia de Mahalanobis es inferior a la distancia definida por el límite de aceptación. Así la primera clase tendrá como parámetros estadísticos aquellas regiones con mayor área. Las clases siguientes tendrán parámetros estadísticos de media de las regiones de mayor área, que no hayan sido asociadas a ninguna de las clases previamente detectadas. Esta fase se repite hasta que todas las regiones estén asociadas a una categoría.

Competición entre clases.- La detección de clases, es un proceso secuencial que puede favorecer las clases que son detectadas en primer lugar, con vista a eliminar este favorecimiento se procede a la competición entre clases. Esta competición consiste en reclasificar todas las regiones. El parámetro estadístico (promedio de cada clase que es entonces recalculado) el proceso se repite hasta que el promedio de las clases no se altere (SPRING ajuda).

Al término todas las regiones estarán asociadas a una clase definida por el algoritmo. El usuario deberá entonces asociar estas clases, a las categorías definidas de la leyenda. Una vez que se tiene la imagen clasificada el siguiente paso es etiquetar cada uno de los clusters resultantes en las categorías de interés que en este caso quedaría conformada por dos categorías: 1 forestal y 2 No forestal.

3.3.2.7. EDICIÓN MATRICIAL

Finalmente se pasa a la **edición matricial** la cual es una fase interactiva en la que el intérprete realiza un ajuste visual en pantalla de los resultados obtenidos en la clasificación y mapeo de la imagen. Esta operación se realiza por varios motivos:

Los resultados obtenidos de una clasificación digital siempre presentan errores de clasificación, debido a la semejanza de respuestas espectrales entre coberturas y usos de suelo, la variación fenológica de la vegetación y el nivel de mezcla dentro de los píxeles con resoluciones espaciales medias.

Este proceso de edición matricial está implementado en el software SPRING y fue creada con la intención de eliminar los errores de clasificación por medio de la edición visual de áreas. Esta edición permite al intérprete modificar la clasificación final directamente en pantalla con el soporte de la experiencia y el conocimiento del intérprete.

Están disponibles tres métodos de edición:

1.- Edición de área; 2.- Copiar área y; 3.- Clasificación de área.

Para llevar a cabo la edición matricial se eligió la Edición de Área. La ayuda en línea del SPRING menciona que la edición de área trata de lo siguiente: se permite que se digitalice en pantalla líneas cerradas y que los polígonos generados sean asociados a las clases temáticas, conforme al tipo de imagen que está siendo editada, antes de confirmar la asociación a la clase temática se puede efectuar la edición de línea, adicionando, moviendo o suprimiendo puntos (ver figura 5).

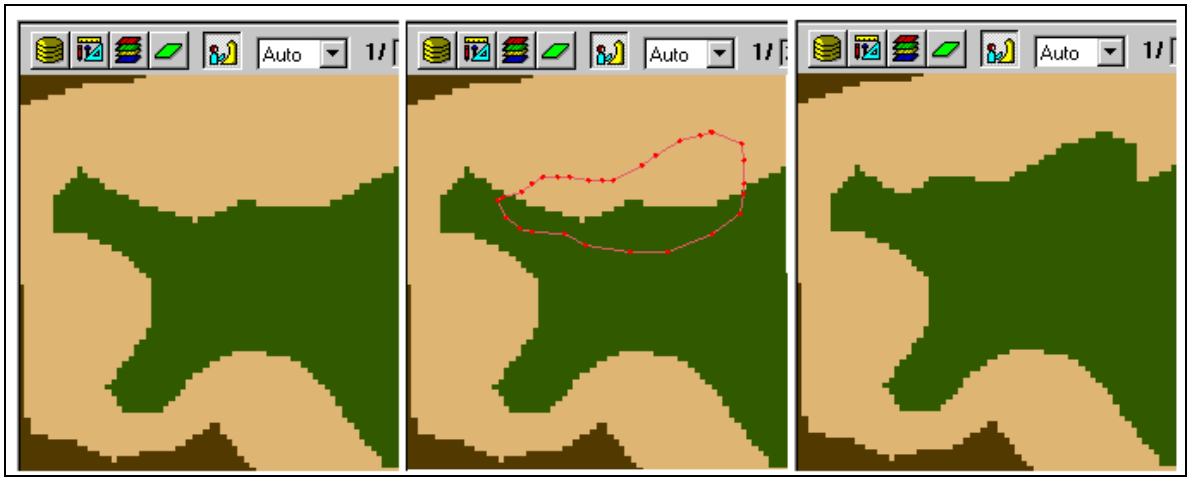


Figura 5: a) Imagen original **b) Imagen con línea editada** **c) Imagen con área de línea corregida.**

Se usa la edición de área por ser muy fácil de llevar a cabo. Con este último paso se tiene el mapa final que cuenta con dos clases temáticas: 1) forestal (que son todas las clases forestales en la zona de estudio y son la selva baja, la selva mediana, la selva alta y el bosque de pino) y 2) No forestal (donde se agrupan las clases de agricultura de temporal y riego, los cuerpos de agua y los pastizales).

Además del método utilizado en el proyecto DETER se llevaron a cabo otros dos métodos alternos el Análisis de Componentes Principales Selectivo (ACPS) y la Diferencia de Bandas Espectrales.

3.3.3. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES SELECTIVO (ACPS)

Se aplicó una técnica de detección de cambio multifecha con un algoritmo de realce de cambio que es el ACPS, el cual ha dado resultados satisfactorios en estudios anteriores (Mas, 1999; Mas y González, 2006). Esté método alterno nos servirá para comparar el método DETER con el ACPS. Este último funciona de la siguiente manera:

En aplicaciones multifecha, el ACPS utiliza solamente de entrada dos bandas espectrales, una por cada fecha en lugar de utilizar todas las bandas. En este sentido por usar únicamente dos bandas,

la información que es común en ambas fechas se encuentra en el primer componente y la información que es única, es decir, los cambios, se realza en la segunda componente (Mas, 1999). Se lleva a cabo una previa estandarización de las bandas espectrales que serán utilizadas con el objetivo de paliar el efecto de la distinta variabilidad entre las bandas.

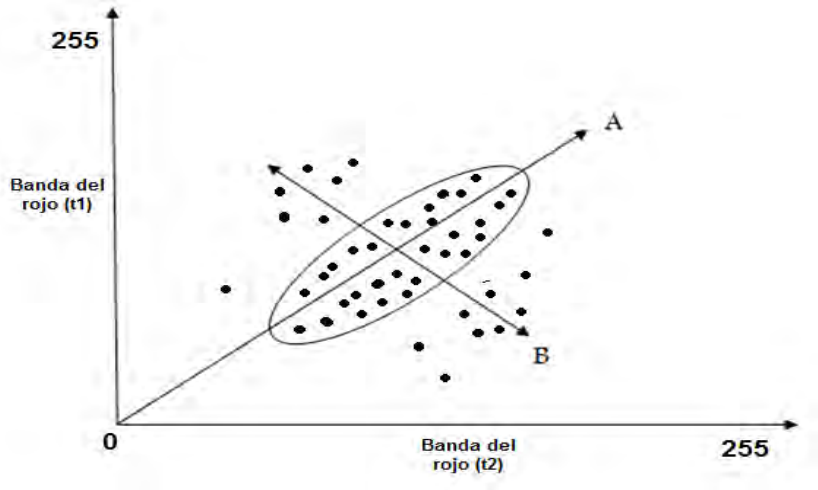


Figura 6: La información común entre ambas bandas se posiciona en la primer componente (A). Mientras que en la segunda componente (B) se realza la información del cambio.

El ACPS genera únicamente dos componentes de salida. La segunda componente que se refiere a los cambios es entonces reclasificada basándose en su histograma y se umbraliza a 1, 1-5 y 2 desviaciones estándar para generar imágenes de cambio.

Se utilizó el ACPS utilizando de base los resultados del criterio de separabilidad, con las siguientes bandas.

Tabla 12: Bandas utilizadas en la aplicación del ACPS.

ACPS Bandas de entrada		
Producto	**2001**	**2005**
MOD09GHK Producto diario	Banda roja	Banda roja
	NDVI	NDVI
MOD09Q Producto de 8 días	Banda roja	Banda roja
	NDVI	NDVI
MOD13Q1 Producto de 16 días	Banda roja	Banda roja
	NDVI	NDVI

Las imágenes finales de cambio se evaluaron con los mapas de referencia de alta resolución espacial.

3.3.4. DIFERENCIA DE BANDAS

En este método las bandas espectrales adquiridas en dos fechas son restadas píxel a píxel, para producir una imagen residual, la cual representa los cambios entre las dos fechas. Los píxeles de no cambio en la radiancia son distribuidos alrededor de la media, mientras los píxeles de cambio están distribuidos en los extremos de la distribución (Mas, 1999). La fórmula es la siguiente:

$$\mathbf{ND_C = ND_{t1} - ND_{t2}}$$

Donde $\mathbf{ND_c}$ indica el Nivel Digital correspondiente a la imagen de cambios,

$\mathbf{ND_{t1}}$ **y** $\mathbf{ND_{t2}}$ los correspondientes a las imágenes de la primera y segunda fecha, respectivamente.

El cálculo puede realizarse en base a los ND de las bandas originales, aunque también es muy frecuente en índices de vegetación. El valor de la diferencia nos permite señalar las zonas que han aumentado o disminuido su ND y podrían indicar los cambios de cobertura.

Para llevar a cabo esta aplicación se utilizaron las imágenes MOD13 de la **serie de tiempo** (esta serie de tiempo es un conjunto de imágenes MODIS del producto MOD13 de 16 días y abarca desde enero de 2000 a diciembre de 2005 que se descargaron de manera adicional para crear perfiles de tiempo y fueron utilizadas algunas imágenes para aplicar la Diferencia de Bandas). Se realizó el siguiente procedimiento: se tomaron cuatro imágenes de la primera fecha y cuatro para la segunda fecha que son de la época seca del año, se aplicó la diferencia de NDVI. Se obtuvieron cuatro imágenes de cambio que se reclasificaron con base en su histograma a 1-5 desviación estándar. Finalmente se calculó el número de pares de imágenes que indican un cambio,, para observar que fuera constante.

El mismo procedimiento se realizó con tres imágenes obtenidas de la época de lluvias de la primera y segunda fecha. A continuación se presenta una tabla con las imágenes utilizadas:

Tabla 13: Imágenes utilizadas en la Diferencia del NDVI.

Producto MOD13Q1	Año 2001	Año 2005
Época seca	1.-17 de enero al 01 de febrero	1.-17 de enero al 01 de febrero
	2.-18 de febrero al 05 de marzo	2.-18 de febrero al 05 de marzo
	3.-06 de marzo al 21 de marzo	3.-06 de marzo al 21 de marzo
	4.-22 de marzo al 06 de abril	4.-22 de marzo al 06 de abril
Época de lluvias	1.-29 de agosto al 13 de septiembre	1.-29 de agosto al 13 de septiembre
	2.-16 de octubre al 31 de octubre	2.-16 de octubre al 31 de octubre
	3.-17 de noviembre al 02 de diciembre	3.-17 de noviembre al 02 de diciembre

Los mapas finales de cambio se validaron con el mapa de deforestación para obtener las tablas de fiabilidad.

3.3.5. MÁSCARA

Una vez que se tienen las imágenes finales de cambio, producto de la metodología DETER, del ACPS y de la Diferencia de NDVI se les aplicó una máscara para separar las coberturas forestales de las no forestales, pero para llevar a cabo este procedimiento se crearon tres diferentes máscaras:

a).- Máscara generada de la aplicación del método DETER al producto MODIS de 16 días 2001. Que se utilizó para validar el producto MODIS de 16 días 2005 y que llamaremos **Máscara DETER 16 días.**

b).- Máscara generada de la aplicación del método DETER al producto MODIS diario 2001 y se utilizó para validar el producto MODIS diario 2005 y que llamaremos **Máscara DETER diario.**

c).- Máscara generada de la digitalización en pantalla de las imágenes de satélite de alta resolución ASTER y Landsat de 2001. Esta máscara se utilizó para validar todas las imágenes de cambio resultantes del método DETER, del ACPS y de la Diferencia de NDVI. A esta le llamaremos **Máscara de alta resolución**.

3.4. EVALUACION DE LA FIABILIDAD

La evaluación de la fiabilidad se realiza con el propósito de validar los resultados de los mapas de cambio resultantes de las clasificaciones de imágenes multifecha. Esta evaluación de la fiabilidad se realiza por medio de la información ya generada anteriormente como puede ser: cartografía en detalle, fotografías aéreas o con trabajo de campo, donde está información es aceptada como válida y será comparada con las clasificaciones finales.

Comúnmente la evaluación de la fiabilidad está representada por matrices de cambio, donde se pueden generar varías medidas estadísticas que permiten validar los resultados de los distintos métodos de clasificación. La medida más sencilla de calcular es la fiabilidad global donde se relacionan los elementos de la diagonal con el total de puntos muestreados.

3.4.1. FIABILIDAD DEL PRODUCTOR Y DEL USUARIO

Como la fiabilidad global de una matriz de cambio no toma en cuenta los residuales en filas y columnas, entonces se realizan otra serie de estadísticas para tomar en cuenta estos residuales. Dependiendo de cómo se generen las matrices de cambio, en muchas ocasiones los residuales en columnas representan el error de omisión, que representan polígonos de deforestación que no se detectaron en las imágenes de cambio, mientras que los residuales en las filas indican deforestación en la imagen de cambio que no se ajusta a la realidad y representan los errores de comisión.

En otras palabras, si para la categoría deforestación el error de omisión es bajo, existe una alta probabilidad de que la superficie desmontada haya sido detectada en la imagen de cambio, lo que significa un logro para el **productor** del mismo. Sin embargo, puede existir un alto error de comisión lo que significa, qué, la fiabilidad de las áreas clasificadas como desmonte sea muy baja, esto supone un grave riesgo para el **usuario** de la información. Ambos errores están muy relacionados pero puede ocurrir que uno sea muy bajo cuando el otro es elevado, entonces se habla de **fiabilidad del productor y fiabilidad del usuario.**

En este trabajo el mapa de referencia se obtuvo de la interpretación visual de las imágenes de alta resolución espacial (SPOT y ASTER) y están representados en un mapa con 12 polígonos de desmonte de más de 25 hectáreas. Esté mapa se comparó con los obtenidos de MODIS resultado del método DETER, el ACPS y la Diferencia de Bandas, y con base en esta comparación se diseñaron una serie de tablas donde se obtienen las estadísticas y porcentajes de acierto detectados por los diferentes métodos de cambio.

3.4.2. EVALUACIÓN DE LOS MAPAS DE CAMBIO

Para evaluar los resultados se utilizaron dos enfoques distintos, los cuales están basados en las tablas que se explican a continuación:

1.- Tabla para el cálculo de la Fiabilidad del Productor (en adelante le llamaremos **primer método de validación**). Esta tabla reporta el **número de píxeles detectados** de cada polígono de desmonte, así como el **número de polígonos detectados** por cada mapa de cambio, donde se considera como acierto si es detectado de manera parcial o total. Esta tabla tiene un sesgo optimista ya que proporciona únicamente la fiabilidad del productor y considera como acierto un polígono detectado parcialmente.

2.- Tabla para calcular la fiabilidad del productor y la fiabilidad del usuario (en adelante le llamaremos **segundo método de validación**). En esta tabla se toma en cuenta que pueden existir ciertos desfases entre las diferentes imágenes utilizadas, por lo tanto se aplicó una tolerancia de desplazamiento de 125 m. a los polígonos de desmonte. Por esta razón hablamos de **fiabilidad del productor con tolerancia y sin tolerancia;** y de **fiabilidad del usuario con tolerancia y sin tolerancia**.

3.5. PERFILES Y SERIE DE TIEMPO

Como se mencionó anteriormente se descargaron las imágenes MODIS del producto MOD13 para el período 2000-2005 y se utilizaron para elaborar una serie de tiempo con los valores del NDVI cada 16 días para este período. Se identificaron cuales son los píxeles de deforestación que corresponden a los 12 polígonos de cambio y representan la pérdida de vegetación para el año 2005; entonces se crearon algunos perfiles para ver su variación en el tiempo. En total son 5 perfiles correspondientes a píxeles de desmonte, así como 5 perfiles de píxeles que cambiaron según los mapas resultantes de los métodos DETER, ACPS y Diferencia de NDVI y que representan falsos desmontes. Finalmente se obtuvieron los datos de precipitación para la zona de estudio y se sobrepusieron a la serie de tiempo.

CAPITULO 4: RESULTADOS

4.1. PRE-PROCESAMIENTO

4.1.1. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA

Para la corrección geométrica de las imágenes ASTER del año 2001 se utilizaron puntos de control tomados de la carta topográfica 1:250,000 correspondiente a Salina Cruz en donde se distinguen algunos rasgos naturales y antrópicos en su mayoría poblados y cruces de carreteras. En la siguiente figura se muestran los puntos de control utilizados. La imagen fue remuestreada con el método del vecino más cercano y con un error medio cuadrático de 1.001 píxeles.

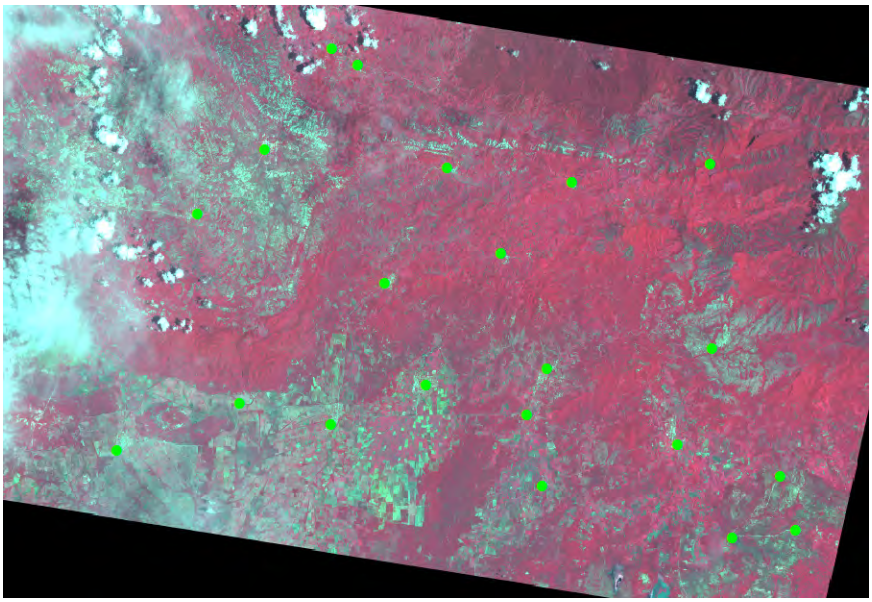


Figura 7: Puntos de control utilizados para la corrección geométrica en la imagen ASTER 2001.

La imagen ASTER corregida, se utilizó de base para georreferenciar las imágenes Landsat 2001 y SPOT 2005 con el método de imagen a imagen, obteniendo en el primer caso un error medio de 0.860 y en el segundo 1.250 píxel.

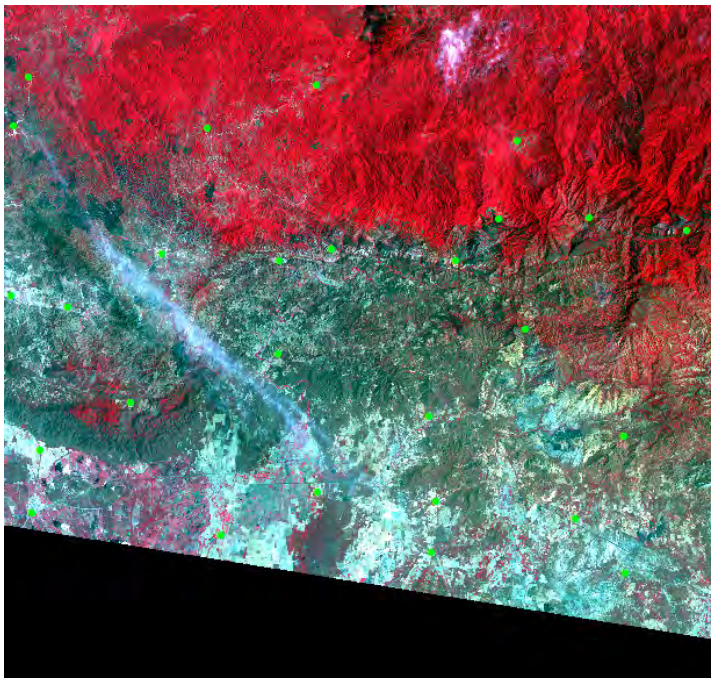


Figura 8: Distribución de los puntos de control para realizar la corrección geométrica en la imagen Landsat 2001.

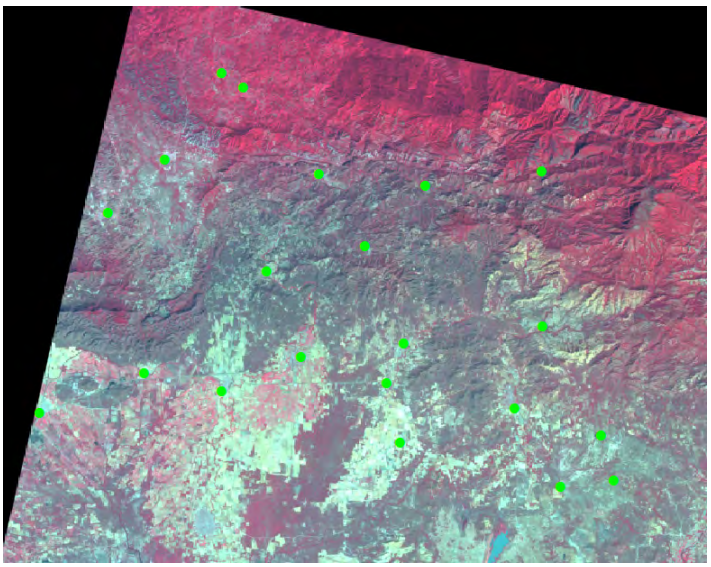


Figura 9: Puntos de control utilizados para la corrección geométrica en la imagen SPOT 2005.

Las imágenes MODIS presentan una excelente calidad geométrica (precisión de 50 m. al nadir) y para reproyectarlas se utilizó el software MRT (MODIS Reprojection Tool) el cual presenta la siguiente interfaz gráfica:

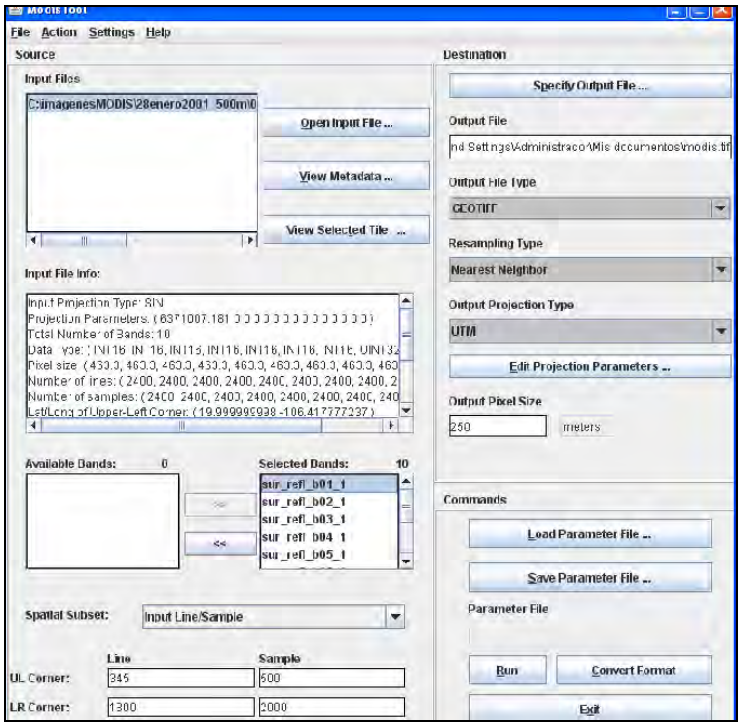


Figura 10: Interfaz del MRT en la cual se asignan los parámetros con los cuales serán reproyectadas las imágenes MODIS como son la zona UTM, el tamaño del píxel de salida, el método de remuestreo y las coordenadas extremas.

Las imágenes corregidas y recortadas se muestran a continuación:

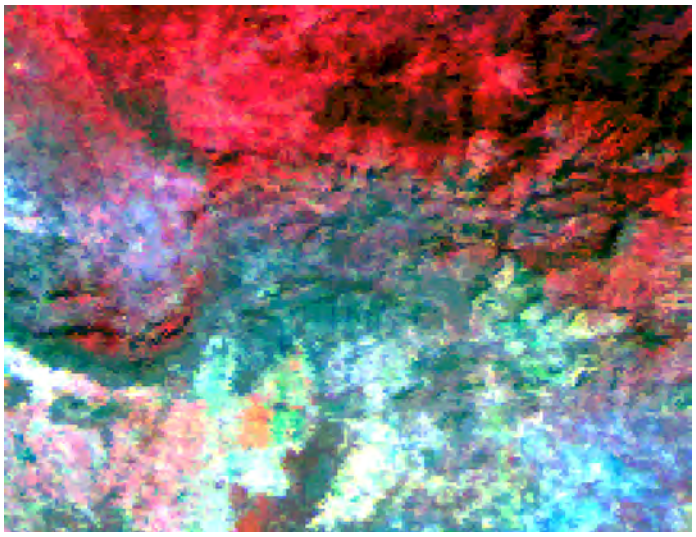


Figura 11.: Imagen MODIS en falso color que corresponde al 28 de enero de 2001.

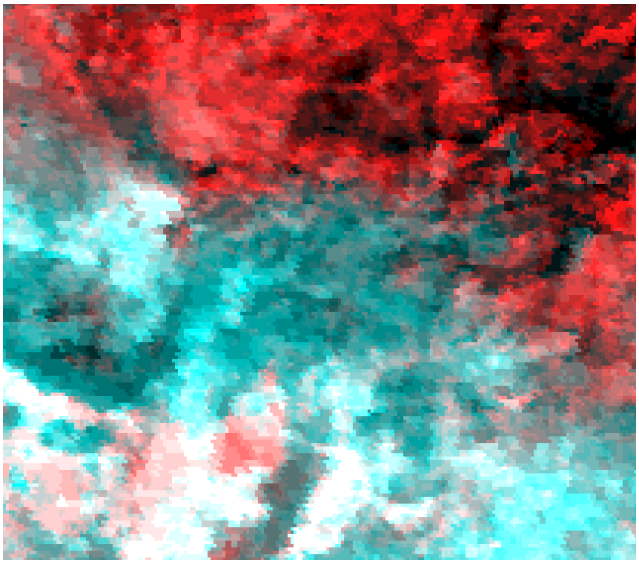


Figura12: Imagen MODIS en falso color del 21 de enero de 2005.

Este corte se aplicó a todos los productos MODIS (diario, semanal y quincenal) con los que se trabajó.

4.2. PROCESAMIENTO

4.2.1. EVALUACIÓN DE LA SEPARABILIDAD (DIVERGENCIA TRANSFORMADA)

Para evaluar la separabilidad espectral se definieron primero los campos de entrenamiento de las categorías forestales (selva alta, selva mediana, selva baja y bosque de pino) y no forestales (pastizal, agricultura de riego, agricultura de temporal y cuerpos de agua).

Los campos de entrenamiento los utiliza el algoritmo de Divergencia Transformada para analizar estadísticamente banda por banda las diferentes coberturas. En la siguiente figura se observa los datos de entrada:

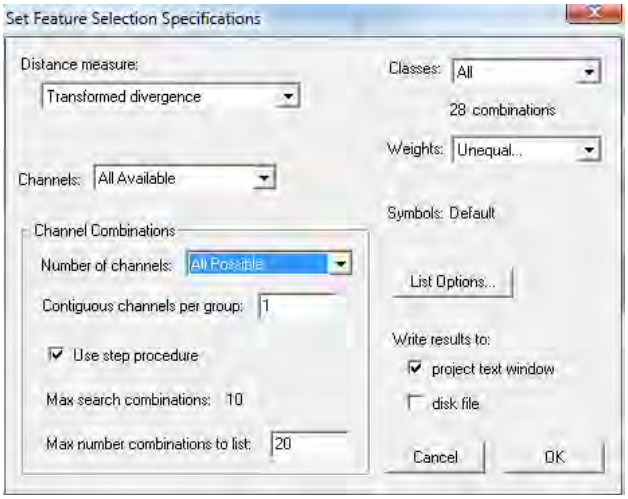


Figura 13: En esta interfaz se adoptan los parámetros para la separabilidad, se seleccionan las bandas utilizadas y se les da un peso mayor de discrimación entre las coberturas forestales y no forestales.

En la siguiente tabla se observan los valores establecidos para determinar la separabilidad entre clases.

Tabla 14: Valores de separabilidad que utiliza la Divergencia Transformada (Tomada de Pinheiro 2006).

SEPARABILIDAD ENTRE CLASES	
2000	**Excelente**
>1900	**Buena**
<1700	**Mala**

Con base en estos valores se determinan cuales son las bandas que discriminan mejor nuestras categorías de interés. La separabilidad muestra las mejores posibles combinaciones utilizando 1, 2, 3, 4….n bandas espectrales dependiendo del número de bandas utilizadas.

Los resultados del criterio de separabilidad se resumen en la siguiente tabla, cabe recordar que se utilizaron los productos de MOD13Q1 (NDVI 16 días) y MOD09Q13 (producto diario), el producto MOD09 de 8 días no se le aplicó el criterio por contar con dos bandas espectrales.

Tabla 15: Separabilidad espectral con los productos de reflectancia diarios (2001-2005) con una banda y la combinación de tres bandas espectrales.

MOD09GHK Producto diario (una banda)			
2001	**Promedio**	**2005**	**Promedio**
Banda 4 Verde	1851	Banda 1 Rojo	1935
Banda 3 Azul	1754	Banda 4 Verde	1875
Banda 1 Rojo	1721	Banda 3 Azul	1858
Banda 7 IRMc*	1674	Banda 6 IRMb*	1788
Banda 5 IRMa*	1623	Banda 7 IRMc*	1722
Banda 6 IRMb*	1618	Banda 5 IRMa*	1630
Banda 2 IRC*	1232	Banda 2 IRC*	1135
MOD09GHK Producto diario (combinación con 3 bandas)			
2001	**Promedio**	**2005**	**Promedio**
Bandas Rojo-IRMa*-IRMc*	1965	Bandas Rojo-IRC*-IRMb*	1994
Bandas Azul-Verde-IRMa*	1963	Bandas IRC*-Azul-Verde	1992
BandasVerde-IRMa*-IRMb*	1962	Bandas IRC*-Verde-IRMa*	1992
Bandas IRC*-Verde-IRMa*	1961	Bandas IRC*-Verde-IRMc*	1991
Bandas Rojo-Verde-IRMa*	1956	Bandas IRC*-Verde-IRMc*	1991

IRC*= Infrarrojo de onda corta
IRMa*= Infrarrojo de onda media (1230-1250 nm).
IRMb*= Infrarrojo de onda media (1628-1652 nm).
IRMc*= Infrarrojo de onda media (2105-2155 nm).

En esta tabla se aprecia que la "mejor" banda para discriminar las coberturas forestales de las no forestales en la primera fecha es la región del Verde con un promedio de 1851 y para la segunda fecha es la región del Rojo con un promedio de 1935. En la combinación de tres bandas las mejores son Rojo, IRMa e IRMc con un promedio de 1965 en la primera fecha y Rojo, IRC e IRMb para la segunda fecha y un promedio de 1994.

Los resultados de la separabilidad espectral con el producto de 16 días se muestran a continuación.

Tabla 16: Separabilidad espectral con las reflectancias de 16 días con una banda y la combinación de tres bandas.

MOD13Q1 Producto de 16 días (Una banda)			
2001	**Promedio**	**2005**	**Promedio**
Banda Rojo	1668	Banda Rojo	1640
Banda Azul	1641	Banda Azul	1575
Banda IRM*	1583	Banda IRM*	1385
Banda IRC*	627	Banda IRC*	756
MOD13Q1 16 días, Combinación con 3 bandas			
2001	**Promedio**	**2005**	**Promedio**
Bandas Rojo-IRC*-IRM*	1904	Bandas Rojo-IRC*-IRM*	1905
Bandas Azul-Rojo-IRC*	1894	Bandas Azul-Rojo-IRC*	1878

IRC* Infrarrojo de onda corta.
IRM* Infrarrojo de onda media.

En ambas fechas la banda que separa mejor es la del visible rojo. La combinación de las tres bandas (rojo, IRC e IRM) mejora la separabilidad.

Recordando las categorías de interés se pueden representar estos valores de forma gráfica como se muestran en las siguientes figuras:

Forestales
1.- selva alta
2.- selva mediana
3.- selva baja
4.- bosque de pino

No Forestales
5.- pastizal
6.- agricultura de temporal
7.- agricultura de riego
8.- cuerpo de agua

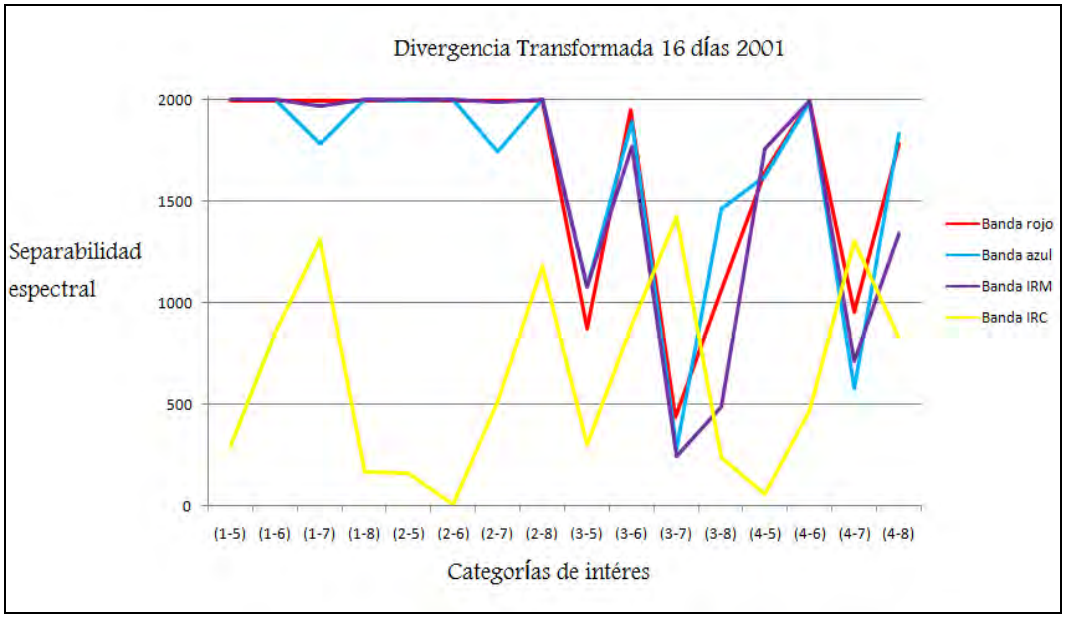


Figura 14: Separabilidad aplicada a las 4 bandas espectrales del producto MOD13 de 16 días año 2001. Donde las categorías de mayor confusión con las tres primeras bandas (rojo, azul y IRM) son la3-5 (selva baja caducifolia-pastizal), 3-7 (selva baja caducifolia-agricultura riego) y la 4-7 (bosque de pino-agricultura de riego).

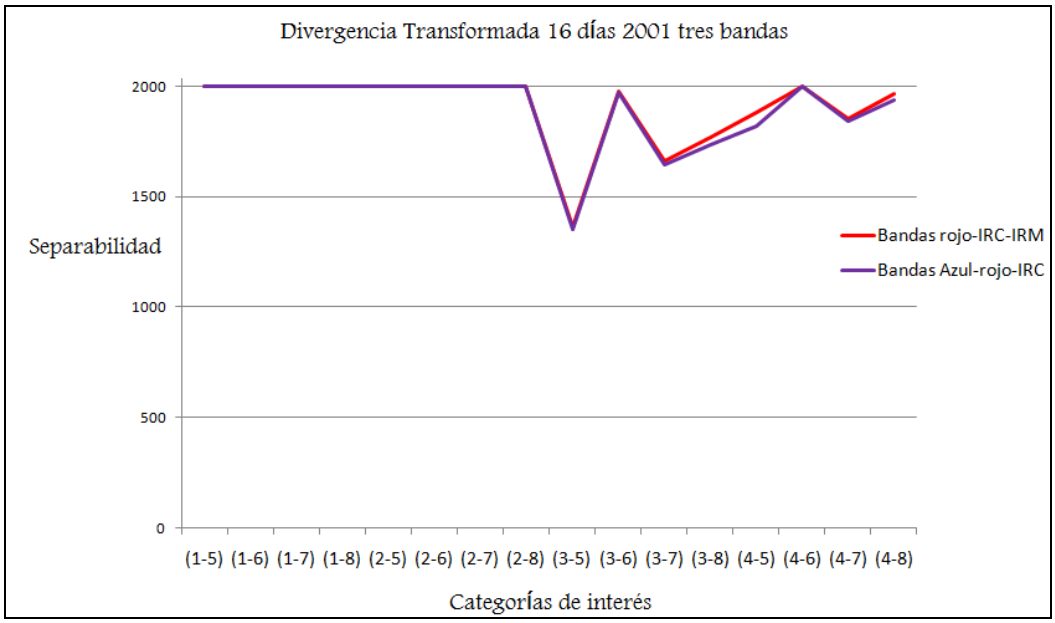


Figura 15: Separabilidad con la combinación de tres bandas espectrales (MOD13). En general se presentan valores cercanos a los 2000 que es la máxima separabilidad entre clases. Existe mayor confusión entre las clases 3-5 (selva baja caducifolia-pastizal).

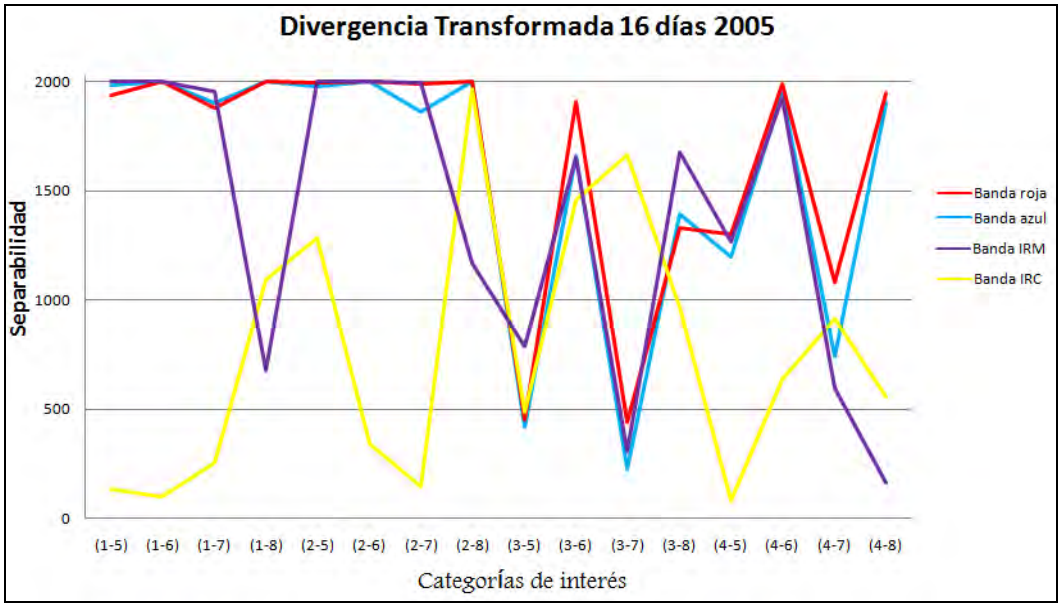


Figura 16: Separabilidad espectral con el producto MOD13 de 16 días del año 2005 utilizando las 4 bandas espectrales. Las mayores confusiones son entre las clases 3-5 (selva baja caducifolia-pastizal), 3-7 (selva baja caducifolia-agricultura de riego) y 4-7 (bosque de pino-agricultura de riego).

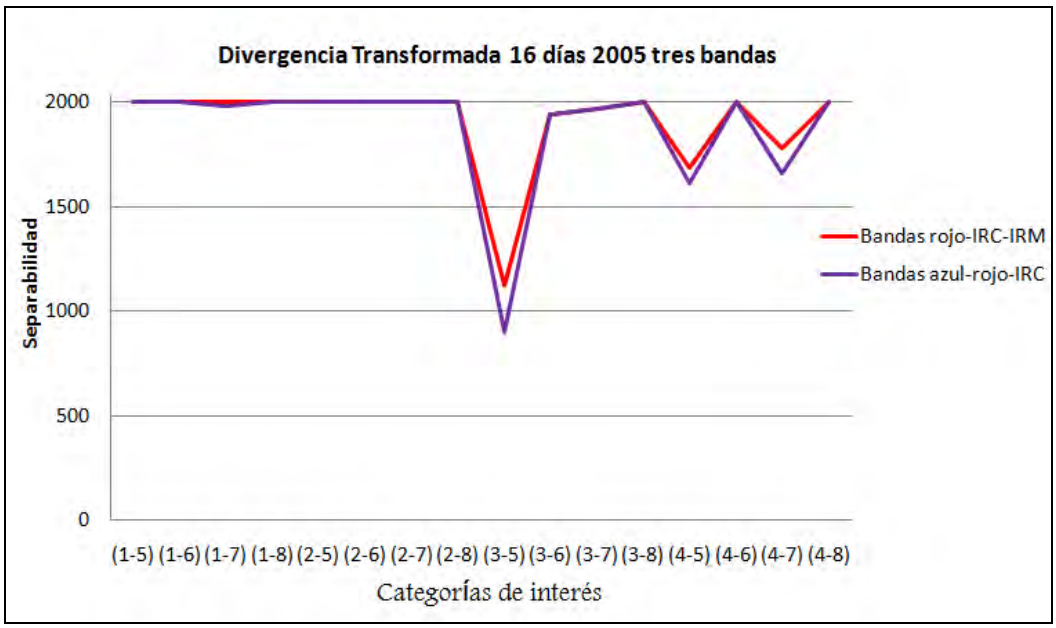


Figura 17: Separabilidad espectral en combinación de tres bandas del producto MOD13 de 16 días de 2005. La mayor confusión se presenta entre las clases 3-5 (selva baja caducifolia-pastizal). Se alcanza una mejor separabilidad con la combinación rojo-IRC-IRM.

La separabilidad espectral se analizó con las imágenes utilizadas. Con base en los resultados obtenidos se determinó que las bandas utilizadas en la aplicación del MLME serían rojo-IRC-IRM, y para la aplicación del ACPS se seleccionaron las bandas del rojo y el NDVI.

4.2.2. MÉTODO DETER

Inicialmente se aplicó el MLME al producto diario y al producto de 16 días de 2001, para generar la **Máscara DETER diario** y la **Máscara DETER 16 días** utilizadas para separar el área forestal de la no forestal.

Las bandas que se utilizaron para aplicar el MLME son las siguientes:

Tabla 17: Bandas espectrales utilizadas en este proyecto.

2001	2005	Rango espectral
MODIS-1	**MODIS-1**	Rojo 620-670 nm.
MODIS-2	**MODIS-2**	IRC 840-870 nm.
MODIS-6	**MODIS-6**	IRMb 1620-1650 nm.
MODIS-4*	**MODIS-4***	Verde 545-565 nm.

***La banda numero 4 se utilizo únicamente para el MLME con 5 componentes.**

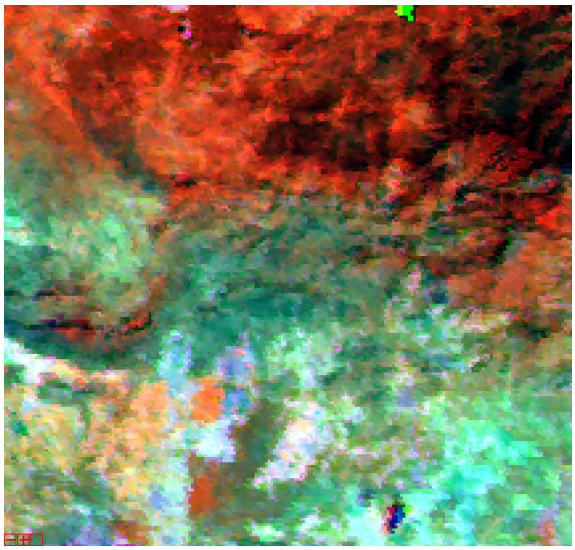


FIGURA 18.- Sobre la imagen en falso color se seleccionan los campos de entrenamiento que sirven para aplicar el MLME de tres componentes: suelo, vegetación y sombra.

Como resultado del MLME se obtienen tres imágenes sintéticas que representan la fracción sombra, vegetación y suelo.

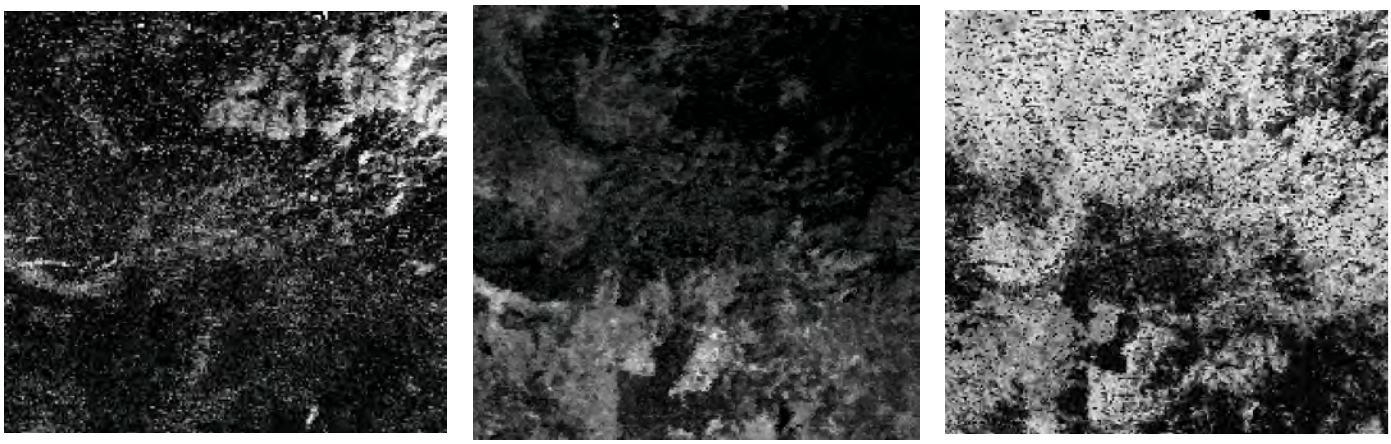


Figura 19.- Imágenes fracción sombra, suelo y vegetación de la primera fecha.

Enseguida se realizó la segmentación de la imagen fracción suelo con el algoritmo de crecimiento de regiones utilizando el umbral de similitud 4 y límite de área de 1 píxel.

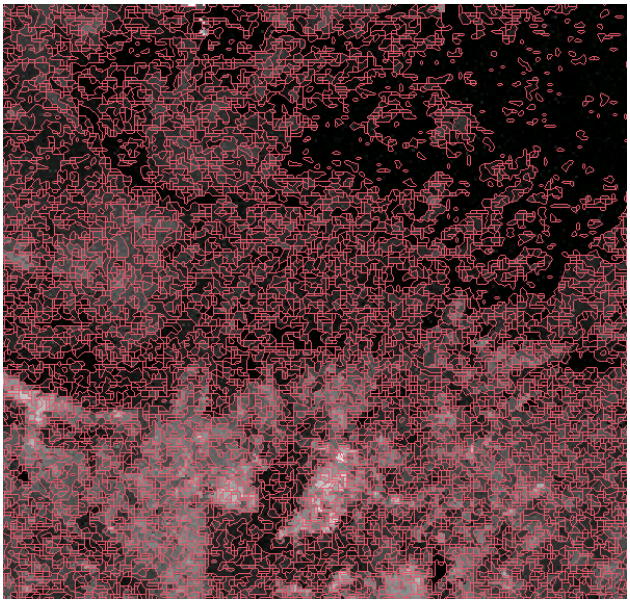


Figura 20:- Imagen segmentada fracción suelo.

Segmentada la imagen fracción suelo se realizó la extracción de regiones y se aplicó la clasificación de la imagen; está se realizó con el clasificador ISOSEG con un límite de aceptación de 95% como se observa en la siguiente figura.

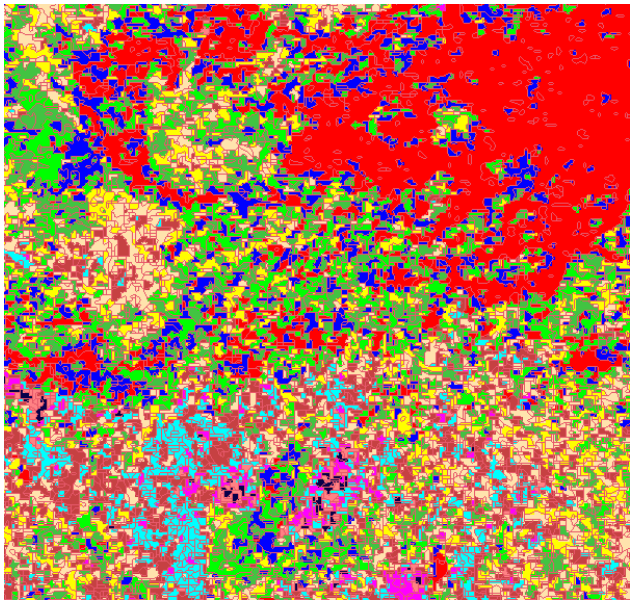


Figura 21- Imagen clasificada basada en la segmentación previa de la imagen fracción suelo.

Se clasificaron los clusters resultantes en dos categorías: forestal y no forestal. Con ayuda de la edición matricial se corrigieron los posibles errores de clasificación para obtener la imagen final que servirá de máscara para la segunda fecha 2005.

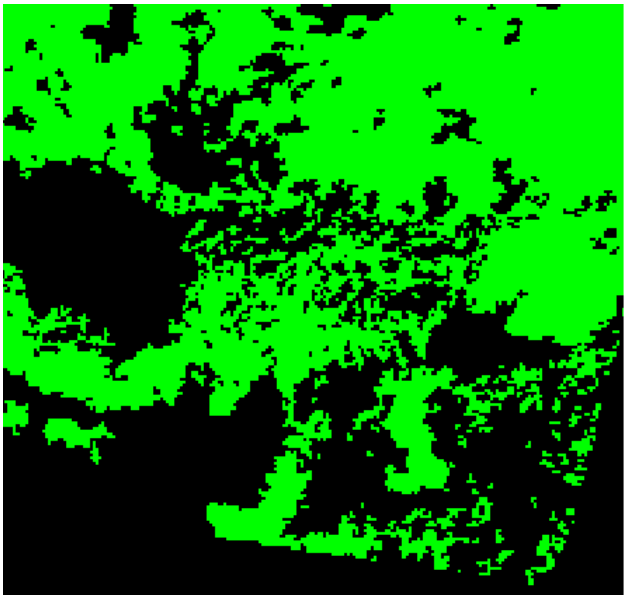


Figura 22.- Imagen final que muestra únicamente la cobertura forestal en color verde y la máscara de color negro.

El método DETER se aplicó a los productos diarios y de 16 días de la segunda fecha (2005) y también cabe mencionar que en ambos casos se aplicó un cuarto componente que es la fracción selva baja caducifolia, ya que una amplia zona está cubierta de esta vegetación y tiene una reflectividad diferente a la de la vegetación perenne (selva alta). Finalmente se aplicó un quinto

componente que corresponde a la selva mediana que es menos densa que la selva alta, por lo tanto tenemos seis imágenes finales para el cambio; tres del producto de 16 días y tres del producto diario.

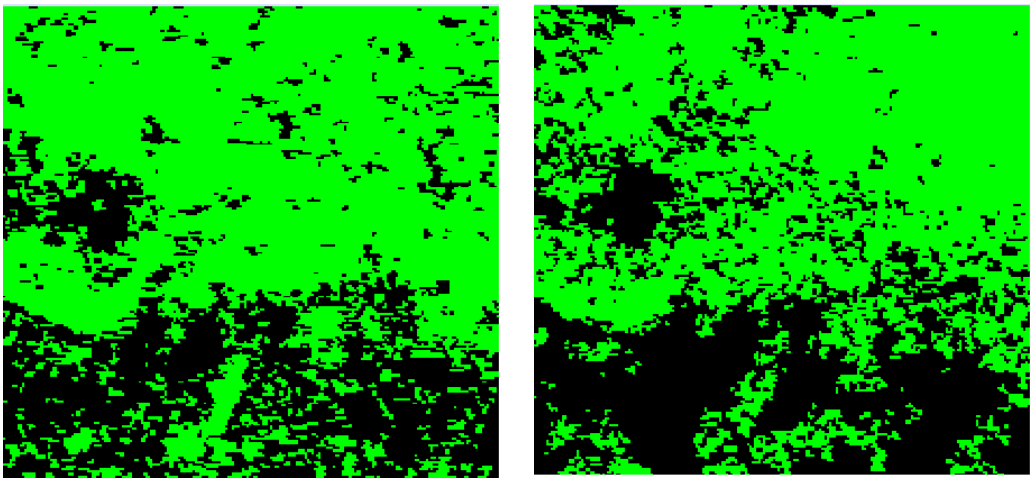


Figura 23.- Imágenes finales de cambio del producto diario. A la izquierda con tres componentes y a la derecha con cuatro componentes. De verde las coberturas forestales y de negro las coberturas no forestales.

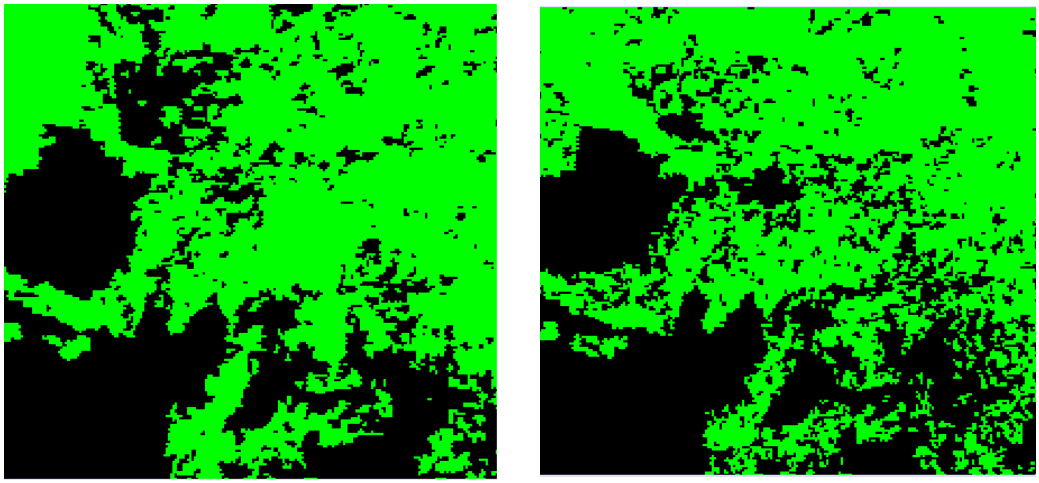


Figura 24.- Imágenes finales de cambio del producto de 16 días. A la izquierda con tres componentes y a la derecha con cuatro componentes. Se indican en verde las coberturas forestales y en negro las coberturas no forestales.

Estas imágenes finales se sobrelapan con los mapas de verificación obtenidos de la interpretación visual de imágenes SPOT, ASTER y Landsat para así obtener la fiabilidad de cada imagen de cambio.

4.2.3. ACPS

Se utilizó la banda roja de cada fecha por ser la que mejor separa las clases de interés y el NDVI por ser ampliamente utilizado en los procesos de detección de la deforestación.

Los resultados se muestran a continuación:

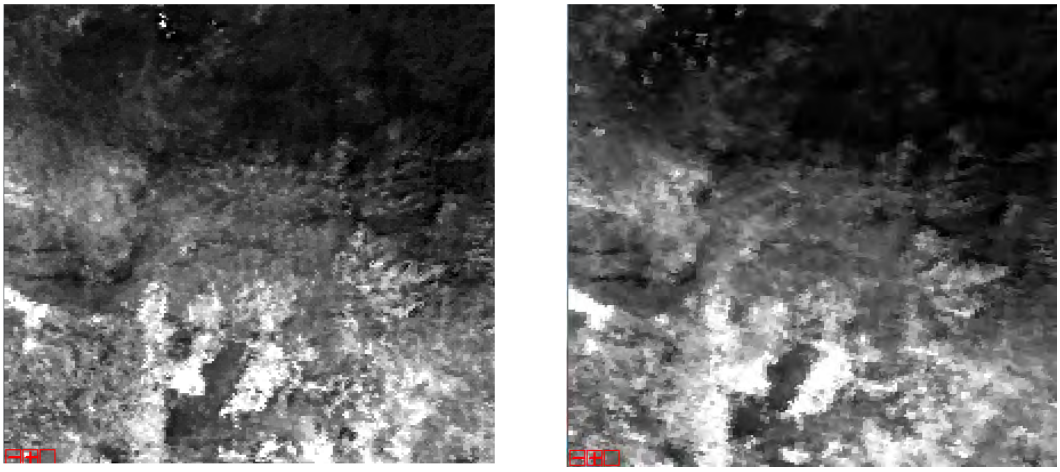


Figura 25.- Bandas de entrada del ACPS, banda del rojo a la izquierda 2001 y banda del rojo a la derecha 2005 de los productos diarios MOD09.

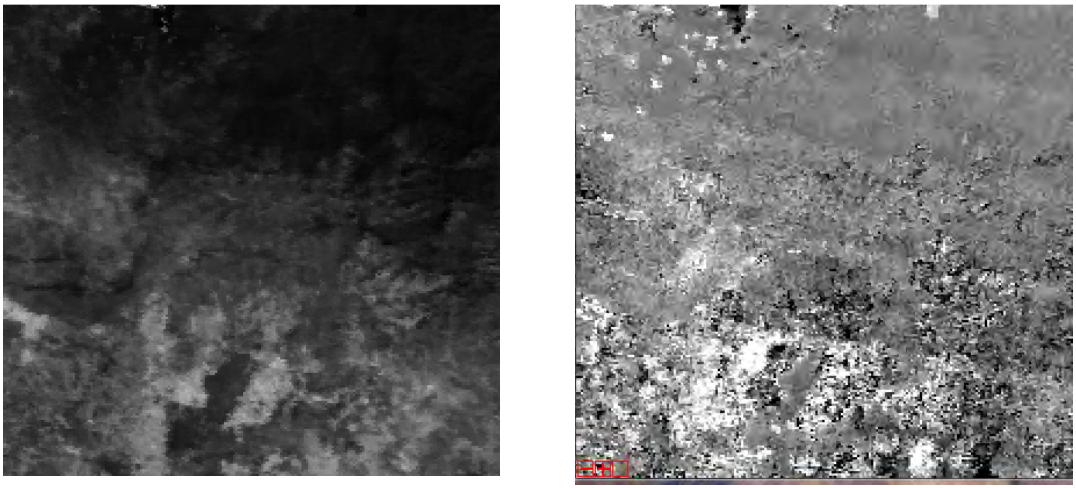


Figura 26.- Dos componentes principales; a la izquierda el primer componente, donde se ubican los píxeles que se mantuvieron estables; y a la derecha la segunda componente, donde se realzan los píxeles de cambio (tonos claros).

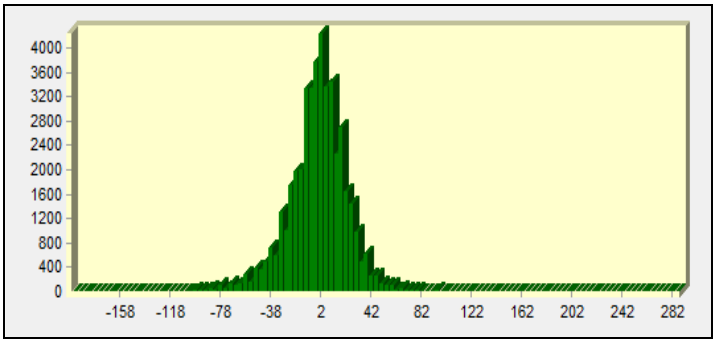
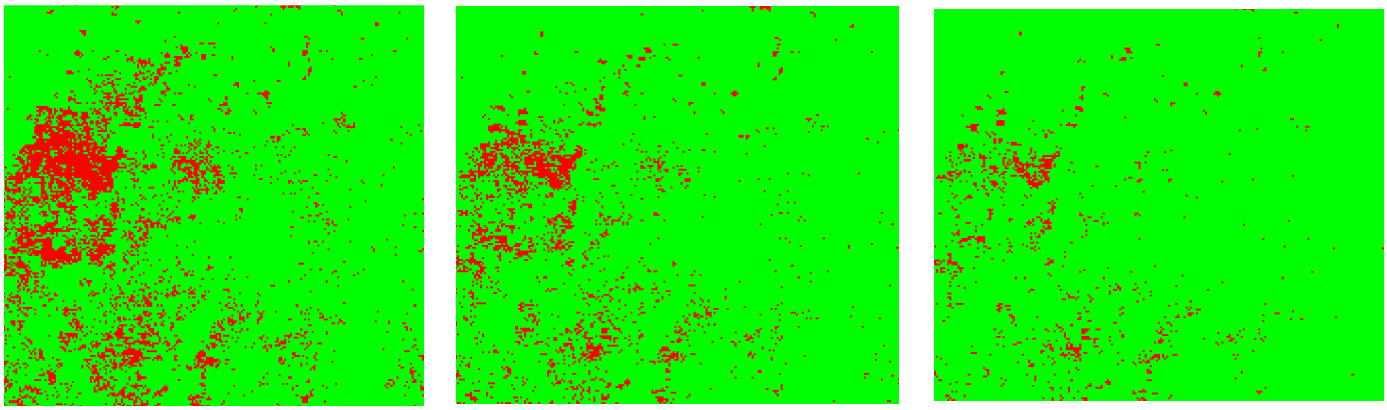


Figura 27: Con base en el histograma de la segunda componente se reclasifica la imagen a 1, 1-5 y 2 desviaciones estándar para determinar cual obtiene la fiabilidad más alta.



1 Desviación Estándar | 1-5 Desviación Estándar | 2 Desviaciones Estándar

Figura 28.- Imágenes resultantes de la umbralización de la segunda componente del ACPS con 1 1-5 y 2 desviaciones estándar sobre la banda del rojo. El color verde representa los píxeles de no cambio, mientras el color rojo los píxeles de cambio. La cantidad de cambio disminuye conforme el umbral se aleja del centro del histograma.

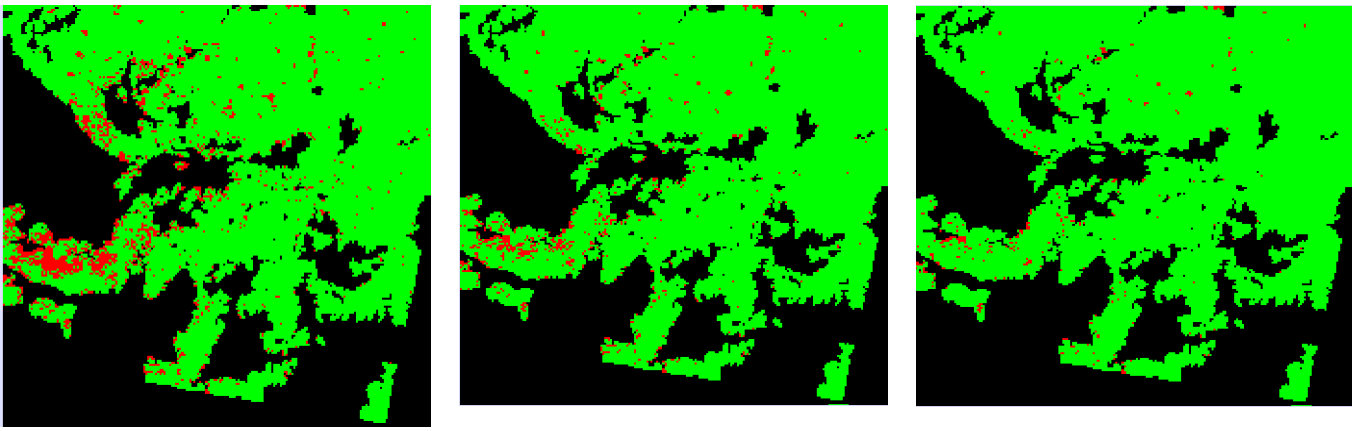


Figura 29.- A las imágenes de cambio, se aplica la máscara de alta resolución generada de la interpretación visual.

El mismo procedimiento se realizó con la banda del rojo y el NDVI del producto de 8 días y el producto de 16 días, obteniendo 9 imágenes finales de cambio.

4.2.4. DIFERENCIA DE BANDAS

4.2.4.1. DIFERENCIA DE NDVI (ÉPOCA SECA)

La Diferencia de Bandas espectrales se aplicó a los NDVI de la época seca y de la época de lluvias. Las imágenes de cambio se umbralizaron a 1.5 desviación estándar.

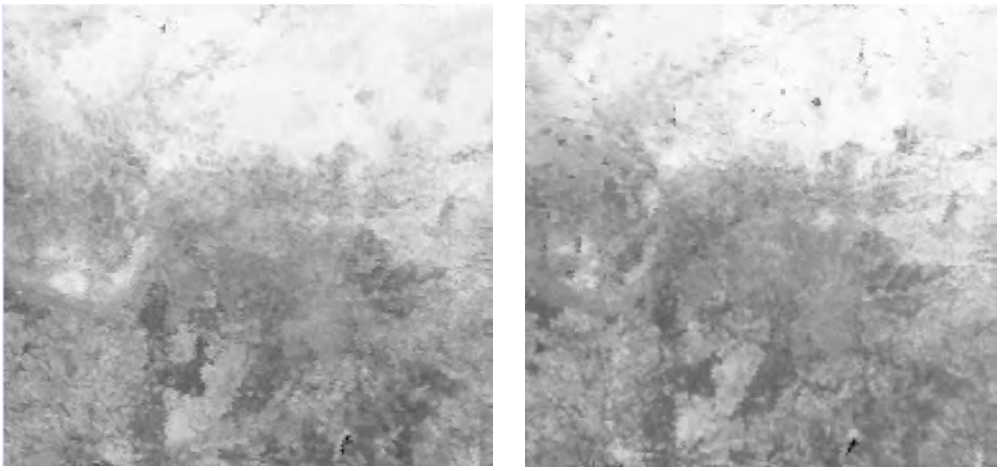


Figura 30: NDVI de enero 2001 (izquierda) y NDVI de enero 2005 (derecha).

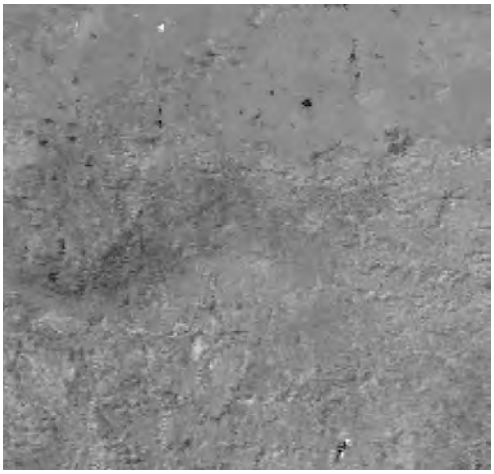


Figura 31.- Imagen de cambio de la época seca que será reclasificada en base a su histograma.

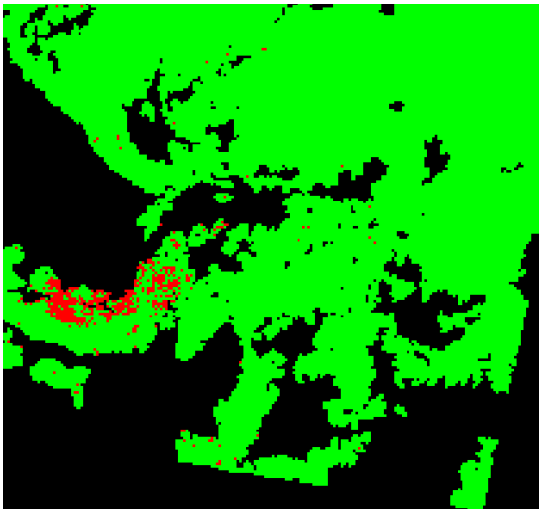


Figura 32.- Imagen final de cambio que será validad con el mapa de referencia.

Este mismo procedimiento se realizó a los tres pares de mapas de la época seca del año.

4.2.4.2. DIFERENCIA DE NDVI (ÉPOCA DE LLUVIAS)

También se aplicó la Diferencia de Bandas a tres NDVI de la época lluviosa.

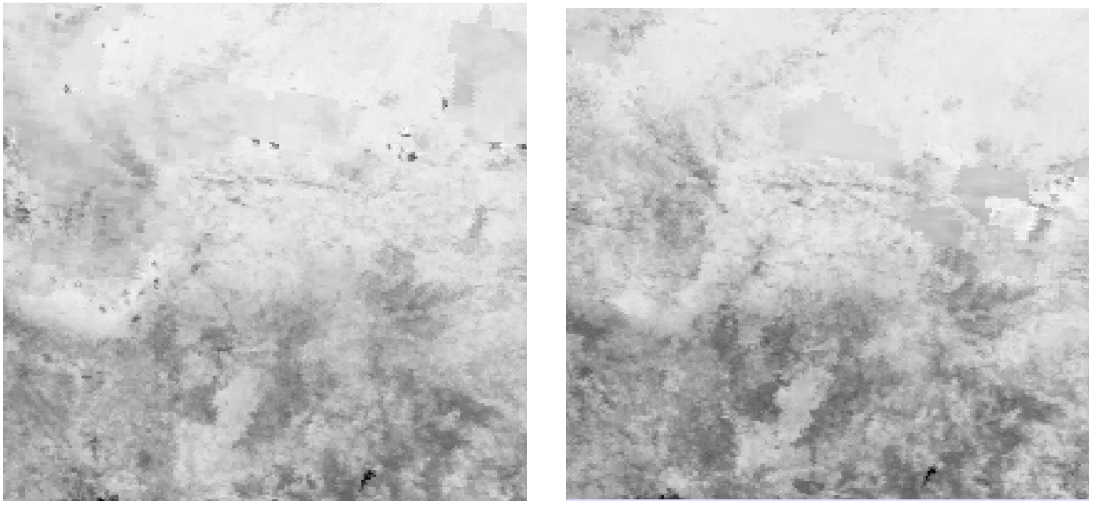


Figura 33.- NDVI de agosto 2001(izquierda) y NDVI de agosto 2005 (derecha) de la época de lluvias.

En comparación con las imágenes de la época seca, estas imágenes son muy diferentes ya que la selva baja caducifolia refleja valores altas debido a que es muy sensible a las lluvias y por consiguiente reverdece de manera importante.

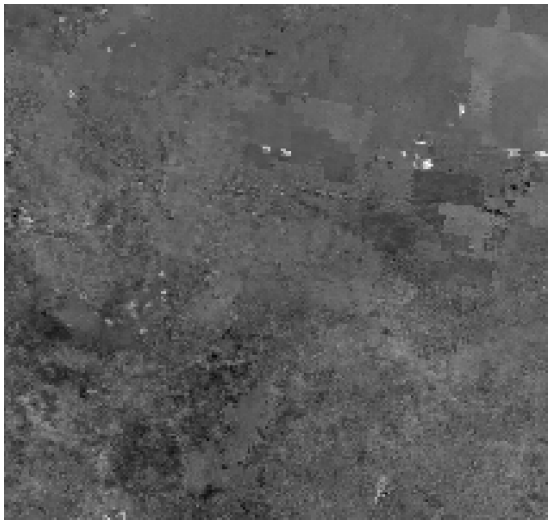


Figura 34.- Imagen de cambio de la época de lluvias que fue umbralizda a 1.5 de deviación estándar.

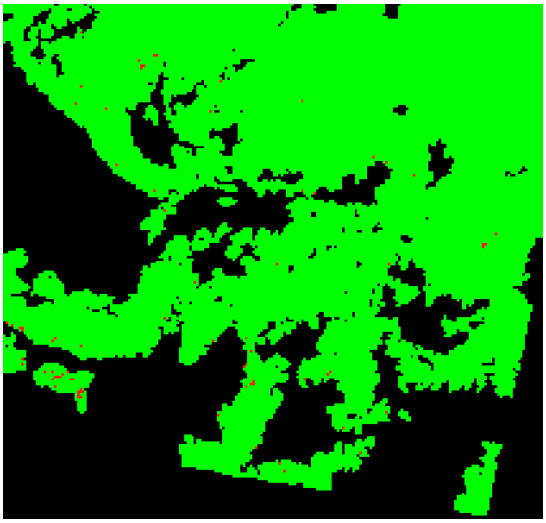


Figura 35.- Imagen final de cambio de la época de lluvias que será validada con los mapas de deforestación.

El mismo procedimiento se aplicó a los otros dos pares de NDVI de la época de lluvias. Una vez que se tienen las imágenes finales de cambio, estas se cruzan con los mapas de deforestación para validar los resultados.

4.3. EVALUACIÓN DE LA FIABILIDAD

4.3.1. DETER

4.3.1.1. DETER DE 16 DÍAS (PRIMER MÉTODO DE VALIDACIÓN)

Cuando se realiza el cruce entre mapas (los de cambio, resultantes de las clasificaciones y el de referencia deforestación) se obtienen las estadísticas que son utilizadas para generar las tablas que muestran los desmontes detectados**.** La primer tabla llamada **fiabilidad del productor** se presenta a continuación con los resultados para el mapa de cambio generada por el **método DETER de 16 días 2005** y utilizando cuatro componentes**.**

Tabla 18: Ejemplo de tabla de productor.

DETER de 16dias 2005 con 4 Componentes		Máscara Alta Resolución	
Desmonte	**total píxeles**	**Píxeles detectados**	**%**
1	4	0	0
2	3	3	100
3	2	2	100
4	2	0	0
5	8	8	100
6	5	0	0
7	3	0	0
8	7	7	100
9	2	2	100
10	3	3	100
11	1	1	100
12	19	11	58
total	**59**	**37**	**63**
Fiabilidad del productor = 63 %			
polígonos	**12**	**8**	**67**
Porcentaje de polígonos detectados = 67 %			

El promedio final de la fiabilidad del productor para este método es de 63%, lo que quiere decir, que detectó el 63% de los píxeles de deforestación. Por otra parte, de 12 polígonos de cambio, detectó 8 de manera completa o parcial dando como porcentaje de polígonos detectados 67%.

En resumen se obtuvieron los siguientes resultados de los promedios finales de la fiabilidad del productor y del porcentaje de polígonos detectados en la aplicación del DETER al producto de 16 días 2005 con 3, 4 y 5 componentes; además se aplicaron dos máscaras: 1) la **máscara DETER 16 días;** y 2) **máscara alta resolución**.

Tabla 19: Resumen de los resultados para la fiabilidad del productor y del porcentaje de polígonos detectados, para el método DETER de 16 días 2005. Las tablas completas se pueden observar en el anexo A.

Producto de 16 días 2005	Fiabilidad del productor con la **máscara Alta Resolución**	Porcentaje de polígonos detectados	Fiabilidad del productor con la **máscara DETER 16 días**	Porcentaje de polígonos detectados
DETER con 3 componentes	29%	42%	23%	36%
DETER con 4 componentes	63%	67%	57%	64%
DETER con 5 componentes	42%	75%	34%	55%

En esta tabla se puede apreciar que los mejores resultados en cuanto a la fiabilidad del productor se obtuvieron con el método DETER de 4 componentes con la máscara de alta resolución. Este método detectó el 63% de los desmontes lo cual puede ser aceptable. En cuanto al porcentaje de polígonos detectados el método de mayor acierto fue el DETER de 5 componentes con 75%. Lo que quiere decir que de 12 polígonos de cambio detecta 9 de manera total o parcial.

Se puede apreciar que existe una diferencia considerable en la aplicación de las máscaras utilizadas, ya que la máscara de alta resolución proporciona mayor porcentaje de acierto con respecto a la máscara generada del método DETER.

4.3.1.2. DETER DIARIO (PRIMER MÉTODO DE VALIDACIÓN)

El mismo procedimiento se realizó a las imágenes finales de cambio producidas por el método DETER del producto diario 2005 con 3, 4 y 5 componentes y con la aplicación de dos máscaras: la **máscara DETER diario** y la **Máscara de Alta Resolución**. A continuación se presenta un resumen con los resultados obtenidos por este método. Las tablas completas se pueden observar en el anexo A.

Tabla 20: Fiabilidad del productor y el porcentaje de polígonos detectados para el método DETER al producto diario 2005.

Producto diario 2005	Fiabilidad del productor con la **máscara Alta Resolución**	Porcentaje de polígonos detectados	Fiabilidad del productor con la **máscara DETER diario**	Porcentaje de polígonos detectados
DETER con 3 componentes	17%	33%	8%	20%
DETER con 4 componentes	54%	75%	38%	70%
DETER con 5 componentes	42%	75%	31%	60%

Se puede apreciar que los mejores resultados los obtuvo el método DETER con 4 componentes y con la máscara de alta resolución con una fiabilidad del productor de 54%, lo que nos indica que sólo detecta la mitad de las áreas deforestadas; por otra parte en cuanto a porcentaje de polígonos detectados este método también obtuvo los mejores resultados con 75% lo que nos indica que detecta de manera total o parcial 9 de los 12 polígonos de cambio. También se observa que al utilizar la máscara de alta resolución se obtienen mejores resultados que al utilizar la máscara generada del método DETER diario 2001.

4.3.1.3. DETER 16 DIAS (SEGUNDO MÉTODO DE VALIDACIÓN)

El segundo método para validar resultados, se basa en el cálculo de la **fiabilidad del productor** y **del usuario** donde se aplicó una tolerancia de 125 m alrededor de los polígonos de deforestación. En la tabla a continuación se presenta un ejemplo generado a partir del método DETER de 16 días con 3 componentes, los resultados completos se pueden consultar en el anexo B.

Tabla 21.- Ejemplo de una tabla del cálculo de la fiabilidad del productor y del usuario.

DETER de 16dias con 3 componentes			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del Productor	Fiabilidad del Usuario
Forestal	0	1	23666	Sin tolerancia	29%	1%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	42			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	66			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	1310	Con tolerancia	38%	2%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	17			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	9			

En esta tabla se aprecia que la fiabilidad del productor alcanzada es el 29% lo que significa que detectó 29% de los píxeles que representan los verdaderos cambios referentes a la deforestación y que al aplicar la tolerancia esta aumenta hasta el 38%. Mientras que la fiabilidad del usuario es muy baja con tolerancia y sin tolerancia, lo que nos indica qué, este método sobreestima bastante los cambios.

En resumen se obtuvieron los siguientes resultados de este segundo método para validar el método DETER del producto de 16 días 2005 con 3, 4 y 5 componentes:

Tabla 22: Resumen de los resultados aplicando el método DETER con 3, 4 y 5 componentes y con dos máscaras, la de alta resolución y DETER de 16 días.

Producto MOD13		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
DETER con 3 componentes Máscara de alta resolución	Sin tolerancia	29%	1%
	Con tolerancia	38%	2%
DETER con 4 componentes Máscara alta resolución	Sin tolerancia	63%	2%
	Con tolerancia	76%	3%
DETER con 5 componentes Máscara alta resolución	Sin tolerancia	42%	3%
	Con tolerancia	58%	5%
DETER con 3 componentes Máscara DETER de 16 días	Sin tolerancia	23%	1%
	Con tolerancia	29%	1%
DETER con 4 componentes Máscara DETER de 16 días	Sin tolerancia	57%	1%
	Con tolerancia	70%	2%
DETER con 5 componentes Máscara DETER de 16 días	Sin tolerancia	34%	2%
	Con tolerancia	47%	4%

El mejor resultado se obtuvo con el método DETER de 16 días y 4 componentes con la máscara de alta resolución, con una fiabilidad de productor de 63% y cuando se aplica la tolerancia está aumenta a 76%. Aunque la fiabilidad del usuario es bastante baja en todos los métodos, lo que nos indica que hay una importante sobrestimación del cambio.

4.3.1.4. DETER DIARIO (SEGUNDO MÉTODO DE VALIDACIÓN)

A continuación se presentan los resultados obtenidos con el método DETER al producto Diario 2005:

Tabla 23: Resumen de los resultados obtenidos por el método DETER aplicado al producto diario el 2005.

Producto MOD09 Diario		Fiabilidad del Productor	Fiabilidad del Usuario
DETER con 3 Componentes Máscara alta resolución	Sin tolerancia	18%	0%
	Con tolerancia	34%	1%
DETER con 4 Componentes Máscara alta resolución	Sin tolerancia	54%	1%
	Con tolerancia	69%	3%
DETER con 5 Componentes Máscara alta resolución	Sin tolerancia	42%	3%
	Con tolerancia	58%	5%
DETER con 3 Componentes Máscara DETER diario	Sin tolerancia	8%	0%
	Con tolerancia	20%	0%
DETER con 4 Componentes Máscara DETER diario	Sin tolerancia	38%	1%
	Con tolerancia	53%	2%
DETER con 5 Componentes Máscara DETER diario	Sin tolerancia	31%	1%
	Con tolerancia	49%	2%

Analizando los resultados del segundo método para evaluar la fiabilidad del productor y del usuario con el método DETER del producto diario, se observa que la mayor fiabilidad de productor se alcanza con el DETER de 4 componentes y es de 54% sin tolerancia; mientras que con tolerancia llega hasta 69%. Sin embargo la fiabilidad de usuario es muy baja en todos los casos, obteniendo los mejores resultados con el DETER diario de 5 componentes con 3% sin tolerancia y 5% con tolerancia. En general se sobrestima la deforestación.

Hasta aquí, se han analizado los resultados obtenidos del método DETER en los dos productos MOD13 y MOD09. El producto de 8 días no se tomó en cuenta porque únicamente tiene dos bandas espectrales, lo cual no es suficiente para la aplicación del MLME.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del ACPS aplicado a los tres productos **MODIS:** MOD13 (quincenal), MOD09 (diario) y MOD09 (semanal).

4.3.2. ACPS

4.3.2.1. ACPS AL NDVI (PRIMER MÉTODO DE VALIDACIÓN)

Los mapas finales de cambio obtenidos del ACPS se cruzaron con los mapas de referencia de deforestación y en base a los resultados se validaron con los dos tipos de métodos utilizados, se utilizaron la banda del rojo y el NDVI y se umbralizaron a 1, 1-5 y 2 desviaciones estándar. A continuación se presenta un ejemplo del primer método donde se evalúa la fiabilidad del productor y el porcentaje de polígonos detectados del NDVI:

Tabla 24: Ejemplo de tabla obtenida del ACPS al producto del NDVI con umbral de 1 desviación estándar y utilizando la máscara de alta resolución.

ACPS al NDVI de 16 Días Con 1 Desviación Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	2	50
2	3	3	100
3	2	1	50
4	2	1	50
5	8	6	75
6	5	2	40
7	3	1	33
8	7	6	86
9	2	1	50
10	3	3	100
11	1	1	100
12	19	14	74
total	59	41	69
Fiabilidad del productor = 69%			
Polígonos	**12**	**12**	**100**
Porcentaje de polígonos detectados = 100%			

A continuación veamos el resumen de la fiabilidad del productor con el ACPS aplicado al NDVI con 1, 1-5 y 2 desviaciones estándar utilizando la máscara de alta resolución de los productos de 16 días, de 8 días y el producto diario:

Tabla 25: Resumen de resultados obtenido con el ACPS al NDVI.

Método: ACPS al NDVI	Fiabilidad del productor	Porcentaje de polígonos detectados	Fiabilidad del productor	Porcentaje de polígonos detectados	Fiabilidad del productor	Porcentaje de polígonos detectados
	1ds*		1-5ds*		2ds*	
ACPS a 16 días	69%	100%	53%	83%	37%	75%
ACPS a 8 días	73%	100%	51%	75%	39%	67%
ACPS diario	64%	92%	29%	67%	20%	58%

***.- ds= desviación estándar.**

Se aprecia que los mejores resultados se obtienen con el NDVI al producto de 8 días con una fiabilidad del productor de 73% lo que indica que detecta la mayoría de los desmontes y en cuanto al porcentaje de polígonos detectados esté es del 100%, lo que quiere decir que detecta de manera total o parcial los 12 polígonos de desmonte. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que únicamente estamos validando al productor, en otras palabras este método de validación no nos dice el porcentaje de fiabilidad del usuario donde este puede exagerar el cambio de manera importante.

4.3.2.2. ACPS A LA BANDA DEL ROJO (PRIMER MÉTODO DE VALIDACIÓN)

El mismo procedimiento se realizó con la banda del rojo. En la tabla a continuación se presenta el resumen de los resultados obtenidos con el primer método:

Tabla 26: Resultados obtenidos de la aplicación del ACPS a la banda del Rojo.

Método: ACPS a la banda del Rojo	Fiabilidad del productor	Porcentaje de polígonos detectados	Fiabilidad del productor	Porcentaje de polígonos detectados	Fiabilidad del productor	Porcentaje de polígonos detectados
	1ds*		1-5ds*		2ds*	
16 días	47%	83%	39%	67%	32%	67%
8 días	63%	92%	54%	75%	37%	67%
Diario	64%	100%	41%	92%	25%	58%

DS*.- Desviación estándar

La tabla anterior muestra que los mejores resultados se obtuvieron con el producto diario alcanzando una fiabilidad del productor de 64%, lo que nos indica que detecta el 64% de los pixeles de deforestación, mientras que para el porcentaje de polígonos detectados alcanza 100%, lo que nos indica qué, de los 12 polígonos de cambio, todos los detecta de manera total o parcial.

4.3.2.3. ACPS AL NDVI (SEGUNDO MÉTODO DE VALIDACIÓN)

En la tabla a continuación se presenta un ejemplo de tabla para calcular la fiabilidad del productor y del usuario utilizando el ACPS aplicado al NDVI con una desviación estándar.

Tabla 27: Cálculo de la fiabilidad del productor y del usuario aplicando el ACPS al NDVI.

ACPS Banda NDVI con 1 Desviación Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del Usuario
Forestal	0	1	22310	Sin tolerancia	69%	1%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	18			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	38			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	2666	Con tolerancia	81%	3%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	41			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	37			

La fiabilidad del productor alcanzada con este método es de 69% sin tolerancia mientras que con tolerancia aumenta a 81% lo que indica que detecta la mayoría de los desmontes. La fiabilidad del usuario es muy baja sin tolerancia y con tolerancia esto nos indica que el método sobrestima los cambios de deforestación.

El resumen con el segundo método para la evaluación de la fiabilidad del ACPS al NDVI con umbrales de 1, 1-5 y 2 desviaciones estándar se presentan a continuación:

Tabla 28: Resumen de la fiabilidad del productor y del usuario resultado de la aplicación del ACPS al NDVI.

Método		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario	Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario	Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
		1 DS*		1-5 DS*		2 DS*	
ACPS al NDVI 16 Días	Sin tolerancia	69%	1%	53%	2%	37%	3%
	Con tolerancia	81%	3%	67%	4%	49%	4%
ACPS al NDVI 8 Días	Sin tolerancia	73%	2%	51%	2%	39%	3%
	Con tolerancia	84%	3%	67%	4%	53%	5%
ACPS al NDVI Diario	Sin tolerancia	64%	2%	31%	2%	20%	2%
	Con tolerancia	79%	4%	49%	4%	30%	4%

***DS Desviación Estándar**

En esta tabla se puede apreciar que los mejores resultados se obtuvieron con el ACPS aplicado al producto de 8 días del NDVI a 1 desviación estándar ya que se alcanzó una fiabilidad del productor de 73% sin tolerancia mientras que con la tolerancia este aumenta hasta el 84%, aunque la fiabilidad del usuario en todos los casos son valores muy bajos lo que nos indica que se sobrestima el cambio.

4.3.2.4. ACPS A LA BANDA DEL ROJO (SEGUNDO MÉTODO DE VALIDACIÓN)

En la tabla a continuación se presentan los resultados obtenidos con el ACPS aplicado a la Banda del Rojo utilizando el segundo método para la evaluación de la fiabilidad:

Tabla 29: Resumen de resultados obtenidos con el ACPS aplicado a la banda del Rojo.

MÉTODO		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario	Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario	Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
		1 DS*		1-5 DS*		2 DS*	
ACPS a la banda del rojo de 16 Días	Sin tolerancia	47%	2%	39%	3%	32%	6%
	Con tolerancia	62%	3%	51%	5%	40%	8%
ACPS a la banda del rojo de 8 Días	Sin tolerancia	63%	2%	54%	3%	37%	5%
	Con tolerancia	78%	4%	70%	7%	51%	9%
ACPS a la banda del rojo Diario	Sin tolerancia	64%	3%	41%	4%	25%	5%
	Con tolerancia	78%	6%	56%	7%	41%	9%

***DS Desviación Estándar**

Se muestra que los mejores resultados en cuanto a la fiabilidad del productor se obtienen con el ACPS aplicado al producto diario con 64% de aciertos sin tolerancia, mientras con tolerancia esta aumenta hasta 78% de exactitud. En cuanto a la fiabilidad del usuario los valores más altos se obtienen con el ACPS al producto diario y de 8 días de 2 desviaciones estándar con 5% sin tolerancia y 9% con tolerancia lo cual sigue siendo muy bajo lo que indica que este método sobrestima la deforestación.

4.3.3. DIFERENCIA DE BANDAS

4.3.3.1. DIFERENCIA DE NDVI ÉPOCA SECA (PRIMER MÉTODO DE VALIDACIÓN)

El procedimiento para validar los resultados es el mismo que aplicó al método DETER y al ACPS y de la misma manera se obtuvieron las tablas para el cálculo de la Fiabilidad del Productor. Se presenta un ejemplo obtenido con los resultados de la época seca con 1-5 de desviación estándar.

Tabla 30: Resultados del cálculo de la fiabilidad del productor y del porcentaje de polígonos detectados para una imagen de la época seca.

Diferencia del NDVI de 16 Días de la época seca con 1-5 Desviación estándar			Máscara Alta Resolución
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	2	50
2	3		0
3	2	2	100
4	2	1	50
5	8	6	75
6	5		0
7	3	1	33
8	7	7	100
9	2	1	50
10	3	2	67
11	1	1	100
12	19	13	63
total	59	36	61
Fiabilidad del productor = 61%			
Polígonos	**12**	**10**	**83%**
Porcentaje de polígonos detectados = 83%			

Tabla de la Diferencia de bandas del NDVI de la época seca donde la fiabilidad del productor alcanzada es de 61% lo que nos indica que el método detecta poco más de mitad de los desmontes, mientras el porcentaje de polígonos detectados llega a 83% detectando 10 de los 12 polígonos e desmontes.

Se presenta a continuación un resumen de los resultados de este método:

Tabla 31: Resultados obtenidos con la Diferencia de NDVI de la época seca.

Diferencia de NDVI de 16 Días. Época seca a 1-5 desviación estándar.	Fiabilidad del productor	Porcentaje de polígonos detectados
Suma de **cuatro** imágenes de cambio	61%	83%
Suma de **tres** imágenes de cambio	41%	67%
Suma de **dos** imágenes de cambio	15%	42%
Una imagen de cambio	7%	33%

Como se puede observar en estos resultados, conforme aumentan las imágenes de cambio aumenta la fiabilidad del productor, esto quiere decir que la suma de cuatro imágenes de cambio en lo general reportan los mismos cambios si esté es repetitivo; sin embargo conforme quitamos alguna imagen de cambio va disminuyendo la fiabilidad del productor y el porcentaje de polígonos detectados.

4.3.3.2. DIFERENCIA DE NDVI ÉPOCA DE LLUVIAS (PRIMER MÉTODO DE VALIDACIÓN)

El mismo procedimiento se realizó con las imágenes de cambio de la época de lluvias. Se presenta el resumen de los resultados obtenidos:

Tabla 32: Resultados obtenidos con las imágenes de cambio.

Diferencia de NDVI de 16 Días. Época de lluvias a 1-5 desviación estándar	Fiabilidad del productor	Porcentaje de polígonos detectados
Suma de **tres** imágenes de cambio	34%	75%
Suma de **dos** imágenes de cambio	12%	25%
Una imagen de cambio	2%	8%

Los resultados muestran que la fiabilidad del productor alcanzada es de 34%, lo que nos indica que la detección de la deforestación es muy baja, lo cual no es muy bueno, mientras que el porcentaje de polígonos detectados es de 75%, lo que nos indica que detecta 9 de los 12 polígonos de desmonte.

4.3.3.3. DIFERENCIA DE NDVI EN LA ÉPOCA SECA (SEGUNDO MÉTODO DE VALIDACIÓN)

El segundo enfoque para calcular la fiabilidad del usuario y del productor es igual que con el método DETER y el ACPS.**Tabla 33: Cálculo e la fiabilidad del usuario y del productor para evaluar los resultados de la diferencia de NDVI en la época seca.**

Diferencia de NDVI de la época seca a 1.5 Desviación Estándar			**Máscara Alta Resolución**		**Fiabilidad del productor**	**Fiabilidad del usuario**
Forestal	0	1	21715	Sin tolerancia	61%	1%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	23			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	39			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	3261	Con tolerancia	76%	2%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	36			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	36			

Se observa que la fiabilidad del productor es de 61% sin tolerancia mientras que con tolerancia esta aumenta a 76%, lo que indica que detecta la mayoría de los desmontes. Sin embargo la fiabilidad del usuario con tolerancia y sin tolerancia es muy baja, lo que indica que exagera los cambios indicativos de deforestación. Se presentan a continuación un resumen los resultados obtenidos con este método para la época seca.

Tabla 34: Resultados obtenidos de la Diferencia de NDVI en la época seca.

Método		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
ACPS al NDVI de 16 Días Época Seca		**1-5 DS**	
Suma de **cuatro** imágenes de cambio	Sin tolerancia	61%	1%
	Con tolerancia	76%	2%
Suma de **tres** imágenes de cambio	Sin tolerancia	41%	2%
	Con tolerancia	55%	4%
Suma de **dos** imágenes de cambio	Sin tolerancia	15%	2%
	Con tolerancia	30%	4%
Una imagen de cambio	Sin tolerancia	7%	2%
	Con tolerancia	17%	6%

Con la suma de cuatro imágenes se alcanza una fiabilidad del productor de 61% sin tolerancia, mientras que con la tolerancia llega hasta 76%; sin embargo la fiabilidad del usuario en todos los casos es muy baja, lo que nos indica que se sobrestima el cambio de manera significativa.

4.3.3.4. ÉPOCA DE LLUVIAS (SEGUNDO MÉTODO DE VALIDACIÓN)

El mismo procedimiento se realizó con las imágenes de la época de lluvias, donde se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 35: Resumen de resultados obtenidos por la Diferencia de NDVI en la época de lluvias.

MÉTODO	PRODUCTOR		USUARIO
Diferencia del NDVI Época de lluvias		**1-5 DS**	
Suma de **tres** imágenes de cambio	Sin tolerancia	34%	1%
	Con tolerancia	48%	1%
Suma de **dos** imágenes de cambio	Sin tolerancia	12%	9%
	Con tolerancia	15%	12%
Una imagen de cambio	Sin tolerancia	2%	20%
	Con tolerancia	2%	20%

La suma de tres imágenes de cambio muestra una fiabilidad del productor de 34% sin tolerancia, y de 48% con tolerancia, lo que nos indica que detecta menos de la mitad de los desmontes, por otra

parte la fiabilidad del usuario es muy baja. Los mejores resultados de fiabilidad del usuario se obtienen con **una** imagen de cambio con 20% sin tolerancia y con tolerancia aunque en este caso la fiabilidad del productor es de 2%, muy baja.

4.4. SERIE DE TIEMPO Y PERFILES

Con la serie de tiempo y los datos de precipitación se crearon 5 perfiles de desmonte. La figura a continuación presenta la variación en el tiempo del primer desmonte.

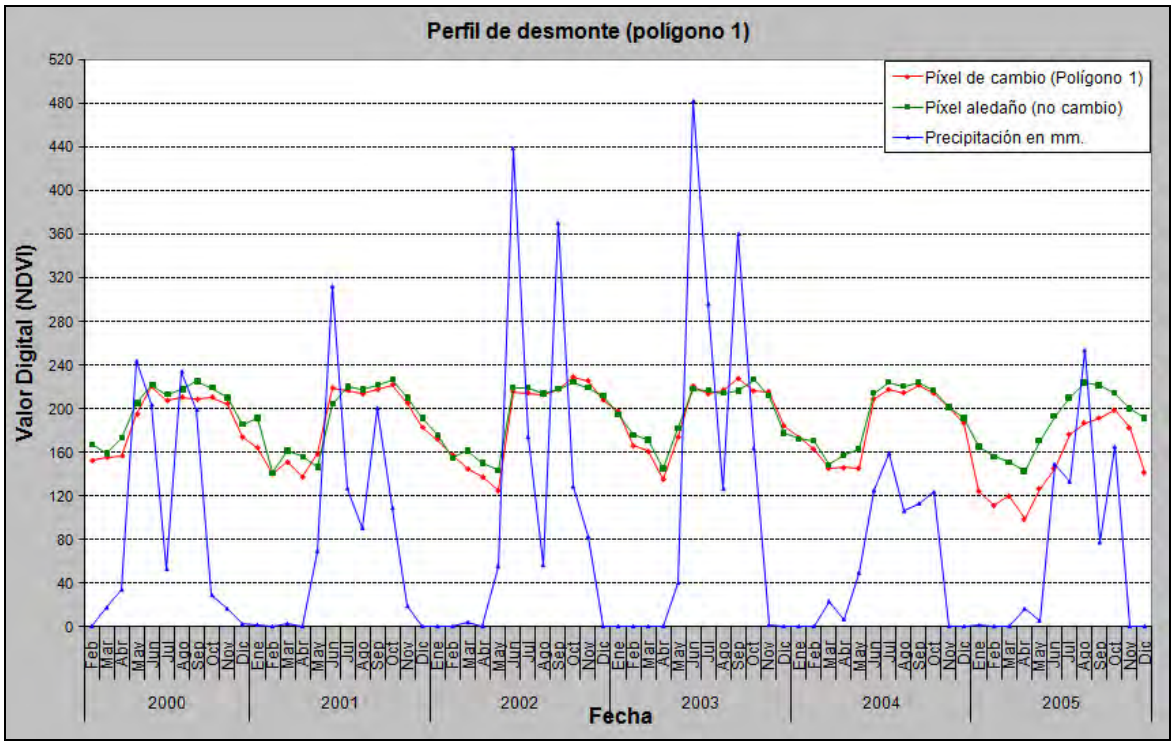


Figura 36: En azul los datos de precipitación en mm. La línea roja representa el píxel que se tomo del polígono de cambio núm. 1. La línea verde se tomo de un píxel aledaño con la misma cobertura pero que no sufrió ningún cambio.

Como se recordara son 12 polígonos de cambio. Esta figura representa el primer polígono de cambio y se observa que cambio ocurrió al final del año 2004. Las fechas que estamos comparando en las imágenes MODIS son enero de 2001 y enero de 2005. Por lo tanto los datos de precipitación nos muestran que 2001, 2002 y 2003 fueron más lluviosos que 2004 y 2005.

También se crearon los perfiles de los polígonos de desmonte 5, 8, 10 y 12 los cuales se pueden observar en el anexo C.

Se crearon además los perfiles de varios polígonos de desmonte donde varios métodos mostraban como cambio. Se escogieron al azar estos perfiles y en total tenemos 5 perfiles de falso desmonte.

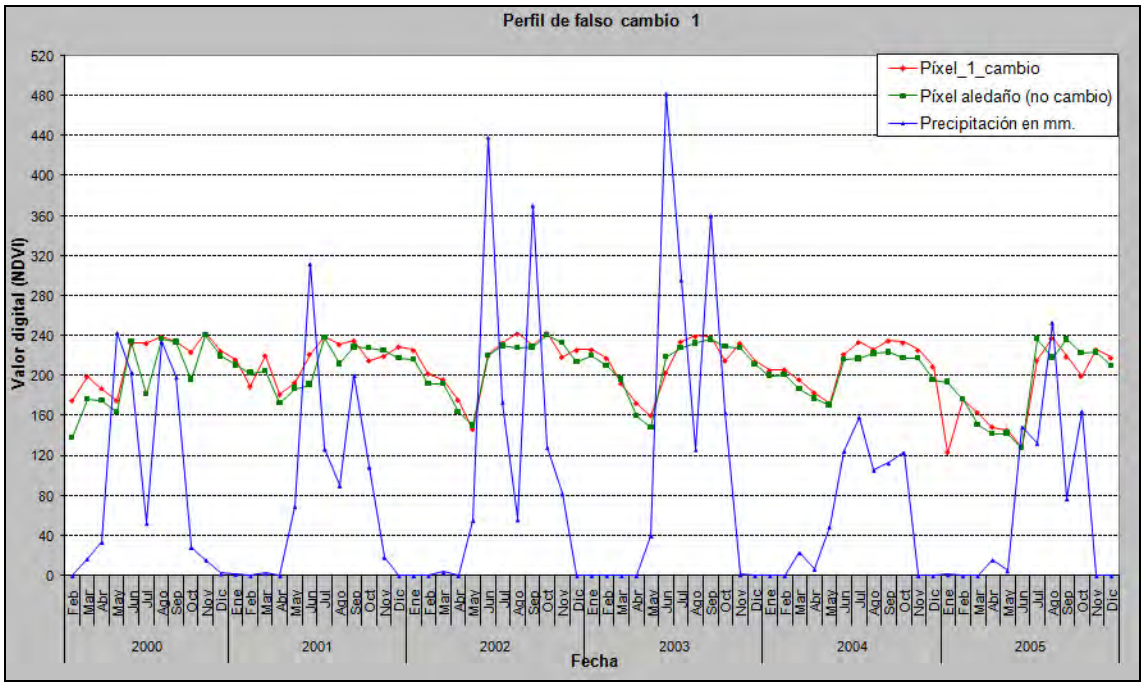


Figura 37: Perfil de falso desmonte. En azul los datos de precipitación en mm. La línea roja representa el píxel que se tomo del mapa de cambio al azar y la línea verde se tomo de un píxel aledaño con la misma cobertura y que no se mapeo como cambio.

Con la creación de estos perfiles de falso desmonte o falso cambio se puede observar que la sobrestimación de los desmontes con los diferentes métodos de cambio como el DETER o el ACPS, pueden ser resultado de ruido en las imágenes.

Otros perfiles similares se tomaron de píxeles al azar mapeados como desmonte y que en realidad representan ruido en la imagen se pueden apreciar en el anexo C.

Hasta ahora se han presentado los resultados con los diferentes métodos utilizados en las imágenes MODIS, a continuación se discuten estos resultados para realizar las conclusiones pertinentes acerca de estos métodos así como de la utilidad de las imágenes MODIS para evaluar los cambios en la zona de estudio.

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Se presentan los mejores resultados que se obtuvieron con el primer método para la evaluación de la fiabilidad donde se evalúa el productor y el porcentaje de polígonos detectados con la metodología DETER, el ACPS y la Diferencia de NDVI:

Tabla 36: Mejores resultados obtenidos de los métodos aplicados a las imágenes MODIS (En todos los casos se utilizó la máscara de alta resolución).

MÉTODO	FIABILIDAD DEL PRODUCTOR	PORCENTAJE DE POLÍGONOS DETECTADOS	PRODUCTO 2005
DETER aplicado al producto de 16 días con 4 componentes.	63%	67%	MOD13 (16 días).
DETER aplicado al producto Diario con 4 componentes.	54%	75%	MOD09 (Diario).
ACPS con 1 desviación estándar. **(NDVI 16 Días)**	69%	100%	MOD13 (16 días).
ACPS con 1 desviación estándar. **(NDVI 8 Días)**	73%	100%	MOD09 (8 Días).
ACPS con 1 desviación estándar.**(NDVI Diario)**	64%	92%	MOD09 (Diario).
Diferencia de NDVI época seca	61%	83%	MOD13 (16 días).
Diferencia de NDVI época de lluvias	34%	75%	MOD13 (16 días).

De la tabla anterior se obtienen algunas conclusiones:

- Con el método DETER se obtienen mejores resultados al utilizar 4 componentes en la desmezcla espectral.
- Con el método DETER se alcanzan mejores resultados al utilizar el producto MOD13.
- Con el método DETER se obtienen mejores resultados al utilizar la máscara de alta resolución que al utilizar las máscaras DETER 16 días y la máscara DETER diario.
- Se obtienen mejores resultados con el ACPS que con el método DETER.
- En el ACPS los resultados son menos variables (64%, 69% y 73%) de fiabilidad del productor en comparación con el método DETER (54% Y 69%).
- Se obtienen mejores resultados con el ACPS aplicado al NDVI que con la banda del Rojo.

- En el ACPS existe una ligera ventaja al utilizar el NDVI de 8 días sobre el NDVI de 16 días, aunque ambos detectan el 100% de los polígonos de desmonte, el NDVI de 8 días detecta mayor número de píxeles de cambio.
- Con la diferencia de NDVI se alcanzan mejores resultados con imágenes de la época seca.

Con base en estos datos comparativos se aprecia que los mejores resultados se obtienen con el ACPS aplicado al NDVI del producto de 8 días con una desviación estándar, este método detectó el 73% de los desmontes, en cuanto al porcentaje de acierto este llega al 100% lo que indica que de los 12 polígonos de desmonte detecta todos los polígonos de manera parcial o total.

Este primer método ayudó a determinar la fiabilidad del productor al detectar únicamente el verdadero cambio que se refiere a la deforestación, sin embargo no permite determinar la fiabilidad del usuario por lo que se complementa con el siguiente método.

A continuación se presenta un resumen del segundo método donde se evalúa la fiabilidad del productor y del usuario utilizando una tolerancia espacial de 125 m.

Tabla 37: Resumen de los mejores resultados obtenidos para el cálculo de la fiabilidad del productor y del usuario.

MÉTODO	FIABILIDAD DEL PRODUCTOR		FIABILIDAD DEL USUARIO		PRODUCTO 2005
	Sin tolerancia	Con tolerancia	Sin tolerancia	Con tolerancia	
DETER aplicado al producto de 16 días con 4 componentes.	63%	76%	2%	3%	MOD13 (16 Días).
DETER aplicado al producto Diario con 4 componentes.	54%	69%	1%	3%	MOD09 (Diario).
ACPS con 1 desviación estándar. **(NDVI 16 Días)**	69%	81%	1%	3%	MOD13 (16 Días).
ACPS con 1 desviación estándar. **(NDVI 8 Días)**	73%	84%	2%	3%	MOD09 (8 Días).
ACPS con 1 desviación estándar.**(NDVI Diario)**	64%	79%	2%	4%	MOD09 (Diario).
Diferencia de NDVI época seca	61%	76%	1%	2%	MOD13 (16 Días).
Diferencia de NDVI época de lluvias	34%	48%	1%	2%	MOD13 (16 Días).

De la tabla anterior surgen algunas conclusiones:

- Al aplicar la tolerancia de 125 m. se pudo aumentar la fiabilidad del productor en todos los métodos.
- La fiabilidad del usuario en todos los casos es muy baja con tolerancia y sin tolerancia, lo que indica una sobreestimación alta de los desmontes.
- En cuanto a la fiabilidad del usuario no hay ningún método confiable.

En general la zona de estudio tiene una gran variedad de coberturas donde encontramos desde selva baja caducifolia, selva alta perennifolia, bosque de pino y de encino; lo que podría haber generado confusión, incluso en los análisis de criterio de separabilidad se observan fuertes confusiones entre la selva baja caducifolia y el pastizal.

La adaptación del método DETER, aumentando el número de imágenes fracción para tomar en cuenta esta diversidad, permite una pequeña mejora de los resultados. Sin embargo, el error de comisión (medido a través de la fiabilidad del usuario) sigue alto.

Finalmente se concluye que los resultados obtenidos de MODIS son útiles para monitorear la deforestación utilizando el ACPS aunque con el método los errores de comisión son también muy altos y se podrían seguir explorando metodologías para tal efecto.

Por otra parte se sugieren algunas consideraciones para mejorar el método DETER, que serian:

- Inicialmente el método DETER fue creado para monitorear cambios en un período muy corto de tiempo (un mes), lo qué, al adaptarlo a México, en un período de 5 años resulto no tan satisfactorio para monitorear estos cambios. Incluso el método PRODES monitorea cambios en períodos anuales.
- La metodología DETER o PRODES, no debe ser usado directamente, primero tiene que ser adaptado al contexto mexicano (donde el territorio es más heterogéneo en cuanto a las coberturas forestales, es más montañoso y con superficies boscosas no tan amplias como en Brasil).
- Utilizar un mayor número de imágenes fracción de acuerdo a la heterogeneidad de cada zona en estudio.
- Utilizar la imagen fracción sombra y vegetación para realizar una edición matricial más precisa, así como el compuesto en falso color.
- En la segmentación utilizar límites de similitud y de área diferentes a los utilizados en este trabajo.
- Utilizar una sola máscara que sería la generada por la interpretación visual de imágenes de alta resolución y ajustarla a una interpretación visual de imágenes MODIS.

En cuanto al ACPS esté se podría mejorar si:

- Se hace una corrección radiométrica adicional a las realizadas por la NASA.
- Se utiliza un criterio de calidad de la imagen, previo al procesamiento.

En cuanto a las imágenes MODIS:

El producto MOD13 se muestra como el más confiable para monitorear los desmontes, ya que es la síntesis de 15 imágenes diarias y donde se seleccionan los mejores píxeles de cada una de estas imágenes. Otro punto importante a considerar es que se podrían utiliza las imágenes procesadas por el servidor de la CONABIO en lugar de utilizar las imágenes de la NASA.

Como se mostró en los antecedentes del monitoreo con imágenes MODIS existen variaciones en los resultados, al emplear técnicas diferentes para el mapeo de la deforestación, sobre este tipo de imágenes ya que por una parte Morton et al. (2005) y Costa y Moreira de Souza et al. (2005) presentan resultados muy satisfactorios, por otra parte Valeriano et al. (2005) presenta resultados intermedios, lo que demuestra una inconsistencia en la obtención de buenos resultados y también diferentes grados de flexibilidad para evaluar los resultados.

En este sentido para el territorio mexicano donde los desmontes son más pequeños que los realizados en la Amazonia, este tipo de imágenes se pueden explorar otras técnicas de desmezcla de píxeles, así como proponer desmontes mínimos de 25 hectáreas.

Otro insumo importante que puede ser tomado en cuenta son las imágenes MODIS de la plataforma Aqua, ya que pasan por la tarde del mismo día y así comparar los resultandos entre las imágenes de estas dos plataformas.

Finalmente un punto importante que se debe tomar en cuenta son los valores de precipitación en la zona de estudio ya que como se mostró en los perfiles del periodo de tiempo seleccionado 2001-2005 los tres primeros años (2001-2002-2003) fueron más húmedos y lluviosos que los dos últimos (2004-2005), esto puede explicar los bajos valores de fiabilidad del usuario ya que la acumulación de los datos de cambio se da en la región ocupada por la selva baja caducifolia.

BIBLIOGRAFIA

Aguirre, C., W. L. Mello y M. Carvalho. 2006. ***"Avaliação do desempenho de diferentes classificadores (Isoseg, Bhattacharyya, Maxver e Maxver-ICM), utilizando imagens CCD/CBERS-1 e ETM+/Landsat-7 fusionadas".*** *Revista Ambiente e Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science.* Vol. 3, núm. 2, pp. 80-89.

Allevato, E., R. Pedarré, M. Fresno y M. Vénere. 2006. ***"Segmentación de imágenes digitales 3D basado en regiones y contornos activos para la generación de mallas de superficie".*** *Mecánica Computacional*. Vol. XXV, pp. 1149-1161.

Anaya, A. L. y M. Álvarez. 1994. ***"Plan de desarrollo y conservación de una Reserva Campesina en los Chimalapas".*** Instituto Nacional de Ecología (INE) y el Programa de Acción Tropical Forestal A.C. pp. 57.

Anta, S. 2005. ***"El Ordenamiento Territorial Comunitario en los Chimalapas".*** Grupo Mesófilo. Ordenamiento Ecológico Comunitario en los Chimalapas, Oaxaca.

Anta, S. F. y A. B. Plancarte. 2001. **"*Los Incendios Forestales en Chimalapas: la última oportunidad".*** World Wildlife Fund-Programa México y Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Taller El Castor, Oaxaca, pp. 121-138.

Anta F. S., A. Plancarte B. y J. M. Barrera Terán. 2000. ***"Conservación y manejo comunitario de los recursos forestales en Oaxaca".*** SEMARNAP, Delegación Oaxaca, 2000, pp. 212.

Asbjornsen, H. y C. Gallardo. 2005. ***"Impactos de los incendios de 1998 en el bosque mesófilo de montaña en Los Chimalapas, Oaxaca".*** *Department of Natural Resource Ecology & Management*, Iowa State University, U.S.A.

Asner, G. P., J. A. Hicke y D. B. Lobell. 2003. "***Per-pixel analysis of forest structure: Vegetation Indices, Spectral Mixture Analysis and Canopy Reflectance Modeling".*** *Department of Global Ecology, Carnegie Institution of Washington*, Editorial Stanford University, California. U.S.A.

Bartholomé, E., y A. S. Belward. 2005. ***"GLC2000: A new Approach to Global Land Cover Mapping from Earth Observation Data".*** *International Journal of Remote Sensing.* Vol. 26, núm. 9, pp. 1959-1977.

Câmara, G., D. M. Valeriano y J. V. Soares. 2006. ***"Metodología para o Cálculo da Taxa Anual de Desmatamento na Amazonia Legal".*** São José dos Campos, INPE, Brasil, pp. 24-35.

Chuvieco, E. 2002***. "Teledetección ambiental" La observación de la Tierra desde el espacio.*** Editorial Ariel, Barcelona, España. pp. 586.

Correia, A. H., A. R. Formaggio, Y. E. Shimabukuro y V. Duarte. 2005. ***"Utilização de dados de reflectância MODIS (Composições de 8 dias para detecção de desmatamentos na Amazônia".*** *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamiento Remoto,* Goiânia Brasil, INPE, pp. 481-488.

Cortijo Bon, F. 2001. ***"Procesamiento de imágenes digitales. Restauración y compresión".*** Universidad de Granada. pp. 78.

Cruz Hernández, R. 2006. ***"Acuerdo de Acción Coordinada entre Comunidades, Municipios e Instituciones para la Integración del Plan Maestro de Desarrollo Regional de los Chimalapas".*** Proyecto Ejecutivo. Autoridades de Bienes Comunales.

Cruz López, M. I. 2007. ***"Sistema de alerta temprana, monitoreo e impacto de los incendios forestales en México y Centroamérica".*** Trabajo desarrollado por la Coordinación de Percepción Remota, CONABIO.

Da Silva Costa, A. y C. Moreira de Souza Jr. 2005. ***"Comparação entre imagens Landsat e MODIS para Detecção de Incrementos de Desmatamento: um estudo de caso na região do Baixo Acre".*** *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamiento Remoto,* Goiânia, Brasil. INPE, pp. 1469-1476.

Gomes, M. P. y A. M. Nepomuceno. 2007. ***"Analise Comparativa entre os dados gerados pelos sistemas de detecção de desmatamentos para a Amazonia: SIAD e DETER".*** *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamiento Remoto*. Florianópolis, Brasil, pp. 6763-6770.

Gómez, D., V. López, J. Montero y J. Yáñez. 2006***. "Segmentación de imágenes digitales basada en problemas de coloración para grafos valorados".*** XXIX Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa.

Jiménez, R., I. Cruz, M. Schmith, R. Ressl, S. Ressl, G. López y E. Muñoz. 2005. ***"Programa para detección de puntos de calor mediante técnicas de percepción remota".*** CONABIO.

Kaufman, J. Y., D. D. Herring, K.J. Ranson y G. J. Collatz. 1998. "***Earth Observing System AM-1 Mission to Earth"***. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* Vol. 36, núm. 4, pp. 1045-1055.

Mas, J.F., 1999, ***"Monitoring Land-cover Changes: A Comparison of Change Detection Techniques".*** *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 20, núm. 1, pp. 139-152.

Mas, J. F. e I. González. 2006. ***"Evaluación de imágenes MODIS para el monitoreo de la deforestación en México".*** *Ambiência, Revista do Centro de Ciencias Agrarias e Ambientais*. Vol.2, edição especial 1.

Mas, J.F., J. R. Díaz-Gallegos y A. Pérez Vega. 2003. ***"Evaluación de la confiabilidad temática de mapas y de imágenes clasificadas: una revisión".*** *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 51, pp. 53-72.

Mausel, P. W.J., Kramber y J. K. Lee. 1990. ***"Optimum Band Selection for Supervised Classification of Multispectral Data".*** *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 56, núm. 1, pp. 55-60.

Morton, D.C., R. S. DeFries, Y. E. Shimabukuro, L. O. Anderson, F. Del Bon Espirito-Santo, M. Hansen y M. Carroll. 2005. "***Rapid Assessment of Annual Deforestation in the Brazilian Amazon Using MODIS Data"***. *Earth Interactions*, núm. 9, pp. 1-22.

Olivares Altamirano, M. 2001. ***"El factor vegetación en teledetección espacial. Aplicaciones, estrategias y discusión".*** Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería Geográfica. Universidad de Santiago de Chile.

Olivares Altamirano, M. 2001a. ***"Estudio del crecimiento urbano a través del uso integrado de imágenes de satélite, SIG y GPS".*** Tesis de Doctorado. Facultad de Ingeniería Geográfica. Universidad de Santiago de Chile.

Palacio-Prieto, J.L., G Bocco, A. Velásquez, JF. Mas, F. Takaki, A. Victoria, L. Luna, G. Gómez, J. López, M. Palma, I. Trejo, A. Peralta, J. Prado, A. Rodríguez, R. Mayorga y F. González. 2000. ***"La condición actual de los recursos forestales en México: Resultados del Inventario Forestal Nacional 2000".*** *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM núm. 43, pp. 183-203.

Payacan, S. C. y A. R. Formaggio. 2005. ***"Evaluación de datos del satélite CBERS para mapeamiento de áreas citrícolas a nivel municipal".*** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais São José dos Campos, Brasil.

Pinheiro Bitencurti, D. 2006. ***"Comparación de la Clasificación Digital de la Vegetación Mediante Imágenes de Satélite Multiespectrales e Hiperespectrales, en la Región Sudoeste del Estado de Michoacán".*** Tesis de Maestría. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Portador García, T. de J. 2004. ***"La disputa por el territorio comunal en el municipio de Santa María Chimalapa, Oaxaca".*** Ponencia presentada en el Décimo Congreso Bienal Asociación Internacional para el Estudio de la Propiedad Colectiva (IASPC), Oaxaca-México.

Quintano, C., O. Fernández-Manso, A. Fernández-Manso y J. Ramírez. 2006. ***"Sinergias entre el Modelo de Mezclas Espectrales y el Análisis de Imágenes Basado en Objetos en el estudio de incendios forestales".*** *Ambiencia- Revista do Centro de Ciencias Agrarias e Ambientais*. Vol. 2 Edición especial 1, pp. 121-134.

Riaño, E., V. Duarte y R. Simi.2005. ***"Aplicación de la metodología de PRODES Digital y detalle de su leyenda en área de la frontera Leticia (Colombia) - Tabatinga (Brasil)".*** *Anais Simpósio Brasileiro de Sensoriamiento Remoto,* Goiânia, Brasil. INPE, pp. 4269-4276.

Rudorff, B.F.T., Y. E. Shimabukuro y J. C. Ceballos. Organizadores. 2007. ***"O Sensor MODIS e sus Aplicações Ambientais No Brasil".*** São José dos Campos S.P. Brasil. Editorial Parentese, pp. 428.

Running, S. W., C.O. Justice, V. Salomonson, D. Hall, J. Barker, Y. J. Kaufmann, A. H. Strahler, A. R. Huete, J. P. Muller, V. Vanderbilt, Z. M. Wan, P. Teillet y D. Carneggie. 1994. ***"Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS".*** *International Journal of Remote Sensing.* Vol.15, núm. 17, pp. 3587-3620.

Sadeh, M. 2002. ***"A failure of International Space Cooperation: the International Earth Observing System".*** *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* Vol. 20, núm. 2, pp. 45-53.

Salomonson, V.V., W. L. Barnes, P. W. Maymon, H. E. Montgomery y H. Ostrow. 1989. "***MODIS: Advanced Facility Instrument for Studies of the Earth as a System"***. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* Vol. 27, núm. 2, pp. 145-153.

Shimabukuro, Y. E. y B. F. T. Rudorff. 2006. ***"Dados do sensor MODIS para o mapeamento e monitoramento da cobertura vegetal e uso da terra".*** *Anais 1, Simpósio de Geotecnologías no Pantanal,* Campo Grande, Brasil. INPE, pp. 929-938.

Shimabukuro, Y. E., V. Duarte, M. Alves, E. Arai, B. F. Rudorff, L. Oighenstein, F. B. Espírito Santo, R. Moraes, L. C. Marroni, L. E. Pinheiro, J. R. Lisboa. 2005***. "Detecção de áreas desflorestadas em tempo real: conceitos básicos, desenvolvimento e aplicação do projeto DETER".*** Ministério da Ciência e Tecnologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, Brasil.

Singh, D. E., D.B. Heras y F. F. Rivera. 2000. ***"Algoritmo paralelo de segmentación basado en el crecimiento de regiones a partir de semillas".*** Universidad Santiago de Compostela, España.

SPRING Ajuda. SPRING 4.3.3. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil.

Stehman, S. V. y R. Czaplewsky. 1998. ***"Design and analysis for thematic map accuracy assessment fundamental principles".*** *Remote Sensing of Environment*. Núm. 64, pp. 331-344.

Valeriano, D. M., Y. E. Shimbukuro, V. Duarte, L. O. Anderson, F. Espírito-Santo, E. Arai, L. E. Maurano, R. C. Souza, R. Morais y L. Aulicino. 2005. ***"Detecção do desflorestamento da Amazonia Legal em tempo Real-Projeto DETER".*** *Anais XII, Simpósio Brasileiro de Sensoriamiento Remoto,* Goiânia, Brasil. INPE, pp. 3403-3409.

Velázquez, A. JF. Mas, J.R. Díaz Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco y J.L. Palacio. 2002. ***"Patrones y tasas de cambio de uso de suelo en México".*** INE proyecto 312ª-00215.

PÁGINAS EN INTERNET

http://wist.echo.nasa.gov/api/

www.obt.inpe.br/prodes

www.obt.inpe.br/deter/index.html

https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/tools/

http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/puntos_calor/doctos/puntos_calor.html

www.conapo.gob.mx

ANEXOS

ANEXO A.-TABLAS DEL PRIMER MÉTODO DE VALIDACIÓN.

MÉTODO DETER AL PRODUCTO MOD13 (16 DÍAS)

DETER de 16 días 2005 con 3 componentes		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	-	0
2	3	-	0
3	2	2	100
4	2	-	0
5	8	4	50
6	5	-	0
7	3	-	0
8	7	5	71
9	2	-	0
10	3	1	33
11	1	-	0
12	19	5	26
total	59	17	29
Fiabilidad del productor = 29%			
Polígonos	**12**	**5**	**42**
Porcentaje de polígonos detectados = 42%			

DETER de 16 días 2005 con 5 componentes		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	-	0
2	3	3	100
3	2	2	100
4	2	1	50
5	8	6	75
6	5	-	0
7	3	1	33
8	7	5	71
9	2	-	0
10	3	1	33
11	1	1	100
12	19	5	26
total	59	25	42
Fiabilidad del productor= 42%			
Polígonos	**12**	**9**	**75**
Porcentaje de polígonos detectados = 75%			

DETER de 16dias 2005 Con 4 componentes		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	-	0
2	3	3	100
3	2	2	100
4	2	-	0
5	8	8	100
6	5	-	0
7	3	-	0
8	7	7	100
9	2	2	100
10	3	3	100
11	1	1	100
12	19	11	58
total	59	37	63
Fiabilidad del productor= 63%			
Polígonos	**12**	**8**	**67**
Porcentaje de polígonos detectados = 67%			

DETER de 16 días 2005 con 3 componentes			Máscara DETER 16 días	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles en máscara	Píxeles detectados	%
1	3	1	-	0
2	3	0	-	0
3	0	2	-	0
4	1	1	-	0
5	6	2	4	67
6	5	0	-	0
7	3	0	-	0
8	7	0	5	71
9	2	0	-	0
10	2	1	1	50
11	1	0	-	0
12	14	5	1	7
total	47	12	11	23
Fiabilidad del productor= 23%				
Polígonos	**11**	**1**	**4**	**36**
Porcentaje de polígonos detectados =36%				

DETER de 16 días 2005 con 5 componentes			Máscara DETER 16 días	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles en máscara	Píxeles detectados	%
1	3	1	-	0
2	3	-	3	100
3	0	2	-	0
4	1	1	-	0
5	6	2	5	83
6	5	-	-	0
7	3	-	1	33
8	7	-	5	71
9	2	-	-	0
10	2	1	-	0
11	1	-	1	100
12	14	5	1	7
total	47	12	16	34
Fiabilidad del productor = 34%				
Polígonos	**11**	**1**	**6**	**55**
Porcenaje de polígonos detectados = 55%				

DETER de 16 días 2005 con 4 componentes			Máscara DETER 16 días	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles en máscara	Píxeles detectados	%
1	3	1	-	0
2	3	-	3	100
3	0	2	-	0
4	1	1	-	0
5	6	2	6	100
6	5	-	-	0
7	3	-	-	0
8	7	-	7	100
9	2	-	2	100
10	2	1	2	100
11	1	-	1	100
12	14	5	6	43
total	47	12	27	57
Fiabilidad del productor = 57%				
Polígonos	**11**	**1**	**7**	**64**
Porcentaje de polígonos detectados = 64%				

MÉTODO DETER AL PRODUCTO MOD09 (DIARIO)

DETER diario 2005 con 3 componentes		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	-	0
2	3	-	0
3	2	2	100
4	2	-	0
5	8	5	63
6	5	-	0
7	3	-	0
8	7	1	14
9	2	-	0
10	3	-	0
11	1	-	0
12	19	2	11
total	59	10	17
Fiabilidad del productor = 17%			
Polígonos	**12**	**4**	**33**
Porcentaje de polígonos detectados = 33%			

DETER diario 2005 con 5 componentes		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	-	0
2	3	3	100
3	2	2	100
4	2	2	100
5	8	7	88
6	5	-	0
7	3	1	33
8	7	1	14
9	2	2	100
10	3	2	67
11	1	-	0
12	19	5	26
total	59	25	42
Fiabilidad del productor = 42%			
Polígonos	**12**	**9**	**75**
Porcentaje de polígonos detectados = 75%			

DETER diario 2005 con 4 componentes		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	-	0
2	3	3	100
3	2	2	100
4	2	2	100
5	8	8	100
6	5	-	0
7	3	2	67
8	7	4	57
9	2	1	50
10	3	2	67
11	1	-	0
12	19	8	42
total	59	32	54
Fiabilidad del productor = 54%			
Polígonos	**12**	**9**	**75**
Porcentaje de polígonos detectados = 75%			

DETER diario 2005 con 3 componentes			Máscara DETER diario	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles en máscara	Píxeles detectados	%
1	4	-	-	0
2	1	2	-	0
3	0	2	-	0
4	2	-	-	0
5	1	7	1	100
6	5	-	-	0
7	3	-	-	0
8	5	2	-	0
9	2	-	-	0
10	0	3	-	0
11	1	-	-	0
12	15	4	2	13
total	39	20	3	8
Fiabilidad del productor = 8%				
Polígonos	**10**	**2**	**2**	**20%**
Porcentaje polígonos detectados = 20%				

DETER diario 2005 con 5 componentes			Máscara DETER diario	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles en máscara	Píxeles detectados	%
1	4	-	-	0
2	1	2	1	100
3	0	2	-	0
4	2	-	2	100
5	1	7	1	100
6	5	-	-	0
7	3	-	1	33
8	5	2	-	0
9	2	-	2	100
10	0	3	-	0
11	1	-	-	0
12	15	4	5	33
total	39	20	12	31
Fiabilidad del productor = 31%				
Polígonos	**10**	**2**	**6**	**60**
Porcentaje de polígonos detectados = 60%				

DETER diario 2005 con 4 componentes			Máscara DETER diario	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles en máscara	Píxeles detectados	%
1	4	-	-	0
2	1	2	1	100
3	0	2	-	0
4	2	-	2	100
5	1	7	1	100
6	5	-	-	0
7	3	-	2	67
8	5	2	2	40
9	2	-	1	50
10	0	3	-	0
11	1	-	-	0
12	15	4	6	40
total	39	20	15	38
Fiabilidad del productor = 38%				
Polígonos	**10**	**2**	**7**	**70**
Porcentaje de polígonos detectados = 70%				

ACPS AL PRODUCTO MOD13 (16 DÍAS-NDVI)

ACPS al NDVI (16 Días) Con 1 Desviación Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	2	50
2	3	3	100
3	2	1	50
4	2	1	50
5	8	6	75
6	5	2	40
7	3	1	33
8	7	6	86
9	2	1	50
10	3	3	100
11	1	1	100
12	19	14	74
total	59	41	69
Fiabilidad del productor = 69 %			
Polígonos	**12**	**12**	**100**
Porcentaje de polígonos detectados = 100 %			

ACPS al NDVI (16 Días) Con 2 Desviaciones Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	2	50
2	3	1	33
3	2	-	0
4	2	-	0
5	8	5	63
6	5	1	20
7	3	1	33
8	7	4	57
9	2	1	50
10	3	2	67
11	1	-	0
12	19	5	26
total	59	22	37
Fiabilidad del productor = 37 %			
Polígonos	**12**	**9**	**75**
Porcentaje de polígonos detectados = 75 %			

ACPS al NDVI (16 Días) Con 1-5 Desviación Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	2	50
2	3	1	33
3	2	-	0
4	2	-	0
5	8	5	63
6	5	1	20
7	3	1	33
8	7	5	71
9	2	1	50
10	3	3	100
11	1	1	100
12	19	11	58
TOTAL	**59**	**31**	**53**
Fiabilidad del productor = 53 %			
Polígonos	**12**	**10**	**83**
Porcentaje de polígonos detectados = 83%			

ACPS AL PRODUCTO MOD09 (8 DIAS-NDVI)

ACPS al NDVI (8 Días) Con 1 Desviación Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	2	50
2	3	3	100
3	2	1	50
4	2	1	50
5	8	7	88
6	5	2	40
7	3	1	33
8	7	7	100
9	2	1	50
10	3	3	100
11	1	1	100
12	19	14	74
total	59	43	73
Fiabilidad del productor = 73%			
Polígonos	**12**	**12**	**100**
Porcentaje de polígonos detectados = 100%			

ACPS al NDVI (8 Días) Con 2 Desviaciones Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	1	25
2	3	2	67
3	2	-	0
4	2	-	0
5	8	5	63
6	5	-	0
7	3	1	33
8	7	5	71
9	2	1	50
10	3	-	0
11	1	1	100
12	19	7	37
total	59	23	39
Fiabilidad del productor = 39%			
Polígonos	**12**	**8**	**67**
Porcentaje de polígonos detectados = 67%			

ACPS al NDVI (8 Días) Con 1-5 Desviación Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	2	50
2	3	3	100
3	2	-	0
4	2	-	0
5	8	6	75
6	5	-	0
7	3	1	33
8	7	5	71
9	2	1	50
10	3	1	33
11	1	1	100
12	19	10	53
total	59	30	51
Fiabilidad del productor = 51 %			
Polígonos	**12**	**9**	**75**
Porcentaje de polígonos detectados = 75%			

ACPS AL PRODUCTO MOD09 (DIARIO-NDVI)

ACPS al NDVI (Diario) Con 1 Desviación Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	2	50
2	3	1	33
3	2	2	100
4	2	-	0
5	8	7	88
6	5	1	20
7	3	2	67
8	7	4	57
9	2	1	50
10	3	3	100
11	1	1	100
12	19	14	74
total	59	38	64
Fiabilidad del productor = 64%			
Polígonos	**12**	**11**	**92**
Porcentaje de polígonos detectados = 92%			

ACPS al NDVI (Diario) Con 2 Desviaciones Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	2	50
2	3	-	0
3	2	1	50
4	2	-	0
5	8	1	13
6	5	1	20
7	3	-	0
8	7	2	29
9	2	-	0
10	3	1	33
11	1	-	0
12	19	4	21
total	59	12	20
Fiabilidad del productor = 20%			
Polígonos	**12**	**7**	**58**
Porcentaje de polígonos detectados = 58%			

ACPS al NDVI (Diario) Con 1-5 Desviación Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	1	25
2	3	-	0
3	2	2	100
4	2	-	0
5	8	3	38
6	5	1	20
7	3	-	0
8	7	3	43
9	2	-	0
10	3	1	33
11	1	1	100
12	19	5	26
total	59	17	29
Fiabilidad del productor = 29%			
Polígonos	**12**	**8**	**67**
Porcentaje de polígonos detectados = 67 %			

ACPS AL PRODUCTO MOD13 (16 DIAS-BANDA DEL ROJO)

ACPS a la banda del Rojo (16 días) Con 1 Desviación Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	2	50
2	3	1	33
3	2	1	50
4	2	-	0
5	8	6	75
6	5	2	40
7	3	1	33
8	7	6	86
9	2	1	50
10	3	2	67
11	1	-	0
12	19	6	32
total	59	28	47
Fiabilidad del productor = 47 %			
Polígonos	**12**	**10**	**83**
Porcentaje de polígonos detectados = 83%			

ACPS a la banda del Rojo (16 días) Con 2 Desviaciones Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	1	25
2	3	1	33
3	2	-	0
4	2	-	0
5	8	6	75
6	5	-	0
7	3	1	33
8	7	5	71
9	2	1	50
10	3	1	33
11	1	-	0
12	19	3	16
total	59	19	32
Fiabilidad del productor = 32%			
Polígonos	**12**	**8**	**67**
Porcentaje de polígonos detectados = 67%			

ACPS a la banda del Rojo (16 días) Con 1-5 Desviación Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	1	25
2	3	1	33
3	2	-	0
4	2	-	0
5	8	6	75
6	5	-	0
7	3	1	33
8	7	6	86
9	2	1	50
10	3	2	67
11	1	-	0
12	19	5	26
total	59	23	39
Fiabilidad del productor = 39 %			
Polígonos	**12**	**8**	**67**
Porcentaje de polígonos detectados = 67%			

ACPS AL PRODUCTO MOD09 (8 DIAS-BANDA DEL ROJO)

ACPS a la banda del Rojo (8 días) Con 1 Desviación Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	1	25
2	3	3	100
3	2	1	50
4	2	1	50
5	8	6	75
6	5	-	0
7	3	1	33
8	7	7	100
9	2	1	50
10	3	3	100
11	1	1	100
12	19	12	63
total	59	37	63
Fiabilidad del productor = 63%			
Polígonos	**12**	**11**	**92**
Porcentaje de polígonos detectados = 92%			

ACPS a la banda del Rojo (8 días) Con 2 Desviaciones Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	1	25
2	3	2	67
3	2	-	0
4	2	-	0
5	8	5	63
6	5	-	0
7	3	1	33
8	7	7	100
9	2	-	0
10	3	1	33
11	1	1	100
12	19	4	21
total	59	22	37
Fiabilidad del productor = 37%			
Polígonos	**12**	**8**	**67**
Porcentaje de polígonos detectados = 67%			

ACPS a la banda del Rojo (8 días) Con 1-5 Desviación Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	1	25
2	3	3	100
3	2	-	0
4	2	-	0
5	8	6	75
6	5	-	0
7	3	1	33
8	7	7	100
9	2	1	50
10	3	2	67
11	1	1	100
12	19	10	53
total	59	32	54
Fiabilidad del productor = 54%			
Polígonos	**12**	**9**	**75**
Porcentaje de polígonos detectados = 75%			

ACPS AL PRODUCTO MOD09 (DIARIO-BANDA DEL ROJO)

ACPS a la banda del Rojo (Diario) Con 1 Desviación Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	3	75
2	3	3	100
3	2	2	100
4	2	1	50
5	8	5	63
6	5	1	20
7	3	3	100
8	7	5	71
9	2	1	50
10	3	1	33
11	1	1	100
12	19	12	63
total	59	38	64
Fiabilidad del productor = 64%			
Polígonos	**12**	**12**	**100**
Porcentaje de polígonos detectados =100%			

ACPS a la banda del Rojo (Diario) Con 2 Desviaciones Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	2	50
2	3	1	33
3	2	2	100
4	2	-	0
5	8	4	50
6	5	-	0
7	3	-	0
8	7	3	43
9	2	-	0
10	3	1	33
11	1	-	0
12	19	2	11
total	59	15	25
Fiabilidad del productor = 25%			
Polígonos	**12**	**7**	**58**
Porcentaje de polígonos detectados = 58%			

ACPS a la banda del Rojo (Diario) Con 1-5 Desviación Estándar		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	2	50
2	3	1	33
3	2	2	100
4	2	-	0
5	8	5	63
6	5	1	20
7	3	2	67
8	7	4	57
9	2	1	50
10	3	1	33
11	1	1	100
12	19	4	21
total	59	24	41
Fiabilidad del productor = 41%			
Polígonos	**12**	**11**	**92**
Porcentaje de polígonos detectados = 92%			

DIFERENCIA DE NDVI PRODUCTO MOD13

(ÉPOCA SECA)

Diferencia de NDVI a 1-5 Desviación estándar (Suma de 4 imágenes de cambio)		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	2	50
2	3	-	0
3	2	2	100
4	2	1	50
5	8	6	75
6	5	-	0
7	3	1	33
8	7	7	100
9	2	1	50
10	3	2	67
11	1	1	100
12	19	12	63
total	59	35	59
Fiabilidad del productor = 59%			
Polígonos	**12**	**10**	**83**
Porcentaje de polígonos detectados = 83%			

Diferencia de NDVI a 1-5 Desviación estándar (Suma de 2 imágenes de cambio)		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	-	0
2	3	-	0
3	2	-	0
4	2	-	0
5	8	2	25
6	5	-	0
7	3	1	33
8	7	1	14
9	2	-	0
10	3	1	33
11	1	-	0
12	19	4	21
total	59	9	15
Fiabilidad de la tasa de detección = 15%			
Polígonos	**12**	**5**	**42**
Porcentaje de acierto= 42%			

Diferencia de NDVI a 1-5 Desviación estándar (Suma de 3 imágenes de cambio)		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	1	25
2	3	-	0
3	2	-	0
4	2	-	0
5	8	6	75
6	5	-	0
7	3	1	33
8	7	5	71
9	2	1	50
10	3	1	33
11	1	1	100
12	19	8	42
total	59	24	41
Fiabilidad del productor = 41%			
Polígonos	**12**	**8**	**67**
Porcentaje de polígonos detectados = 67%			

Diferencia de NDVI a 1-5 Desviación estándar (Una imagen de cambio)		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	-	0
2	3	-	0
3	2	-	0
4	2	-	0
5	8	-	0
6	5	1	20
7	3	-	0
8	7	1	14
9	2	1	50
10	3	-	0
11	1	-	0
12	19	1	5
total	59	4	7
Fiabilidad del productor = 7%			
Polígonos	**12**	**4**	**33**
Porcentaje de polígonos detectados = 33%			

DIFERENCIA DE NDVI PRODUCTO MOD13

(ÉPOCA DE LLUVIAS)

Diferencia de NDVI 1-5 Desviación estándar (Suma de 3 imágenes de cambio)		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	1	25
2	3	1	33
3	2	1	50
4	2	-	0
5	8	8	100
6	5	-	0
7	3	1	33
8	7	3	43
9	2	2	100
10	3	1	33
11	1	-	0
12	19	2	11
total	59	20	34
Fiabilidad del productor = 34%			
Polígonos	**12**	**9**	**75**
Porcentaje de polígonos detectados = 75%			

Diferencia de NDVI 1-5 Desviación estándar (Una imagen de cambio)		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	-	0
2	3	-	0
3	2	-	0
4	2	-	0
5	8	1	13
6	5	-	0
7	3	-	0
8	7	-	0
9	2	-	0
10	3	-	0
11	1	-	0
12	19	-	0
total	59	1	2
Fiabilidad del productor = 2%			
Polígonos	**12**	**1**	**8**
Porcentaje de polígonos detectados = 8%			

Diferencia de NDVI 1-5 Desviación estándar (Suma de 2 imágenes de cambio)		**Máscara Alta Resolución**	
Desmonte	Total píxeles	Píxeles detectados	%
1	4	-	0
2	3	-	0
3	2	-	0
4	2	-	0
5	8	5	63
6	5	-	0
7	3	-	0
8	7	-	0
9	2	1	50
10	3	-	0
11	1	-	0
12	19	1	5
total	59	7	12
Fiabilidad del productor = 12%			
Polígonos	**12**	**3**	**25**
Porcentaje de polígonos detectados = 25%			

ANEXO B: TABLAS DEL SEGUNDO MÉTODO DE VALIDACIÓN

MÉTODO DETER AL PRODUCTO MOD13 (16 DÍAS)

DETER de 16 días 2005 con 3 componentes			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	23666	Sin tolerancia	29%	1%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	42			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	66			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	1310	Con tolerancia	38%	2%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	17			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	9			

DETER de 16 días 2005 con 5 componentes			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	24063	Sin tolerancia	42%	3%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	34			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	53			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	913	Con tolerancia	58%	5%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	25			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	22			

DETER de 16 días 2005 con 4 componentes			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	22806	Sin tolerancia	63%	2%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	22			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	44			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	2170	Con tolerancia	76%	3%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	37			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	31			

DETER de 16 días 2005 con 3 componentes			Máscara DETER 16 días		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	24450	Sin tolerancia	23%	1%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	36			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	50			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	1192	Con tolerancia	29%	1%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	11			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	4			

DETER de 16 días 2005 con 5 componentes			Máscara DETER 16 días		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	25006	Sin tolerancia	34%	2%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	31			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	43			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	636	Con tolerancia	47%	4%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	16			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	11			

DETER de 16 días 2005 con 4 componentes			Máscara DETER 16 días		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	23496	Sin tolerancia	57%	1%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	20			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	35			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	2146	Con tolerancia	70%	2%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	27			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	19			

MÉTODO DETER AL PRODUCTO MOD09 (DIARIO)

DETER diario 2005 con 3 componentes			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	22323	Sin tolerancia	18%	0%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	46			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	61			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	2653	Con tolerancia	34%	1%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	10			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	14			

DETER diario 2005 con 5 componentes			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	24063	Sin tolerancia	42%	3%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	34			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	53			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	913	Con tolerancia	58%	5%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	25			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	22			

DETER diario 2005 con 4 componentes			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	22810	Sin tolerancia	54%	1%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	27			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	47			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	2166	Con tolerancia	69%	3%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	32			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	28			

DETER diario 2005 con 3 componentes			Máscara DETER diario		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	22447	Sin tolerancia	8%	0%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	36			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	46			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	2389	Con tolerancia	20%	0%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	3			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	6			

DETER diario 2005 con 5 componentes			Máscara DETER diario		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	23821	Sin tolerancia	31%	1%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	27			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	38			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	1015	Con tolerancia	49%	2%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	12			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	14			

DETER diario 2005 con 4 componentes			Máscara DETER diario		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	23759	Sin tolerancia	38%	1%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	24			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	40			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	1077	Con tolerancia	53%	2%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	15			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	12			

ACPS AL PRODUCTO MOD13 (16 DÍAS-NDVI)

ACPS al NDVI (16 Días) Con 1 Desviación Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	22310	Sin tolerancia	69%	1%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	18			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	38			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	2666	Con tolerancia	81%	3%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	41			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	37			

ACPS al NDVI (16 Días) Con 2 Desviaciones Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	24192	Sin tolerancia	37%	3%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	37			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	62			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	784	Con tolerancia	49%	4%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	22			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	13			

ACPS al NDVI (16 Días) Con 1-5 Desviación Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	23529	Sin tolerancia	53%	2%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	28			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	50			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	1447	Con tolerancia	67%	4%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	31			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	25			

ACPS AL PRODUCTO MOD09 (8 DIAS-NDVI)

ACPS al NDVI (8 Días) Con 1 Desviación Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	22294	Sin tolerancia	73%	2%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	16			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	31			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	2682	Con tolerancia	84%	3%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	43			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	44			

ACPS al NDVI (8 Días) Con 2 Desviaciones Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	24173	Sin tolerancia	39%	3%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	36			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	57			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	803	Con tolerancia	53%	5%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	23			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	18			

ACPS al NDVI (8 Días) Con 1-5 Desviación Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	23478	Sin tolerancia	51%	2%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	29			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	45			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	1498	Con tolerancia	67%	4%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	30			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	30			

ACPS AL PRODUCTO MOD09 (DIARIO-NDVI)

ACPS al NDVI (Diario) Con 1 Desviación Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	22966	Sin tolerancia	64%	2%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	21			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	33			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	2010	Con tolerancia	79%	4%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	38			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	42			

ACPS al NDVI (Diario) Con 2 Desviaciones Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	24454	Sin tolerancia	20%	2%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	47			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	67			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	522	Con tolerancia	30%	4%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	12			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	8			

ACPS al NDVI (Diario) Con 1-5 Desviación Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	23896	Sin tolerancia	31%	2%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	41			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	53			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	1080	Con tolerancia	49%	4%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	18			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	22			

ACPS AL PRODUCTO MOD13 (16 DIAS-BANDA DEL ROJO)

ACPS a la banda del Rojo (16 días) Con 1 Desviación Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	23236	Sin tolerancia	47%	2%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	31			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	52			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	1740	Con tolerancia	62%	3%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	28			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	23			

ACPS a la banda del Rojo (16 días) Con 2 Desviaciones Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	24664	Sin tolerancia	32%	6%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	40			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	67			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	312	Con tolerancia	40%	8%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	19			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	8			

ACPS a la banda del Rojo (16 días) Con 1-5 Desviación Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	24233	Sin tolerancia	39%	3%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	36			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	60			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	743	Con tolerancia	51%	5%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	23			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	15			

ACPS AL PRODUCTO MOD09 (8 DIAS-BANDA DEL ROJO)

ACPS a la banda del Rojo (8 días) Con 1 Desviación Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	22868	Sin tolerancia	63%	2%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	22			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	35			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	2108	Con tolerancia	78%	4%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	37			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	40			

ACPS a la banda del Rojo (8 días) Con 2 Desviaciones Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	24613	Sin tolerancia	37%	5%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	37			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	59			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	363	Con tolerancia	51%	9%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	22			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	16			

ACPS a la banda del Rojo (8 días) Con 1-5 Desviación Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	24102	Sin tolerancia	54%	3%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	27			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	43			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	874	Con tolerancia	70%	7%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	32			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	32			

ACPS AL PRODUCTO MOD09 (DIARIO-BANDA DEL ROJO)

ACPS a la banda del Rojo (Diario) Con 1 Desviación Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	23728	Sin tolerancia	64%	3%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	21			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	38			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	1248	Con tolerancia	78%	6%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	38			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	37			

ACPS a la banda del Rojo (Diario) Con 2 Desviaciones Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	24674	Sin tolerancia	25%	5%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	44			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	60			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	302	Con tolerancia	41%	9%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	15			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	15			

ACPS a la banda del Rojo (Diario) Con 1-5 Desviación Estándar			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	24406	Sin tolerancia	41%	4%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	35			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	54			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	570	Con tolerancia	56%	7%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	24			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	21			

DIFERENCIA DE NDVI PRODUCTO MOD13

(ÉPOCA SECA)

Diferencia de NDVI a 1-5 Desviación estándar (Suma de 4 imágenes de cambio)			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	21715	Sin tolerancia	61%	1%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	23			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	39			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	3261	Con tolerancia	76%	2%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	36			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	36			

Diferencia de NDVI a 1-5 Desviación estándar (Suma de 2 imágenes de cambio)			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	24500	Sin tolerancia	15%	2%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	50			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	63			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	476	Con tolerancia	30%	4%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	9			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	12			

Diferencia de NDVI a 1-5 Desviación estándar (Suma de 3 imágenes de cambio)			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	23798	Sin tolerancia	41%	2%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	35			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	56			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	1178	Con tolerancia	55%	4%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	24			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	19			

Diferencia de NDVI a 1-5 Desviación estándar (Una imagen de cambio)			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	24813	Sin tolerancia	7%	2%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	55			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	68			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	163	Con tolerancia	17%	6%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	4			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	7			

DIFERENCIA DE NDVI PRODUCTO MOD13

(ÉPOCA DE LLUVIAS)

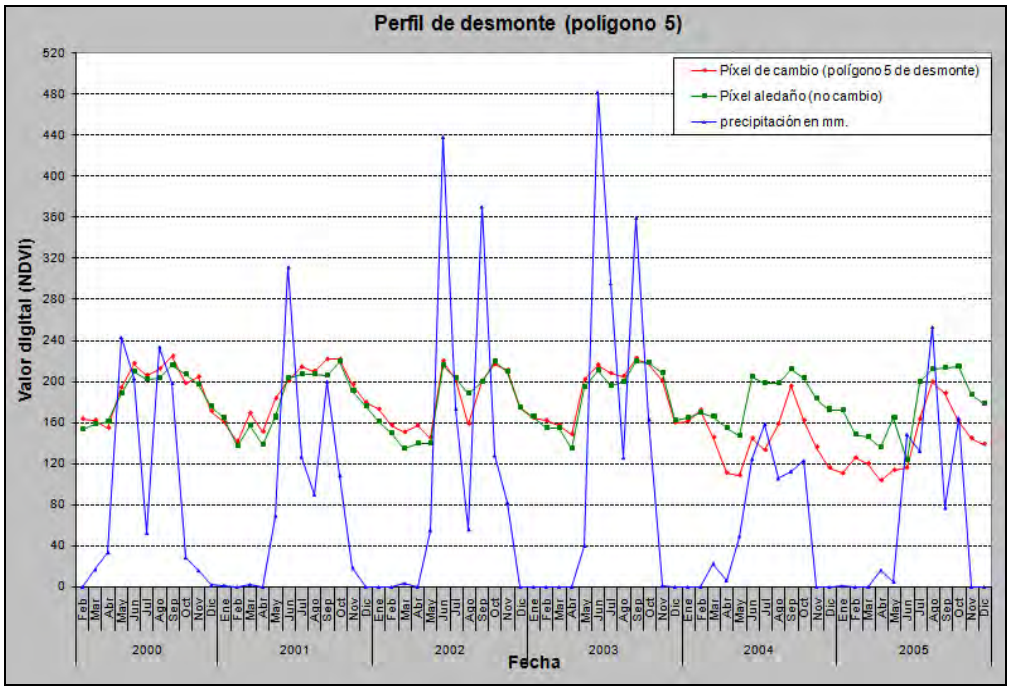
Diferencia de NDVI 1-5 Desviación estándar (Suma de 3 imágenes de cambio)			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	22325	Sin tolerancia	34%	1%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	39			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	59			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	2651	Con tolerancia	48%	1%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	20			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	16			

Diferencia de NDVI 1-5 Desviación estándar (Una imagen de cambio)			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	24972	Sin tolerancia	2%	20%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	58			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	75			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	4	Con tolerancia	2%	20%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	1			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2				

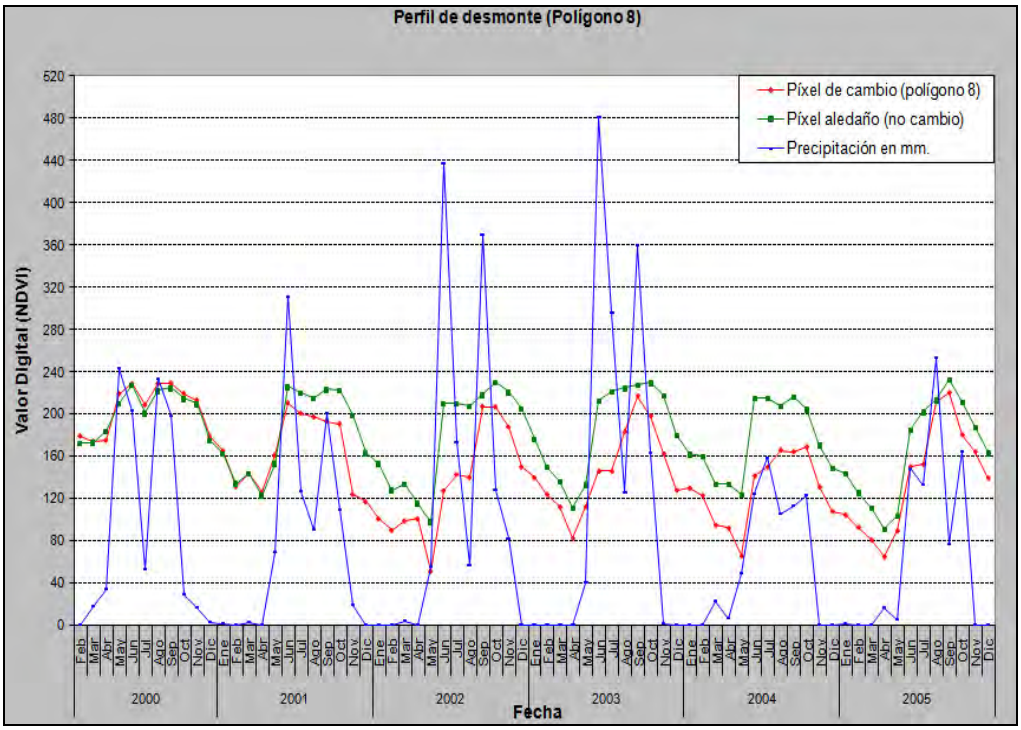
Diferencia de NDVI 1-5 Desviación estándar (Suma de 2 imágenes de cambio)			Máscara Alta Resolución		Fiabilidad del productor	Fiabilidad del usuario
Forestal	0	1	24908	Sin tolerancia	12%	9%
Píxeles de deforestación no detectados	1	1	52			
Píxeles de tolerancia no detectados	2	1	73			
pixeles mapeados como deforestación	0	2	68	Con tolerancia	15%	12%
Píxeles de deforestación detectados	1	2	7			
Píxeles de tolerancia detectados	2	2	2			

ANEXO C: PERFILES DE LA SERIE DE TIEMPO

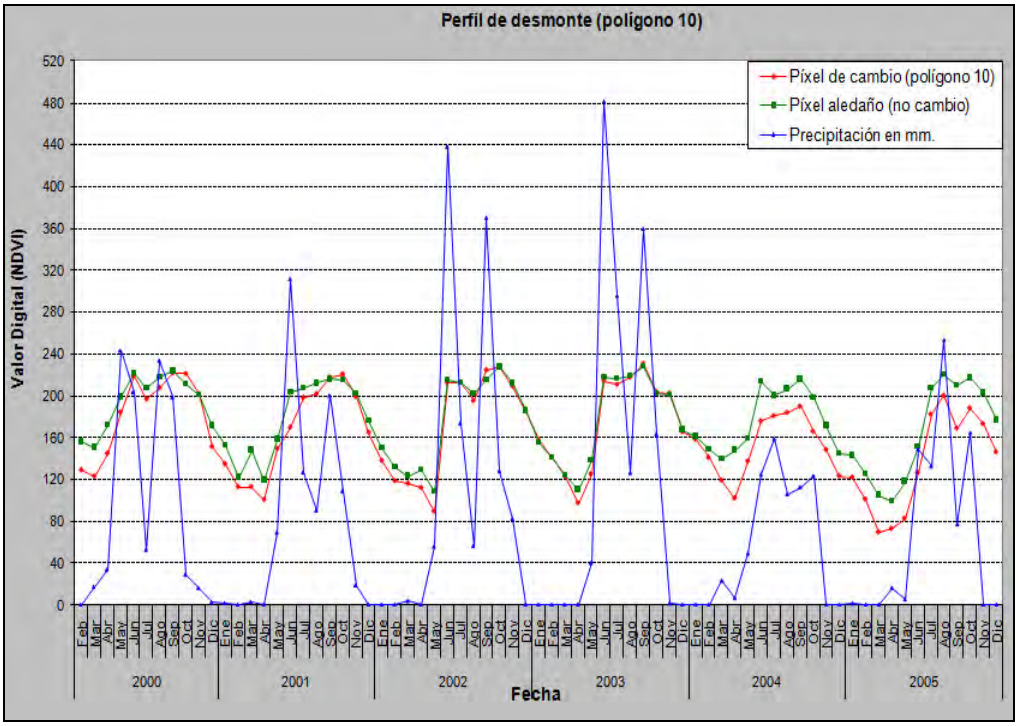
A).- PERFILES DE DESMONTE



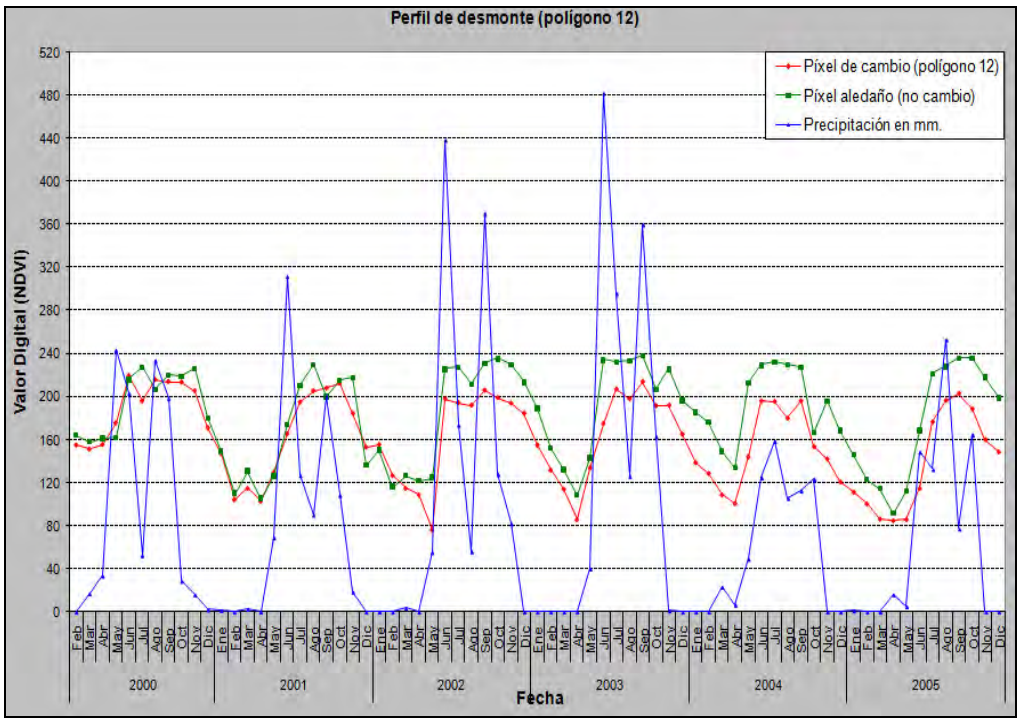
Perfil del desmonte número 5. Se aprecia que esté se realizó en abril del 2004.



Perfil del desmonte número 8. Se aprecia que el desmonte ocurrió en mayo de 2001.

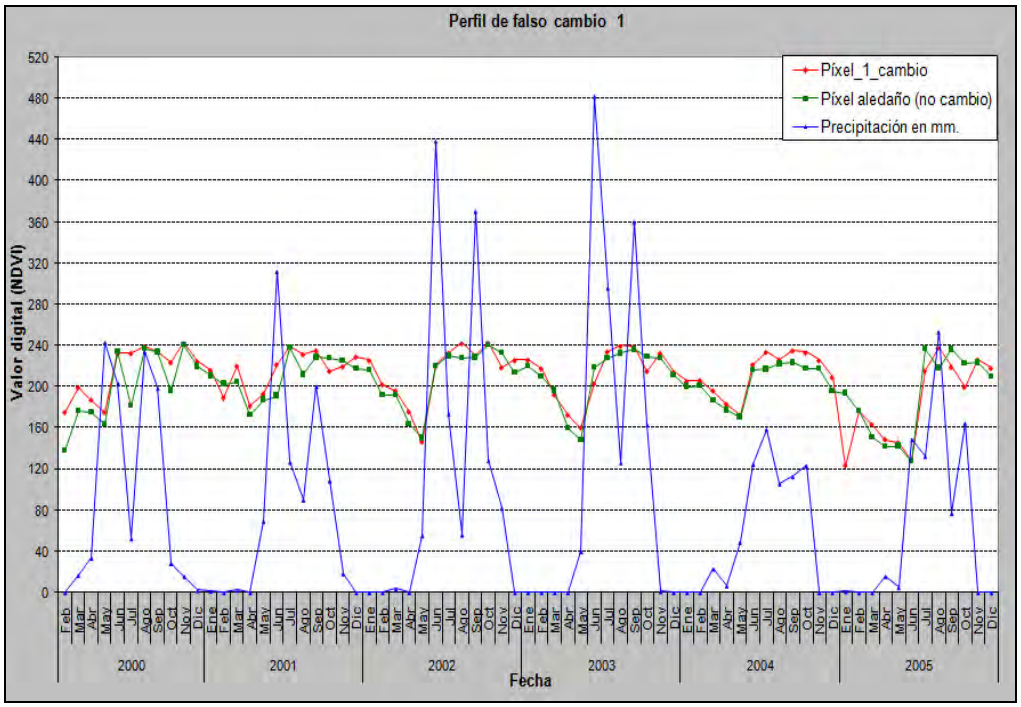


Perfil del desmonte número 10. Se aprecia que el desmonte ocurrió en marzo del 2004.

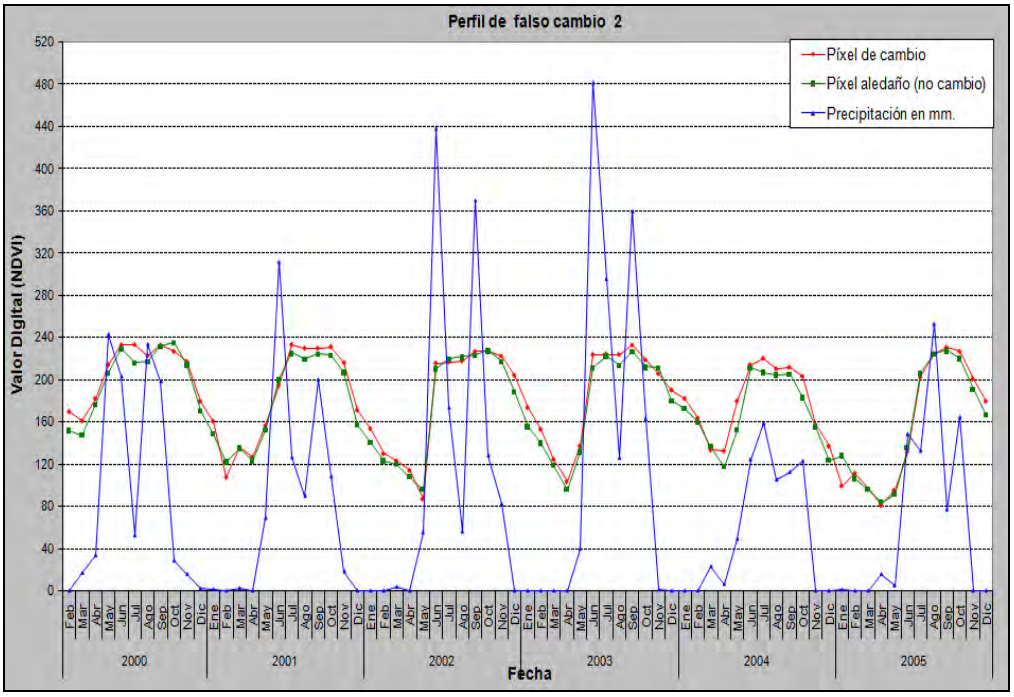


Perfil del desmonte número 12. Se aprecia que el desmonte ocurrió mayo del 2002.

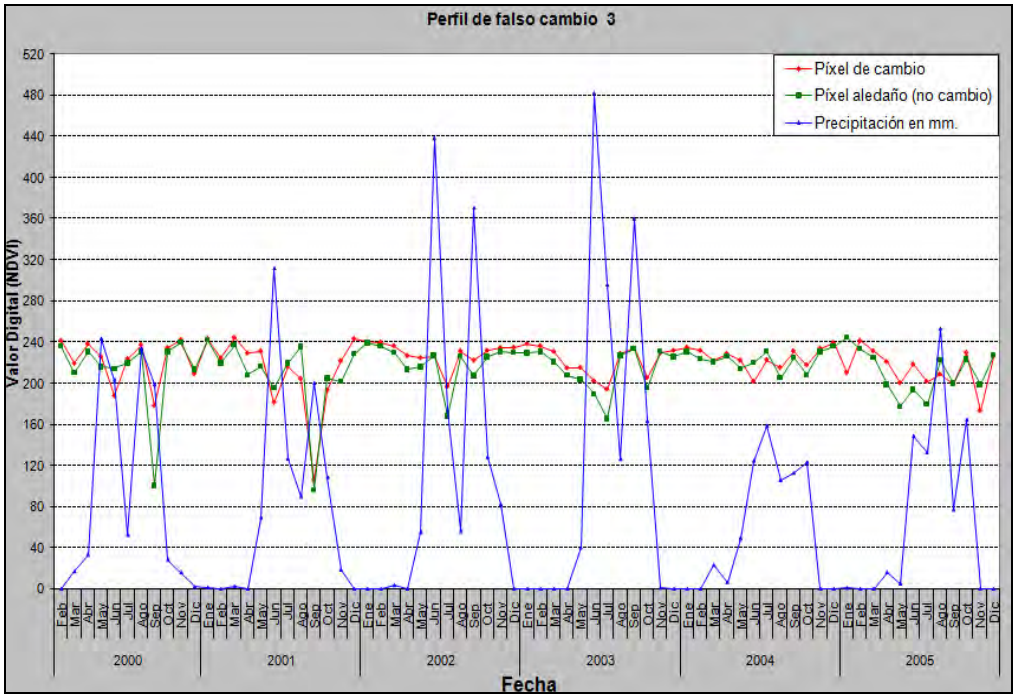
B).- PERFILES DE FALSO DESMONTE



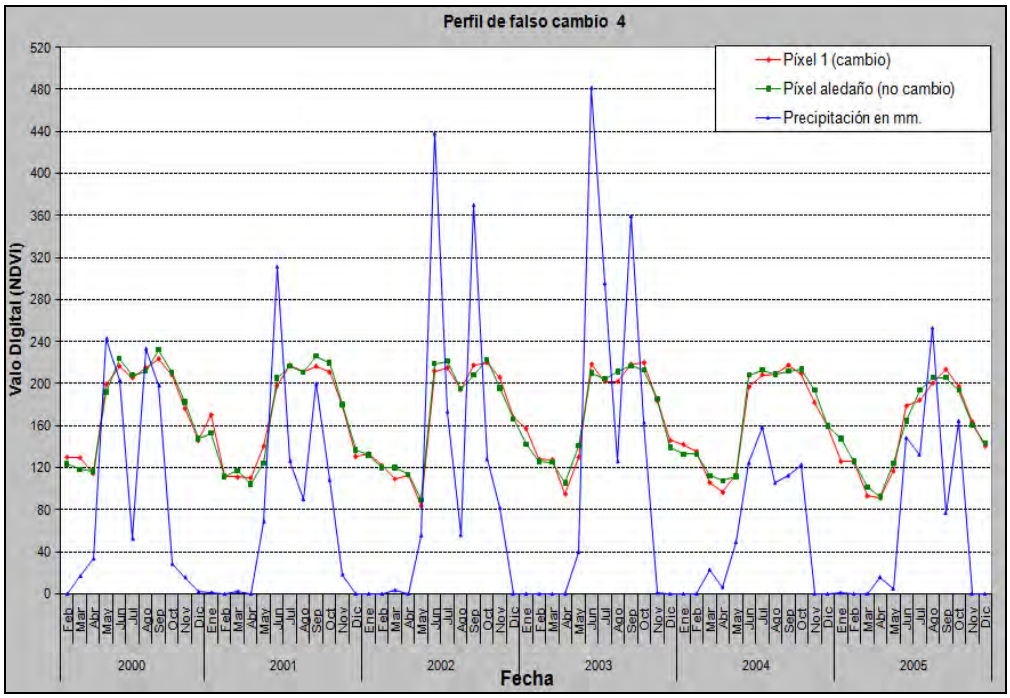
Perfil de falso cambio 1. El cambio mapeado por los diferentes métodos es producto de ruido en la imagen.



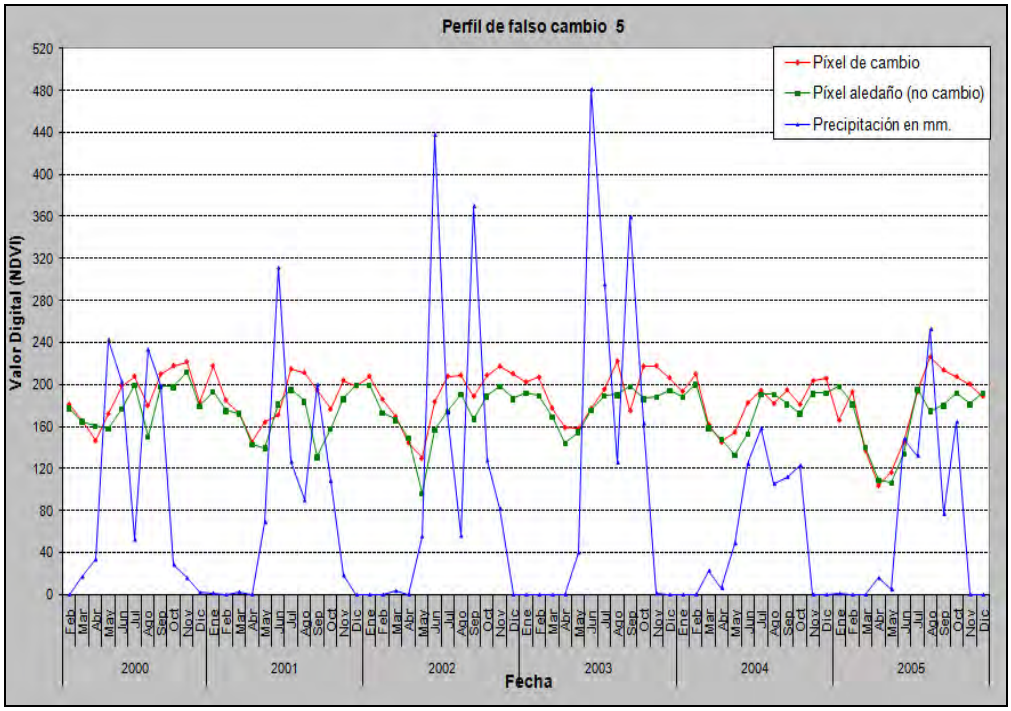
Perfil de falso cambio 2. El cambio mapeado por los diferentes métodos es producto de ruido en la imagen.



Perfil de falso cambio 3. El cambio mapeado por los diferentes métodos es producto de ruido en la imagen.



Perfil de falso cambio 4. El cambio mapeado por los diferentes métodos es producto de ruido en la imagen.



Perfil de falso cambio 5. El cambio mapeado por los diferentes métodos es producto de ruido en la imagen.