



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
POSGRADO DE GEOGRAFÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE
PERCEPCIÓN REMOTA PARA EL
CONOCIMIENTO DE LA BIODIVERSIDAD
EN MÉXICO**

INFORME ACADÉMICO POR EXPERIENCIA O
PRACTICA PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRÍA EN GEOGRAFÍA
PRESENTA

GEÓG. MARÍA ISABEL CRUZ LÓPEZ

DIRECTOR
DR. RAÚL AGUIRRE GÓMEZ
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

México D.F.

Ciudad Universitaria, octubre 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Mi sueño dorado ...

Ver la tierra desde el espacio

A mis padres

Por continuar conmigo en el camino de la vida

A mis hermanos:

*Chuy, Lupita, Conchis
por su apoyo y comprensión*

A mis sobrinos

*Luis, Itzel y Alberto
por que me permiten ser parte de
sus juegos*

Agradezco

A mi asesor Dr. Raúl Aguirre Gómez por su tiempo y ayuda que me brindó para el desarrollo de este trabajo.

A los sinodales: M. en C. Gabriela Gómez, Dra. Lilia Manzo, Dr. Román Álvarez y Dr. Jean François Mas, quienes revisaron el trabajo y lo enriquecieron.

A mi amigo Raúl Jiménez quien me ha permitido desarrollar este maravilloso tema profesionalmente.

A mis amigos Michael Schmidt, Rainer Ressler y Silke Ressler, quienes me enseñaron el camino de la percepción remota.

A todos ellos gracias

ÍNDICE

Introducción	1
I. Percepción remota y sus bases físicas	
I.1 Concepto y aplicaciones de percepción remota	5
I.1.1 Concepto de percepción remota	5
I.1.2 Aplicaciones de la percepción remota	6
I.2 Bases físicas	7
I.2.1 Radiación electromagnética y sus propiedades	7
I.2.2 Interacción de la energía con la atmósfera	9
I.2.3 Interacción de la energía con la superficie	10
I.2.4 Concepto de resolución	17
I.3 Técnicas utilizadas en los trabajos realizados	18
I.3.1 Correcciones de las imágenes	18
I.3.2 Transformaciones de la imagen	21
I.3.3 Clasificaciones y reconocimiento de patrones	22
II.- Implementación del programa de puntos de calor	
II.1. Importancia del fuego	28
II.1.1 El fuego y su importancia en la biodiversidad	28
II.1.1 El fuego como riesgo a la pérdida de la biodiversidad	29
II.2. Técnicas utilizadas en la detección de incendios forestales	34
II.2.1 Programa con imágenes DMSP	36
II.2.2 Programa con imágenes AVHRR	38
II.2.2.1 Detección de los puntos de calor	39
II.2.2.2 Caracterización del espacio geográfico del punto de calor	44
II.2.2.3 Presentación de la información en la página WEB de la Conabio	47
II.2.2.4 Distribución de la información vía correo electrónico	51
II.2.3 Programa con imágenes MODIS	51
II.2.3.1 Detección de los puntos de calor	51
II.2.3.2 Índice de propagación	57
II.3 Resultados	57

II.3.1 Puntos de calor detectados	57
II.3.2 Validación	60
II.4 Evolución del programa a un sistema de alerta temprana	62
II.4.1 Alerta temprana	63
II.4.2 Monitoreo de incendios	64
II.4.3 Identificación rápida de área quemadas	64
III.- Implementación del programa monitoreo de ecosistemas	
III.1 Cambios de uso de suelo y vegetación	67
III.1.1 Definición de área de estudio	67
III.1.2 Materiales y fuentes de información	69
III.1.3 Esquema de clasificación	71
III.1.4 Método de clasificación	73
III.1.5 Trabajo en campo	77
III.1.6 Resultados	78
III.1.7 Análisis de cambio de uso de suelo	84
III.2 Estudios actuales de monitoreo de ecosistemas	92
Conclusiones	93
Anexo 1	96
Bibliografía	97

Lista de figuras, gráficas, tablas y mapas

Figura I.1 Elementos de la adquisición de imágenes de satélite
Figura I.2 Frecuencia y longitud de onda
Figura I.3 Regiones de similar comportamiento en el espectro electromagnético
Figura I.4 Ventanas atmosféricas
Figura I.5 Comportamiento de la energía incidente
Figura I.6 Formas de la reflexión
Figura I.7 Comportamiento teórico de la energía en el agua, vegetación, suelo y nieve
Figura I.8 Imagen de satélite MODIS, los diferentes colores y tonos representan los diferente elementos que componen el paisaje
Figura I.9 Resoluciones de una imagen
Figura I.10 Comparación de resolución espacial
Figura I.11 Corrección paramétrica o sistemática: Navegación de una imagen MODIS
Figura I.12 Correcciones geométricas no paramétricas
Figura II.1 Información disponible en la página WEB

Figura II.2 Sistema de alerta temprana

Gráfica I.1 Respuesta espectral

Gráfica II.1 Número de incendios forestales 1970 - 2007

Gráfica II.2 Superficie afectada por incendios forestales 1970 - 2007

Gráfica II.3 Puntos de calor detectados de enero a agosto de 2000 a 2007

Gráfica II.4 Distribución temporal de puntos de calor y precipitación

Gráfica II.5 Porcentaje de correspondencia entre puntos de calor e incendios forestales

Gráfica III.1 Vegetación y uso del suelo, caso Michoacán

Gráfica III.2 Vegetación y uso del suelo, caso Valle de Bravo

Gráfica III.3 Vegetación y uso del suelo, caso Guerrero

Tabla II.1 Beneficios del fuego en la vegetación

Tabla II.2 Daños del fuego en la vegetación

Tabla II.3 Características de las imágenes DMSP-OLS

Tabla II.4 Características de las imágenes AVHRR

Tabla II.5 Características de las imágenes MODIS

Tabla II.6 Información utilizada de las imágenes MODIS

Tabla II.7 Puntos de calor detectados

Tabla II.8 Hora del paso de los satélites sobre México

Tabla III.1 Características generales de las imágenes de satélite utilizadas en los tres casos de estudio.

Tabla III.2 Esquema de clasificación

Tabla III.3 Vegetación y Uso del suelo, caso Michoacán

Tabla III.4 Vegetación y uso del suelo, caso Valle de Bravo

Tabla III.5 Vegetación y uso del suelo, caso Guerrero

Tabla III.6 Matriz de cambio en porcentaje caso Michoacán

Tabla III.7 Categorías de comparación Valle de Bravo

Tabla III.8a Matriz de cambio en porcentaje caso, Valle de Bravo

Tabla III.8b Matriz de cambio en hectáreas caso, Valle de Bravo

Tabla III.9 Matriz de cambio en porcentaje caso, Guerrero

Mapa III.1 Localización de las áreas de estudio

Mapa III.2 Vegetación y uso del suelo, caso Michoacán

Mapa III.3 Vegetación y uso del suelo, caso Valle de Bravo

Mapa III.4 Vegetación y uso del suelo, caso Guerrero

Mapa III.5 Detección de cambio en vegetación y uso del suelo, caso Michoacán 1992-1998

Mapa III.6 Detección de cambio en vegetación y uso del suelo, caso Valle de Bravo 1973 - 2000

Mapa III.7 Detección de cambio en vegetación y uso del suelo, caso Guerrero 1992 - 2000

INTRODUCCIÓN

La percepción remota es la técnica por medio de la cual se puede conocer y estudiar las características físicas, químicas y geométricas de un objeto sin estar en contacto físico con él. Esta técnica tuvo su origen en los primeros intentos del hombre por observar el paisaje desde una perspectiva vertical. Las primeras fotografías aéreas fueron utilizadas durante las Guerras Mundiales, para ubicar objetivos enemigos y es durante la carrera armamentista de la guerra fría, entre las dos principales potencias Estados Unidos y la Unión Soviética, que se desarrollaron los primeros satélites. Se inicia con la puesta en órbita del satélite ruso Sputnik I en 1957, siendo éste el primer satélite artificial de la Tierra (NASA, 2007).

Los satélites han evolucionando tanto en la perspectiva tecnológica como en los fines para los cuales fueron creados. Actualmente existen satélites de observación de la Tierra que tienen como objetivo proporcionar datos e información para conocer el estado actual del planeta, así como para el seguimiento de su comportamiento. El avance y desarrollo de esta tecnología ha favorecido que se amplíen las posibilidades de uso tanto en los ámbitos de estudio e investigación como en el gubernamental para la toma de decisiones, donde la ciencia debe ser aplicada para el desarrollo de la sociedad y conservación de la naturaleza. Uno de los elementos de la naturaleza más importantes es la biodiversidad, que se refiere a la variedad de la vida, e involucra todos los tipos de variedades biológicas en tres niveles: genes, especies y ecosistema (Conabio, 2001).

Las imágenes de satélite proporcionan datos para convertirlos en información del paisaje en un tiempo relativamente más corto que realizarlos con otro tipo de técnicas. Por otra parte las cuatro características principales de una imagen: resolución espacial, temporal, radiométrica y espectral, permiten generar información a diferentes escalas espaciales y temporales de análisis para diversos hechos y fenómenos.

El estudio y conservación de la biodiversidad no es una tarea sencilla, sobretodo si el territorio a estudiar es de casi dos millones de kilómetros cuadrados, como es el caso de México. Además este vasto territorio presenta una complejidad de relieve y ambientes físicos que lo convierte en uno de los 5 países megadiversos en el mundo (Conabio, 2001). Por lo tanto las técnicas de percepción remota son una herramienta de gran utilidad para el conocimiento de la biodiversidad, principalmente en el nivel de ecosistema. Actualmente se cuenta con diversos satélites de observación de la Tierra que proporcionan datos sobre los hechos y fenómenos que ocurren en nuestro territorio, estos datos son convertidos en información que se pone a disposición de usuarios y que a su vez la convierten en más información y conocimiento.

La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) inició sus actividades con el tema de percepción remota en marzo 1998, orientada hacia el análisis de cambios de vegetación, como parte de los

ecosistemas en México. Con la participación de dos personas Geog. María Isabel Cruz López y Dr. Michael Schmidt, quien se incorporó a la Conabio como parte del programa Expertos integrados con apoyo del Gobierno Alemán. Posteriormente en agosto de 1999 se incorporan dos personas más Dr. Rainer Ressler (programa de Expertos integrados) y Mat. Silke Ressler.

Su antecedente más cercano es el estudio Obtención de cartas de vegetación a partir de imágenes de satélite AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), realizado en 1997 por el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y apoyado por la Conabio. A partir de entonces la Conabio planteó la tarea de conocer los cambios que presentan los ecosistemas en México utilizando imágenes de satélite; para ello se definió el programa denominado Monitoreo de Ecosistemas. En el marco de dicho programa se desarrolló el primer trabajo nombrado "Evaluación de los cambios originados por el huracán Paulina", ocurrido en octubre de 1997, como parte de un informe desarrollado por la Conabio.

Sin embargo conforme fue avanzando el año de 1998 y como consecuencia de la presencia del fenómeno de El Niño, durante el año 1997, en México se presentaron condiciones de sequía que influyeron determinadamente en la presencia de incendios forestales. En dicho año se reportaron 14,445 incendios, afectando 849,632 hectáreas (CONAFOR, 2006).

Las autoridades de la Conabio preocupadas por los daños provocados por los incendios forestales en la biodiversidad, se plantearon la siguiente pregunta ¿Cómo se puede utilizar las imágenes de satélite para evaluar los daños causados por los incendios forestales?, con la idea de contestarla y contribuir a una evaluación rápida, las actividades de percepción remota se dirigieron al estudio "Los incendios en México: un análisis de su amenaza a la biodiversidad", que constituye el antecedente del Programa "Detección de puntos de calor mediante técnicas de percepción remota". El origen y desarrollo de este programa se presenta en forma detallada en el capítulo número II.

Es importante mencionar que las personas que establecieron el programa de puntos de calor fueron el Dr. M. Schmidt, Dr. R. Ressler y Mat. S. Ressler y Geog. María Isabel Cruz López. A ellos se les reconoce el merito de la creación del programa, así como al Director General de Bioinformática Ing. Raúl Jiménez Rosenberg, a quien se le debe la idea, participó en el desarrollo del mismo y proporcionó todo el apoyo para su continuación.

Durante los primeros años del área, el personal se enfocó al desarrollo del programa de puntos de calor, absorbiendo éste la mayor parte de su tiempo. Simultáneamente se continuó con las actividades relacionadas al monitoreo de ecosistemas, principalmente en la evaluación de cambios de uso de suelo y vegetación en algunos sitios específicos, usando imágenes de satélite Landsat. La descripción de este trabajo se presenta en el capítulo número III.

A partir de la necesidad de dar a conocer las técnicas de percepción remota y fomentar la colaboración entre las diferentes áreas de la institución, se tomó la decisión de diseñar un curso de Sistemas Información Geográfica y Percepción Remota dirigido al personal de la Conabio, en colaboración con la Subdirección de Sistemas de Información Geográfica. El tema de percepción remota fue desarrollado por el Dr. M. Schmidt, Dr. R. Ressler y Geóg. María Isabel Cruz López. En el capítulo I se presenta un resumen escrito del curso impartido en el año de 2002, se incluye en este informe con la finalidad de dar a conocer la base técnica que sustenta las actividades de percepción remota.

Actualmente la Conabio tiene conformada la Coordinación de Percepción Remota cuya misión es "Generar información utilizando técnicas de percepción remota, para contribuir en el desarrollo del sistema nacional de información sobre la biodiversidad" (Conabio, 2006).

La conformación de un equipo interdisciplinario de trabajo, para el desarrollo de los temas a trabajar en el área de percepción remota es de vital importancia, por tal motivo en el anexo 1 se presenta la relación de personas que han colaborado en el área. Cada uno de ellos ha contribuido significativamente en el desarrollo de los programas. Actualmente varios integrantes son responsables de los proyectos que se encuentran en desarrollo. Así mismo se citan las personas que han realizado su servicio social en el área, que han contribuido con su granito de arena en el trabajo de la misma. Algunos al terminar el servicio social han trabajado en proyectos específicos de la Conabio.

Objetivos del informe

Objetivo general

Explicar la implementación de las técnicas de percepción remota en la Comisión Nacional para el Conocimiento de la Biodiversidad, como herramientas en el conocimiento de la biodiversidad.

Objetivos específicos:

1. Establecer la implementación del programa de puntos de calor para el combate de incendios forestales.
2. Establecer la conformación del programa de monitoreo de ecosistemas, enfocado principalmente en la cambio de uso de suelo y vegetación utilizando imágenes de satélite.

CAPÍTULO I

Percepción remota y sus bases físicas

Este capítulo presenta en forma resumida el curso Introducción a la percepción remota, impartido por Dr. M. Schmitd, Dr. R. Ressler y Geog. I. Cruz que integraban el área de percepción remota en el año 2002. El presente es un resumen escrito por María Isabel Cruz López.

I.1 Concepto y aplicaciones de percepción remota

I.1.1 Concepto de percepción remota

La percepción remota es la adquisición y medición de las propiedades de un fenómeno, objeto o material sin estar en contacto físico con él. Por razones prácticas y para describir el tema en forma sencilla, en este trabajo percepción remota se considera como la observación y medición de las propiedades físicas, químicas y geométricas de los elementos que componen la superficie de la tierra y la atmósfera, por medio de imágenes de satélite, donde los resultados son exclusivamente datos de dos dimensiones, conocidos como imágenes.

En la lengua inglesa el término utilizado para esta tecnología es Remote Sensing y en la lengua española se utilizan varios términos como: percepción remota (el cual se utilizará en este trabajo), teledetección (utilizado comúnmente en la literatura española) y sensores remotos.

En percepción remota es posible identificar dos principales etapas, la primera enfocada a la adquisición de los datos (imágenes) y la segunda para la obtención de información a partir de estos datos.

El proceso general de la adquisición de imágenes de satélite se muestra en la figura I.1.

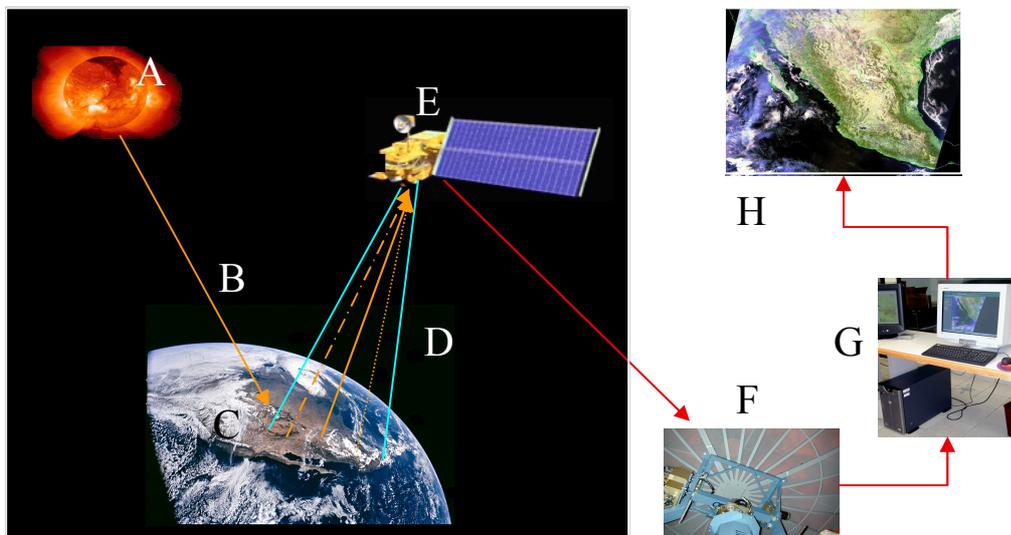


Figura I.1 Elementos de la adquisición de imágenes de satélite

- A. Fuente de energía o de iluminación. La fuente de energía ilumina o provee energía a los elementos que serán observados. El sol es la principal fuente de energía que es utilizada por los sensores ópticos.
- B. La energía que llega a la tierra.- Ésta proviene generalmente de la fuente de iluminación e interactúa con la atmósfera, en este proceso la energía puede ser absorbida o reflejada antes de entrar en contacto con la superficie. La energía reflejada por la atmósfera puede ser captada por el satélite.
- C. Paisaje con los elementos observados.- La energía que no es desviada por la atmósfera llega a la superficie e interactúa con los elementos observados. Dependiendo de las características de estos últimos es como la energía se comporta, puede ser absorbida, transmitida o reflejada, en proporciones diferentes.
- D. Energía que registra el sensor.- La energía que es reflejada por los elementos observados y la emitida en función de su temperatura, nuevamente interactúa con la atmósfera con procesos de absorción, emisión y dispersión y es registrada por el sensor.
- E. Sensor.- La energía es captada por el sensor en forma electromagnética, esta se convierte en voltaje y pasa por un convertidor análogo- digital que la cuantiza usando una escala, por ejemplo de 0 a 255 niveles (Lira, 2002). El sensor mide la energía en diferentes regiones espectrales, conforme fue diseñado el sensor y realiza una selección sucesiva para aislar las longitudes de onda de interés.
- F. Transmisión y recepción.- La energía registrada por el sensor es transmitida en telemetría a un sistema de recepción.
- G. Procesamiento.- La energía registrada por el sensor y transmitida a la estación, se convierte a una imagen. Esta imagen recibe dos procesos importantes: la calibración que consiste en comparar las mediciones del sensor con un estándar, tiene como objetivo convertir la medición de energía en parámetros geofísicos y la rectificación que se refiere a transferir los datos recibidos de una figura tridimensional como es la Tierra a un plano bidimensional.
- H. Imagen.- Es el producto final del proceso antes descrito, una imagen es un arreglo de dos dimensiones conformada por renglones y columnas; a la intersección de una línea y columna se le denomina píxel (acrónimo de picture element). El píxel representa el nivel de energía registrada.

I.1.2 Aplicaciones de la percepción remota

Las técnicas de percepción remota son utilizadas, hoy en día, en un sin número de aplicaciones, desde variables naturales hasta las sociales. A continuación se citan las principales:

- Cartografía (aspectos topográficos, uso del suelo y vegetación, infraestructura y ciudades).
- Vigilancia militar (reconocimiento de blancos y objetivos, predicción de movimientos, análisis de táctica, política estratégica).
- Detección y exploración de recursos no renovables (depósitos de minerales, petróleo, gas natural).
- Monitoreo de recursos renovables (agua, cobertura forestal, pesca).
- En la agricultura se usa en la predicción y clasificación de cultivos.
- Análisis de expansión urbana.
- Estudios de meteorología (dinámica atmosférica, predicción del tiempo).
- Monitoreo de fenómenos naturales como ciclones, incendios forestales, sequía.
- Desastre natural en sus tres fases de atención de emergencias: antes (para conocer las condiciones antes del evento extraordinario), durante (monitorear la evolución del evento y posibles impactos) y después (evaluar los efectos y daños ocurridos).
- Detección y monitoreo del cambio global como adelgazamiento de la capa de ozono, deforestación, monitoreo del efecto de invernadero, temperatura de la superficie del mar, efecto del niño, estado de la capa de hielo de los polos antártico y ártico.

Dependiendo de los objetivos y necesidades del estudio es el tipo de imágenes que deben ser utilizadas. Sin embargo es importante considerar que cada imagen tiene ventajas y desventajas, conforme a sus principales características como resolución espacial y temporal. Por tal motivo es recomendable obtener el mejor provecho de cada tipo de imagen. En algunas ocasiones es posible trabajar con dos tipos de imágenes para obtener mejores resultados, por ejemplo utilizar técnicas la fusión, en este método se aprovecha la alta resolución espacial de una imagen y la resolución espectral de otra.

I.2 Bases físicas

I.2.1 Radiación electromagnética y sus propiedades

Todos los sensores en la percepción remota usan una fuente de energía dentro del llamado espectro electromagnético, el cual describe toda la energía que viaja a la velocidad de la luz en ondas armónicas clasificadas de acuerdo a su longitud de onda, frecuencia y velocidad. En la figura I.2 se describe esquemáticamente la longitud de onda y la frecuencia.

- Longitud de onda.- Es la distancia de un punto sobre una onda a la misma posición sobre la siguiente onda. A menudo se mide en micrómetros (μm) $1\ \mu\text{m}=10^{-6}\ \text{m}$ o nanómetros (nm) $1\text{nm}=10^{-9}\ \text{m}$ para las longitudes de onda corta y en centímetros (cm) o metros (m) para las de onda larga (Chuvieco, 1990).
- Frecuencia.- Es el número de ondas que pasan a través de un mismo punto en un determinado tiempo, es medido en Hertz (Chuvieco, 1990).

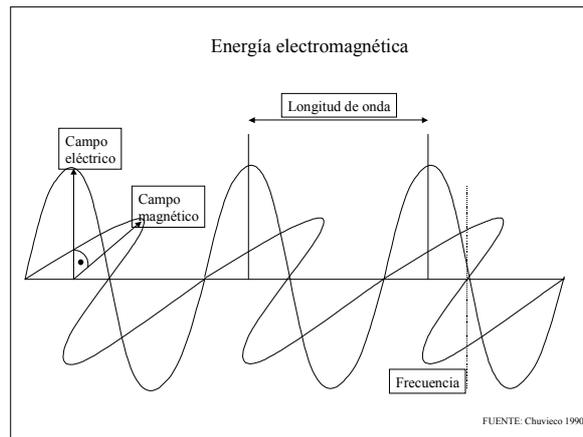


Figura I.2 Frecuencia y longitud de onda

El comportamiento de estos dos elementos es inverso: a menor longitud de onda mayor frecuencia y a mayor longitud de onda menor frecuencia, este comportamiento de la energía es importante porque permite comprender la información que se puede extraer de las imágenes de satélite.

En el espectro electromagnético se definen rangos de acuerdo a la longitud de onda, a cada rango se le denomina región o banda del espectro electromagnético. Identificadas porque el comportamiento de la energía es similar (longitud de onda y frecuencia), como se puede ver en la figura I.3.

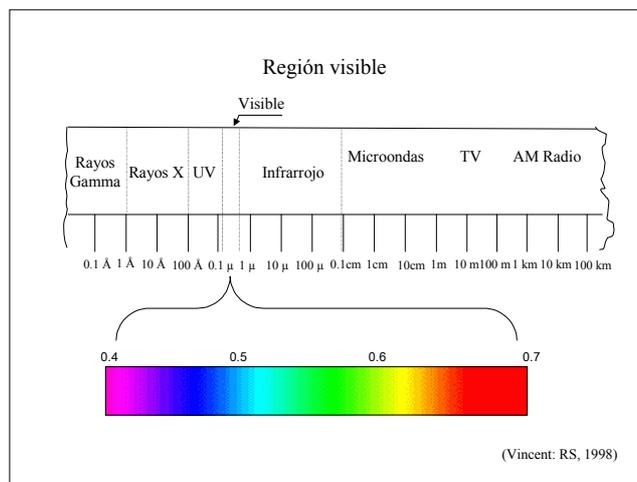


Figura I.3 Regiones de similar comportamiento en el espectro electromagnético

La radiación electromagnética viaja a la misma velocidad, comúnmente llamada velocidad de la luz, expresada de la siguiente forma:

$$C = 2,999,793 \text{ km/seg}$$

En percepción remota las regiones espectrales más utilizadas son:

La región visible del espectro que cubre aproximadamente entre los 0.4 y 0.7 μm . La longitud de onda más larga en la porción del visible es el rojo y la más corta

es el violeta. Generalmente se identifican tres bandas principales: azul (0.4 a 0.5 μm), verde (0.5 a 0.6 μm) y roja (0.6 a 0.7 μm), como se observa en la figura I.3. Estas regiones coinciden con las longitudes de onda donde es la máxima emisión del sol, principalmente a los 0.5 μm , en la banda verde (Fea, 1997). Los colores azul, verde y rojo son los colores primarios o longitudes de espectro visible, se les llama de esta forma porque es la porción de luz que el ojo humano percibe. La combinación de estos tres colores básicos forman el resto de los colores.

La región del infrarrojo (denominado de esta forma porque se encuentra después de la región del rojo) cubre el rango de longitud de onda aproximadamente entre 0.7 μm a 100 μm . En percepción remota se utilizan tres regiones que están asociadas con el comportamiento de emisión y reflexión de la energía:

- Infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 μm), región muy utilizada para la identificación de la vegetación.
- Infrarrojo medio (1.3 a 8.0 μm), en la cual se entremezclan procesos de reflexión y emisión (Mehl & Peinado, 1997), a su vez dentro de ésta, se distinguen dos regiones: el infrarrojo de onda corta (*Short Wave Infrared* por sus siglas en inglés SWIR) (1.3 y 2.5 μm), esta región es útil para la estimación de humedad en vegetación y suelos, y el infrarrojo medio que registra alrededor de los 3.7 μm , esta región es importante para la detección de puntos de calor (Chuvieco, 2002).
- El infrarrojo térmico se refiere a la energía que es emitida por la superficie de la Tierra en forma de calor, las longitudes de onda son de 8.0 μm a 14 μm .

I.2.2 Interacción de la energía con la atmósfera

La energía proveniente de la fuente de iluminación, interactúa con la atmósfera por la presencia de partículas, gases y polvo, estas interacciones provocan dos comportamientos de la energía conocidos como dispersión y absorción.

La dispersión ocurre cuando la energía interactúa con las partículas o las moléculas grandes de gases en la atmósfera y originan la desviación de la radiación de la dirección original. La dispersión de la energía dependerá de la longitud de onda y de las características de las partículas existentes, principalmente por su tamaño, provocando diferentes tipos de dispersión (Chuvieco, 1990; Mehl & Peinado, 1997):

- Dispersión de Rayleigh.- Cuando las partículas son más pequeñas que la longitud de onda de la energía, como partículas de polvo o moléculas de nitrógeno y oxígeno. Las ondas más cortas son dispersadas, este proceso ocurre principalmente en la parte más alta de la atmósfera, lo que provoca el color azul del cielo.
- Dispersión de Mie.- Cuando las partículas son aproximadamente del mismo tamaño que la longitud de onda, como: polvo, polen, humo, vapor de agua. Ocurre principalmente en las partes más bajas de la atmósfera y explica el color rojo del sol y de la luna cuando están en el horizonte.

- **Dispersión no selectiva.**- Cuando las partículas son más grandes que la longitud de onda, como: las partículas grandes de polvo y de agua. Es no selectiva porque todas las longitudes de onda son dispersadas de manera semejante. Este tipo de dispersión provoca que la niebla y nubes aparezcan de color blanco.

La absorción ocurre cuando en la atmósfera se presentan moléculas que absorben la energía de varias longitudes de onda, las partículas pueden ser de ozono, bióxido de carbono y vapor de agua.

Las regiones del espectro en las cuales la atmósfera no absorbe la radiación son denominadas comúnmente como ventanas atmosféricas (figura I.4), porque permiten el paso de la energía proveniente de la fuente de energía o iluminación. Los sensores empleados en la percepción remota son diseñados para evitar las regiones opacas y utilizar las ventanas atmosféricas. Las regiones espectrales consideradas dentro de este término son: visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio, infrarrojo térmico.

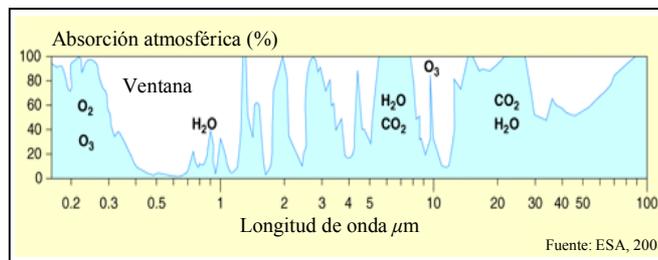


Figura I.4 Ventanas atmosféricas, donde la atmósfera no absorbe la radiación

I.2.3 Interacción de la energía con la superficie

La energía que pasa a través de las ventanas atmosféricas y llega a la superficie se le denomina energía incidente, ésta interactúa con los elementos observados, presentando tres comportamientos diferentes: reflexión, absorción y transmisión (Chuvienco, 1990) como se muestra en la figura I.5. La cantidad de energía utilizada en cada acción dependerá de las características de la superficie terrestre y objetos observados.



I = energía incidente, A = absorción, T = transmisión, R = reflexión,
Figura I.5 Comportamiento de la energía incidente

- Absorción: la energía es asimilada por los elementos observados.
- Transmisión: cuando la energía pasa a través de los elementos observados y la transfiere.
- Reflexión: la energía llega al elemento observado y es re-direccionada, este tipo de comportamiento es el que se utiliza en la percepción remota, porque el objetivo es medir la radiación reflejada por los elementos observados.

Existe otro comportamiento de energía que es la emisión, que se refiere a la cantidad de energía que un cuerpo emite, la cual está en función de la temperatura y las características del elemento (Fea, 1997). Este tipo de comportamiento es el utilizado entre otros usos para la detección de incendios forestales.

Continuando con uno de los comportamientos de la energía que más interesa en la percepción remota, la reflexión, ésta tiene en términos generales dos extremos de conducta:

- Reflexión difusa.- cuando la superficie es desigual, la energía incidente se refleja uniformemente en todas las direcciones.
- Reflexión especular.- cuando la superficie es lisa y refleja la energía con el mismo ángulo del flujo incidente.

En la figura I.6 se muestra el comportamiento de la reflexión. La cantidad de energía que recibe el sensor depende del ángulo que se forma cuando la superficie refleja la energía incidente, así como de la rugosidad de la superficie.

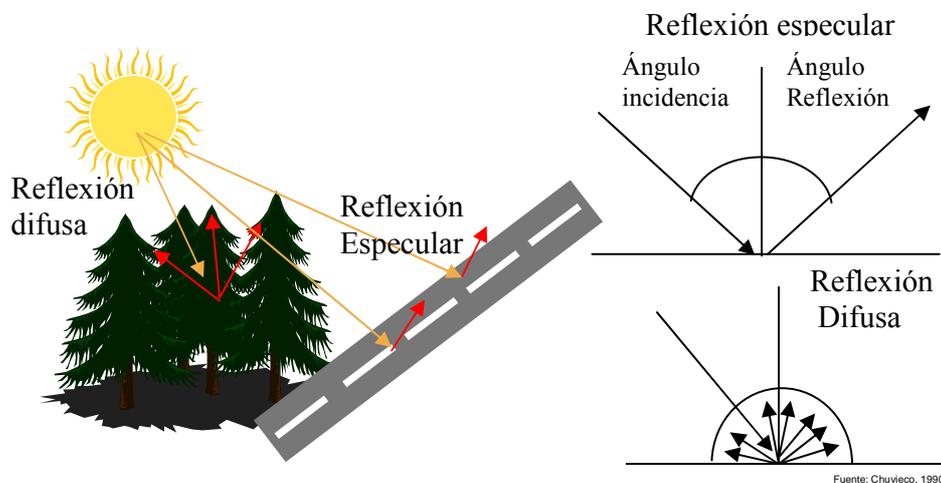


Figura I.6 Formas de la reflexión

En cuanto al proceso de emisión de la energía es necesario tomar en cuenta los siguientes principios:

Toda materia o cuerpo que tenga como característica temperatura por arriba de cero grados Kelvin (-273 °C) emitirá radiación continuamente (Ley de Planck), los cambios que ocurran en la temperatura de un cuerpo se verán reflejados notablemente en la energía emitida (Ley de Kirchhoff), a mayor absorción de la energía mayor emisión y a mayor reflexión menor emisión. Un cuerpo emitirá su

radiación proporcionalmente a su temperatura, entre mayor sea la temperatura de un cuerpo negro, menor será la longitud de onda en la cual emite (Ley de Wien), (Chuvienco, 2002; Fea, 1997; Mehl y Peinado 1997b).

La emisión del sol es máxima a los $0.5 \mu\text{m}$ (banda verde) y la Tierra es máxima en los $10 \mu\text{m}$ (infrarrojo térmico) (Fea, 1997), por lo tanto durante el día (por la influencia de sol) se puede obtener datos de la energía registrada en la región visible, pero no así durante de la noche, por lo tanto durante la noche se trabaja con la región de infrarrojo térmico. La vegetación densa y el agua presentan una mayor emisión, porque la reflexión en la región de infrarrojo térmico es baja, mientras otros elementos como el suelo arenoso (sin humedad) y metales tienen una emisión baja.

Diferentes investigaciones han identificado el comportamiento de la energía reflejada por los elementos de la superficie de la Tierra y han definido la firma espectral de cada uno (principalmente para la energía reflejada), la firma espectral se refiere a la forma particular en que una determinada cubierta refleja o emite la energía a distintas longitudes de onda, lo cual permite la discriminación entre diferentes cubiertas (Chuvienco, 1990). En la figura I.7 se presenta el comportamiento de la energía en las diferentes regiones del espectro electromagnético y los 5 principales tipos de cobertura de la Tierra.

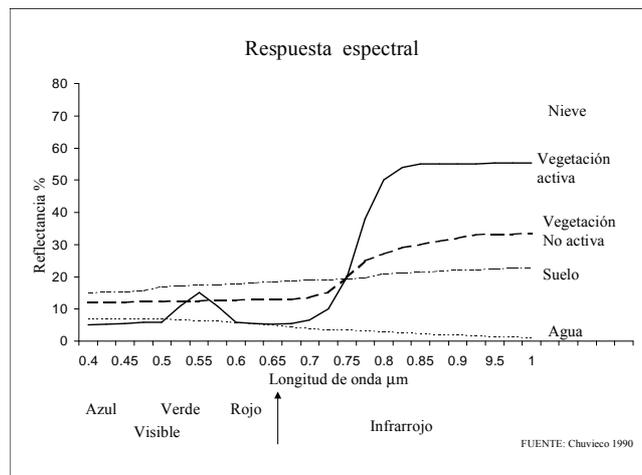


Figura I.7 Comportamiento teórico de la energía en el agua, vegetación, suelo y nieve

Vegetación

La vegetación tiene comportamientos diferentes dependiendo de la fase en la cual se encuentre, conforme a las condiciones de su estructura y actividad fotosintética. Para simplificar se hablará del comportamiento de la energía reflejada en la vegetación activa y vegetación no activa.

La vegetación activa presenta una reducida reflectancia en la banda visible y una fuerte reflectancia en el infrarrojo cercano, la respuesta disminuye hacia el infrarrojo medio. El color verde de las plantas se origina por la máxima reflectancia en la banda verde del espectro debido a los pigmentos de la hoja (clorofilas,

xantofilas y carotenos) que absorben la energía con longitudes de $0.445 \mu\text{m}$ (banda azul) y $0.645 \mu\text{m}$ (banda roja), mientras que en la longitud de onda de $0.55 \mu\text{m}$ (banda verde) presentan una absorción menor (Harris, 1987).

La alta reflectancia de la vegetación en el infrarrojo cercano se debe a la estructura celular interna de la hoja, como lo menciona Harris (1987), la capa esponjosa del mesófilo con sus cavidades de aire internas dispersan la mayor parte de la radiación incidente en esta banda del espectro, por ello, la hoja activa ofrece una alta reflectancia en las longitudes de onda 0.7 y $1.3 \mu\text{m}$ (infrarrojo cercano).

De acuerdo al comportamiento espectral de la vegetación, las dos bandas de mayor contraste en la reflectancia son la banda roja y la banda del infrarrojo cercano, por lo tanto cuanto mayor sea el contraste entre dichas bandas, mayor será el vigor de la vegetación.

En el caso de la vegetación no activa el trabajo de la clorofila disminuye, por lo tanto, hay menor absorción en las bandas azul y roja, de esta manera tiende a aumentar la reflectancia en estas bandas, mientras en el infrarrojo cercano hay una reducción de la reflectancia, como consecuencia de un deterioro en la estructura celular de la hoja (Chuvieco, 1990). El comportamiento espectral de la vegetación será modificado por las características de la vegetación, como: posición, color, contenido de agua, enfermedades, edad de las hojas; número de capas, altura, forma, geometría de la corona de la planta; densidad, asociaciones, fenología de la cubierta vegetal, pendiente, orientación, geometría de plantación conforme a su ubicación geográfica.

Agua

El agua absorbe o transmite la mayor parte de la energía que recibe; presenta alta reflectancia en las longitudes de onda cortas ($<0.6 \mu\text{m}$), con mayor reflectancia del agua clara en la banda azul, conforme aumenta la longitud de onda la absorción es mayor y menor la reflectancia, hasta llegar a una longitud de onda donde virtualmente no existe reflectancia, aproximadamente a los $0.7 \mu\text{m}$ (Chuvieco, 1990). Esto último ayuda en la identificación de tierra-agua. La reflectancia se encuentra influenciada por: reflejo directo del sol (sun glint), fondos bajos de arena, sedimentos en suspensión (arcillas y nutrientes) o abundancia de fitoplancton (aumenta la reflectancia en la banda verde), y finalmente la rugosidad de la superficie que favorece la reflexión difusa y en consecuencia hay mayor reflectancia.

Suelo

En el análisis del suelo se considera a la vegetación como un obstáculo y como un indicador, primero porque no permite ver en forma directa al suelo y el segundo porque el tipo y comportamiento de la vegetación aporta información para deducir el tipo de suelo.

Los suelos desnudos presentan un incremento gradual de la reflectancia del visible al infrarrojo cercano. La reflectancia esta controlada principalmente por ciertas variables (Mehl y Peinado, 1997b):

- Humedad.- Los suelos secos son más brillantes que los húmedos a la misma longitud de onda, esta variable se encuentra influenciada por la dinámica temporal, presencia o ausencia de precipitación pluvial.
- Origen.- Los suelos de origen calcáreo tienden al color blanco, por lo tanto presentan mayor reflectancia en las bandas visibles, mientras los suelos arcillosos tienen mayor reflectancia en el rojo, debido al alto contenido de óxido de hierro.
- Materia orgánica.- Los suelos con menor materia orgánica presentarán mayor reflectancia.

Nieve

La nieve presenta alta reflectancia en todas las longitudes de onda, desde la región del visible al infrarrojo cercano. La nieve refleja la mayor parte de la energía incidente a distintas longitudes de onda.

Es importante considerar que cada cubierta tiene un comportamiento similar, sin embargo existen factores externos que influyen en la variabilidad espectral y su comportamiento teórico. Algunos de estos factores son:

- Ángulo de iluminación solar, depende de la fecha y hora del paso del satélite.
- Modificaciones en el ángulo de iluminación por el relieve (pendiente u orientación de las laderas).
- Influencia de la atmósfera, especialmente en lo referente a la dispersión selectiva en distintas longitudes de onda.
- Variaciones medioambientales en la cubierta: asociación con otras superficies, homogeneidad que presenta, estado fenológico, etc.
- Ángulo de observación, relacionado con la órbita del satélite y con las características del sensor.

Comportamiento en el infrarrojo térmico

Existen cuatro comportamientos térmicos a considerar para conocer el comportamiento espectral de los cuatro elementos principales de la superficie terrestre (Chuvienco, 2002).

- Capacidad térmica.- Es la capacidad para poder almacenar calor.
- Conductividad térmica.- Es la velocidad con la cual la materia transmite el calor.
- Difusión térmica.- Medida de cambio de temperatura al interior de una cubierta.
- Inercia térmica.- Es la resistencia de un cuerpo a cambiar de temperatura

Agua

El agua es el elemento de la superficie terrestre que mayor capacidad térmica tiene, esto significa que almacena más calor que el resto de los cuerpos, su inercia térmica es mayor a lo largo del día, es decir no pierde calor aceleradamente, este comportamiento del agua y su presencia en el resto de los elementos influirá en el comportamiento espectral del resto de los elementos (Chuvienco, 2002).

Vegetación

La vegetación por la energía que recibe y la que consume para sus diferentes procesos (fotosíntesis, comportamiento térmico, evapotranspiración), así como por el contenido de agua que contiene, hacen que su inercia térmica sea alta durante el día, por lo tanto tiende a estar más fría que su entorno, pero durante la noche registra mayor temperatura que las zonas adyacentes porque re-emite la energía que captó en el día (Chuvieco, 2002).

En la región del infrarrojo medio la reflectancia de la vegetación es inverso al contenido de agua de las hojas, por tal motivo, la reflectancia aumenta cuando existe una disminución de la humedad por la deshidratación de las hojas, disminuyendo la emisión. El comportamiento espectral de la vegetación en esta región, obedece al contenido de agua. Mayor humedad mayor reflectancia y menor emisión.

Este comportamiento térmico ayuda a conocer el estado hídrico de la vegetación. Sin embargo hay que tener presente que siempre hay otros elementos que influyen en la respuesta espectral de la vegetación, como es la distribución, extensión y densidad de la vegetación.

Suelos

La cantidad de humedad modifica el comportamiento espectral de los suelos, como se comentó anteriormente, los suelos secos presentan mayor reflexión, por lo tanto la emisión es baja, mientras los suelos húmedos por su inercia térmica hacen que sean más fríos durante la noche.

En la figura I.8 se muestra una imagen de satélite MODIS, en la cual se pueden apreciar las diferentes respuestas de los elementos que conforman el área observada. Los cuerpos de agua presentan diversos tonos de azul, dependiendo de la profundidad y las condiciones físicas del fondo, por ejemplo la presa Infiernillo aparece en azul más oscuro que el lago de Chapala, debido a que la presa tienen mayor profundidad. Por otra parte se identifican diferentes tipos de cubierta vegetal en tonos de color verde, agricultura en verde claro y bosques templados en tonos más oscuros, mientras la vegetación de matorral se aprecia en color café. Estos comportamientos se deben a las características propias de cada elemento y su interrelación con la energía.

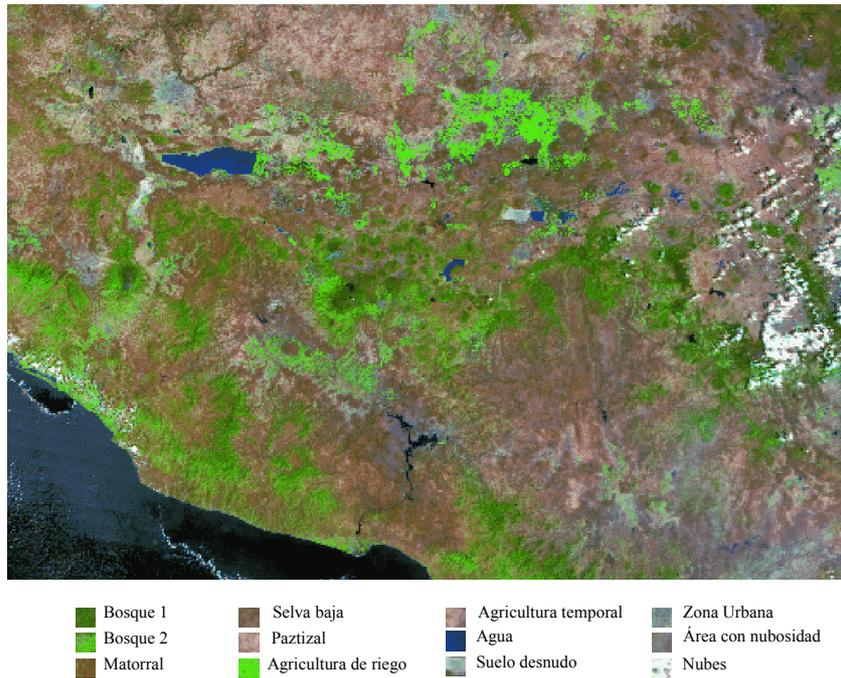
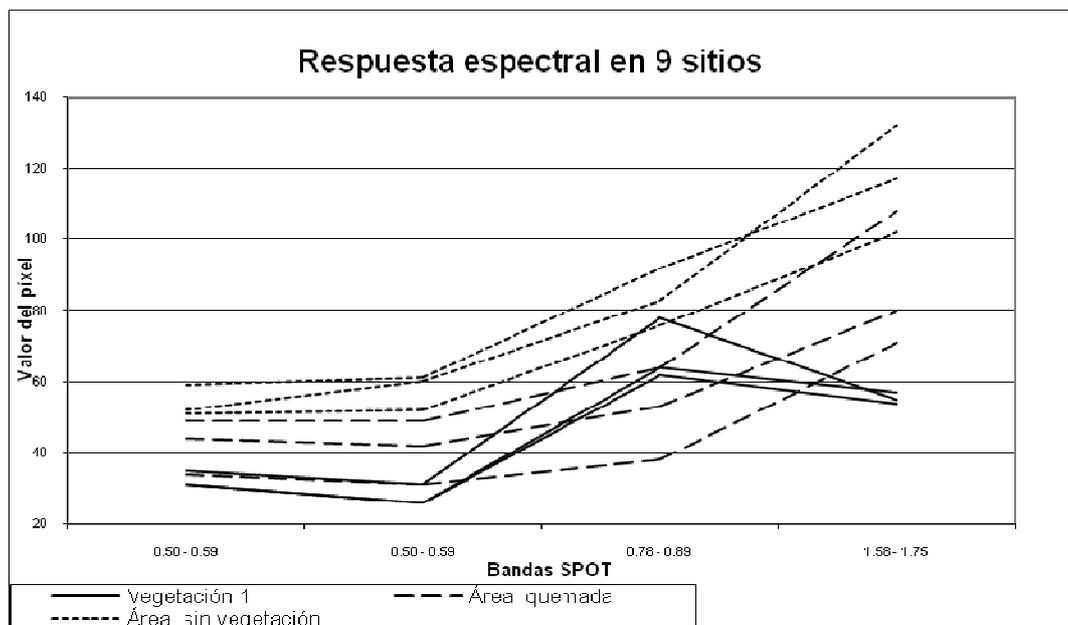


Figura I.8 Imagen de satélite MODIS, los diferentes colores y tonos representan los diferentes elementos que componen el paisaje

Como un ejemplo de la respuesta espectral de diferentes elementos de la superficie terrestre en las bandas de una imagen SPOT se observa en la gráfica I.1. En las regiones de 0.78 – 0.89 (infrarrojo cercano) y de 1.58 – 1.75 (infrarrojo de onda corta), el comportamiento del área quemada y vegetación es inverso.



Gráfica I.1 Respuesta espectral, imagen SPOT

I.2.4 Concepto de resolución

La resolución es la capacidad de separar o distinguir elementos de las imágenes de satélite en el espacio geométrico, en el tiempo, en el espectro electromagnético y en la medida de la señal (Fea, 1997).

Las imágenes de satélite están caracterizadas por cuatro resoluciones específicas: espacial, temporal, espectral y radiométrica. Con el objeto de explicar en conjunto las cuatro resoluciones se presenta la figura I.9.

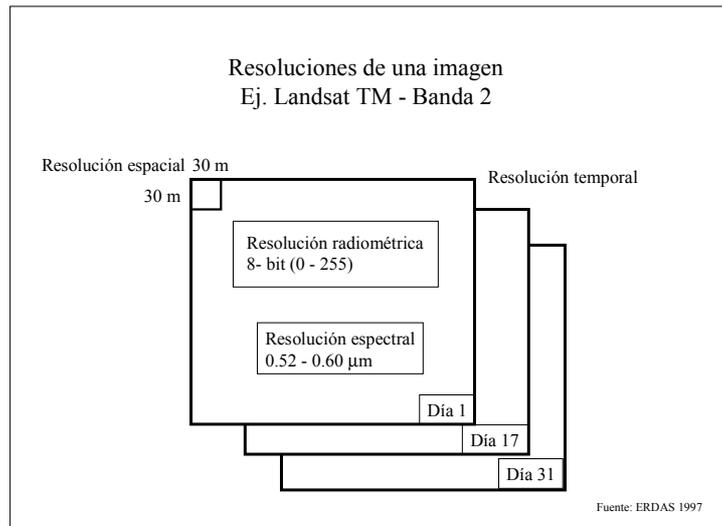


Figura I.9 Resoluciones de una imagen

- Resolución espectral.- Es el tipo y número de regiones o bandas espectrales en que un sensor opera. Se puede hablar de resolución gruesa cuando el sensor registra en una banda un rango amplio del espectro y resolución fina cuando el sensor tiene la capacidad de registrar rangos pequeños del espectro.
- Resolución temporal.- Es el mínimo intervalo de tiempo entre dos observaciones sucesivas, bajo las mismas condiciones geométricas (Fea, 1997). Se refiere a la periodicidad que tiene el paso del satélite sobre un punto específico de la tierra. Describe la frecuencia de las observaciones.
- Resolución espacial.- Es la dimensión espacial más pequeña que puede ser registrada por el sensor, o el área mínima representada por cada píxel. La resolución espacial es también la dimensión del área vista por el detector en un tiempo determinado (Star & Estes, 1990) y describe la precisión de los detalles observados.

El término de píxel es un acrónimo para Picture element, es el elemento mínimo de una imagen y es utilizado para definir la resolución espacial. El píxel en una imagen representa un promedio de tres dimensiones espacio, longitud de onda y tiempo. En la figura I.9 se muestra la diferencia de resolución espacial entre dos tipos de imágenes.



Imagen de satélite Landsat ETM+, con resolución espacial de 30 m. Ciudad de México



Imagen Ikonos, con resolución espacial de 4 m. Santa Fé en la Ciudad de México

Figura I.10 Comparación de resolución espacial

- Resolución radiométrica.- Es el número posible de codificación de la radiación recibida por el sistema en número de bits; describe la sensibilidad o precisión del sensor (Fea, 1997). Por ejemplo: en 8 bits el rango de valores es de 0 a 255, pero en 7 bits el valor de cada píxel puede ir de 0 a 127, en 10 bits de 0 a 1023 y en 12 bits 0 a 4095.

I.3 Técnicas utilizadas en los trabajos realizados

En la primera parte de este capítulo se mencionó que la percepción remota constaba de dos etapas principales: adquisición de datos, la cual fue explicada con anterioridad y la obtención de información. En los siguientes apartados se explicarán algunos de los métodos para preparar los datos, a esta etapa se le denomina pre-procesamiento y posteriormente los métodos para obtener información.

I.3.1 Correcciones de las imágenes

El pre-procesamiento de las imágenes de satélite consiste en la corrección de algunos elementos de las imágenes antes de proceder a la extracción de la información. Incluyen las correcciones: 1) radiométricas, 2) atmosféricas y 3) correcciones de la iluminación del sol, esta última identificada como calibración y corrección geométrica. Estas correcciones son necesarias debido a que no siempre se tienen las mismas condiciones de iluminación del sol en la órbita, que depende de la temporada del año y la hora del día, así como los movimientos de los satélites que transportan los sensores.

Corrección radiométrica

Consiste en reducir al máximo errores que degradan la imagen, causados por diferentes fuentes como calibración o mal funcionamiento de los detectores, efectos atmosféricos, efectos topográficos, errores en la transmisión. La corrección radiométrica modifica los niveles digitales originales de la imagen al corregir las variaciones de la radiancia recibida en una escena. (Chuvienco, 1990; Harris, 1987; Mehl & Peinado, 1997). La radiancia es la cantidad de energía radiada por una superficie por unidad de área y ángulo sólido (Chuvienco, 2002).

Corrección atmosférica

Los valores que reciben los sensores vienen transformados debido a que la radiación atraviesa primero la atmósfera, es reflejada por la superficie y nuevamente atraviesa la atmósfera. Cuando la radiación sale directamente por encima de la atmósfera, el valor que registra el sensor se encuentra influenciado por la atmósfera. Para tratar de corregir esta influencia se utilizan modelos atmosféricos, en los cuales se necesita conocer información sobre la posición y hora del satélite, así como las posibles condiciones atmosféricas imperantes en el momento del registro de la imagen.

Corrección geométrica

Se enfoca a corregir cambios en la posición y coordenadas de los píxeles de la imagen. Cada imagen obtenida por percepción remota tiene distorsiones geométricas, porque se trata de representar la superficie tridimensional (forma de la Tierra) en una imagen bidimensional (imagen).

Sólo los objetos que se encuentran en el nadir (el punto en la Tierra directamente abajo del sensor en un ángulo de 90°) del sistema de detección no tienen distorsión, pero cada punto que se encuentre fuera del centro tendrá distorsión. La señal está influenciada por la óptica del sensor, por los movimientos de la plataforma y por la altura; el relieve afecta cuando el sensor se encuentra más cerca de la superficie, mientras la curvatura de la tierra tiene más influencia cuando el sensor está más lejos. Existen 2 formas de correcciones geométricas (Mehl & Peinado, 1997):

- Paramétricas o correcciones sistemáticas, para ello son utilizados los parámetros proporcionados por el sensor referente a la posición y los movimientos del satélite conocidos como elementos orbitales, un ejemplo de corrección sistemática es la navegación, que implica ajustar la imagen a una línea de costa, utilizando los elementos orbitales, como se observa en la figura I.11.

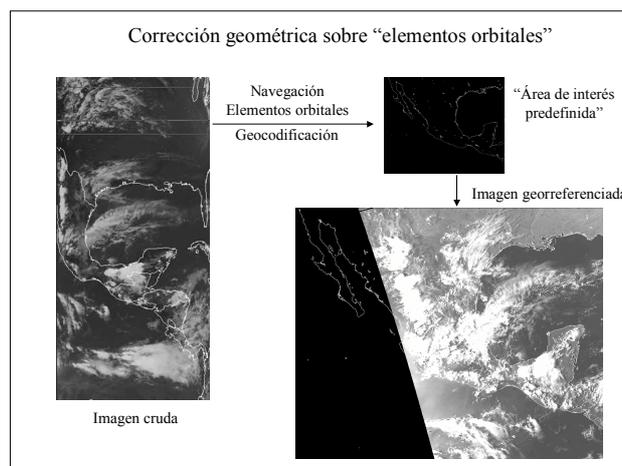


Figura I.11 Corrección paramétrica o sistemática: Navegación de una imagen MODIS

- No paramétricas o correcciones de escena. Para corregir la distorsión de la imagen se debe reubicar los píxeles de su localización original en el raster a una nueva posición conforme a una referencia, la cual puede ser otra imagen, mapas o modelo digital del terreno (MDT), con la ayuda de puntos de control. Consiste principalmente de dos fases:

a) Rectificación en la cual se proyectan los datos a una proyección cartográfica o en un sistema de coordenadas como las geográficas. En esta fase se definen los modelos matemáticos y la transformación de coordenadas para generar una rejilla con la nueva posición.

b) Remuestreo mediante el cual se extrapola los valores de la posición original a la nueva. Para ello son utilizados tres algoritmos diferentes: vecino más cercano, interpolación bilinear y convolución cúbica.

Existen diferentes niveles de corrección geométrica no paramétricas, como se muestran en la figura I.12.

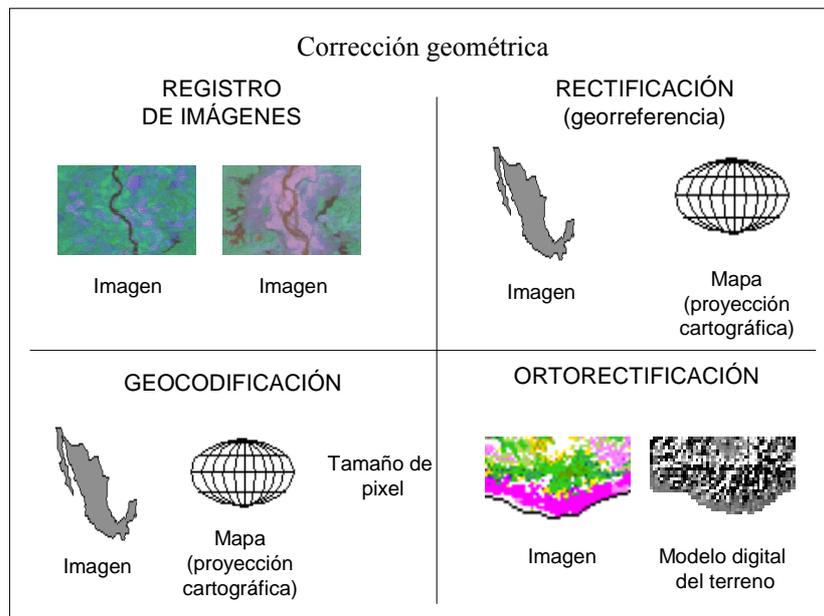


Figura I.12 Correcciones geométricas no paramétricas

- Registro.- Es la alineación de una imagen a otra de la misma área.
- Rectificación.- Es la alineación de una imagen a un mapa, frecuentemente a este proceso se le denomina georreferencia.
- Geocodificación.- Todos los píxeles están adaptados a un píxel estándar (conforme al intervalo de remuestreo), todos tienen el mismo tamaño sobre la tierra.
- Ortorectificación.- Involucra la corrección de píxel por píxel debido a la distorsión topográfica. Se eliminan los efectos de deformación de reducción y amplificación de los píxeles, por efectos de la posición del sensor y corrige los efectos de distorsión del terreno, para ello se utiliza un modelo digital del terreno (MDT).

Existen diferentes niveles de procesamiento o pre-procesamiento, cada nivel se utiliza para obtener un estándar y saber el tipo de pre-procesamiento tiene una imagen. Los niveles estándares son:

- Nivel 0.- Cuando los datos están crudos, es decir que no han recibido ningún proceso para su corrección.
- Nivel 1.- Tienen pre-procesamiento como la calibración y corrección geométrica, dentro de este nivel hay diferentes subniveles, dependiendo del tipo de corrección geométrica.
- Niveles 2 y 3.- No son estándares y dependerá del proveedor de la imagen.

I.3.2 Transformaciones de la imagen

Las transformaciones de las imágenes son empleadas para mejorar la imagen y obtener información adicional que no se observa a simple vista. Dentro de éstas son consideradas las transformaciones espectrales y transformaciones espaciales.

Transformaciones espectrales

Son utilizadas para obtener mejor información visual, para ello se utiliza el histograma de la imagen, que permite la visualización de los valores de los píxeles y su cantidad en una banda de una imagen.

En la superficie terrestre existen diferentes elementos y estos se encuentran representados en un rango amplio de valores de reflexión, por ejemplo el agua tiene valores muy bajos porque la energía no es reflejada y por el otro lado podemos tener valores muy altos ocasionados por las nubes que reflejan la energía. El número de valores también dependerá de la resolución radiométrica de cada imagen, por ejemplo una imagen Landsat ETM+, cuya resolución es de 8 bits tienen el rango de 0 a 255 niveles o valores, una imagen de satélite AVHRR es de 10 bits y tienen un rango de más de 1000 niveles. Por lo tanto es necesario realizar un mejoramiento para la identificación de los elementos que se desea distinguir.

Para hacer el mejoramiento se aplican diferentes funciones al histograma, el objetivo es aprovechar todos los valores disponibles en el monitor para el despliegue de los valores de la imagen. La nueva distribución se aplica en una tabla denominada Look up Table (tabla de referencia de color), que consiste en una tabla de color, con el objeto de no modificar los valores originales de la imagen. La Look up table es una matriz numérica que indica la relación entre los valores de la imagen y el valor de visualización en la pantalla.

Transformación espacial

Es una herramienta para extraer o modificar la información espacial en la imagen. Hay transformaciones que modifican sólo una parte de la imagen, denominados filtros locales, utilizando el análisis de vecinos como convolución, otros como la transformada de Fourier procesa la imagen completa, denominada operación global que modifican cada píxel en forma independiente (Mehl & Peinado, 1997). Entre estos extremos hay una variedad de filtros que proveen una representación de los

datos, y permiten el acceso a la información espacial, en un amplio rango de escalas.

Existen otros procesos en los cuales se involucra más de una banda, aplicando operaciones como sumas, restas ó cocientes, utilizados para reducir ruido de una imagen o influencia de otros factores como los atmosféricos. Estos procesos son denominados índices espectrales.

Un índice espectral es la combinación de bandas para resaltar algún elemento que se requiere estudiar o extraer de las imágenes, para ello es importante conocer el comportamiento del elemento a estudiar en las diferentes regiones espectrales. Uno de los índices más utilizado es el índice de vegetación.

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), ha sido utilizado por diferentes autores para conocer la distribución de la vegetación, este índice se basa en el comportamiento espectral teórico de la vegetación en dos regiones espectrales diferentes, la banda roja y la infrarroja, en las cuales la vegetación tiene un comportamiento inverso como se aprecia en la figura I.6, utilizando la siguiente formula:

$$NDVI = (pir - pr) / (pir + pr)$$

Donde:

pir = banda de infrarrojo cercano
pr = banda de rojo visible

El resultado del índice es un valor entre -1 a 1; cuanto más cercano al 1, la vegetación es más verde, densa y húmeda. El uso de este índice ayuda para conocer la distribución de la vegetación y en ocasiones realizar alguna diferenciación de tipos de vegetación.

La descomposición de la imagen dentro de una suma de componentes de diferentes escalas es la base de todos los filtros espaciales. El proceso inverso de adherir componentes es llamado sobreposición. Las dos transformaciones son a menudo llamadas análisis y síntesis. Ya que las imágenes se descomponen en rangos de diferentes escalas.

I.3.3 Clasificaciones y reconocimiento de patrones

La clasificación de imágenes es el proceso de separar los píxeles en categorías o clases individuales, con base en los niveles digitales de las imágenes y criterios de categorización. De esta forma se extrae la información que se requiere y suprimir la que no ayuda o es innecesaria.

El primer paso es definir el objetivo de la clasificación, escala de trabajo, tipo de imagen y el esquema de clasificación a utilizar.

El esquema de clasificación consiste en establecer las clases de interés conforme a los objetivos del trabajo y la posibilidad de ser discernibles e

identificadas en la imagen, considerando la resolución espacial, espectral y la escala cartográfica establecida.

Es importante considerar que entre más clases se consideren en un esquema de clasificación, existe una mayor probabilidad de traslape entre clases en el momento de diferenciarlas.

El principal proceso en una clasificación es el reconocimiento de patrones, el cual consiste en encontrar parámetros comunes en los datos que ayuden a identificar y separar los elementos que se desea extraer de la imagen.

Cuando el usuario observa una serie de datos, por ejemplo, en un mapa o una imagen, automáticamente separa los patrones percibidos en categorías basadas en valores de grises y textura. Pero al ejecutar este trabajo en un sistema computarizado algunas medidas estadísticas son aplicadas en los datos, los cuales proveen criterios y reglas de decisión para caracterizar y separar los datos en clases. Estas pueden consistir de elementos conocidos y reconocibles sobre el terreno y pueden ser ordenados por la computadora basados en sus estadísticas.

El entrenamiento es el proceso de identificación de criterios por los cuales los datos serán separados, esta separación se puede realizar en dos formas: clasificación supervisada y no supervisada.

Formas de clasificación

La clasificación supervisada esta bajo el control del analista, pero necesita un claro esquema de entrenamiento y clasificación (anteriormente explicado), el cual tiene que ser establecido antes del proceso. El entrenamiento consiste en seleccionar los píxeles o grupo de píxeles que representan ciertos elementos en el paisaje (se les denomina campo de entrenamiento). Un campo de entrenamiento es un área muestra que sirve para estimar la estadística espectral representativa de un tipo de cobertura del suelo, vegetación o un elemento de la imagen, esta área muestra es un grupo de píxeles con características espectrales semejantes. La selección de los campos de entrenamiento se basa en otras fuentes, tales como: datos de campo, fotografías aéreas o cartografía existente o digitalización sobre la misma imagen, este último proceso es aplicado cuando el analista tiene un conocimiento previo del área de estudio.

Un campo de entrenamiento debe ser homogéneo y evitar los bordes para prevenir confusiones en el proceso de clasificación y se recomienda obtener campos de entrenamiento en diferentes estados de la cobertura o vegetación para considerar la variación espacial, que puede estar influenciada por las características geográficas del área de estudio.

Una clasificación no supervisada no es controlada por el usuario, ya que no se establecen reglas de decisión. Sólo se indica el número de grupos (clusters) y el algoritmo para que la computadora separe los grupos, utilizando parámetros para identificar patrones estadísticos dentro de la imagen (Mehl & Peinado, 1997). Los patrones no corresponden necesariamente a las clases físicas de la escena, sino que representan simplemente grupos de píxeles con características espectrales

similares. Este método es usualmente empleado cuando el usuario quiere explorar los grupos reconocibles en los datos.

Firmas paramétricas contra no paramétricas

A partir de los campos de entrenamiento se definen firmas correspondientes a cada clase y se utilizan como regla de decisión para asignar un valor de grupo. Hay dos tipos de firmas: paramétricas y no paramétricas.

La firma paramétrica esta definida por los parámetros estadísticos de los píxeles, que están en los campos de entrenamiento tales como media y matriz de covarianza.

Una firma no paramétrica esta basada en objetos discretos (polígonos o rectángulos) en el espacio de características de la imagen. Todas las imágenes tienen un espacio abierto tridimensional formado por extensión X, Y y Z (banda o el número de bandas involucradas), esto abre un espacio donde se encuentra la nube de los datos de las imágenes, que son representados por los valores espectrales y su posición X, Y y la banda Z. En esta nube de puntos se puede definir formas geométricas, cuerpos independientemente de la información de la superficie, así se puede decir que la representación no esta basada en estadísticas, sino en la distribución de la información de los píxeles e información espectral adentro del espacio de características (feature space), en la clasificación sólo se determina si el píxel pertenece o no a la clase definida.

Reglas de decisión

Son algoritmos matemáticos utilizados para la clasificación de los píxeles, basados en las firmas espectrales.

Dos tipos de reglas de decisión pueden ser usados, para esta tarea. Una regla de decisión paramétrica es entrenada por firmas paramétricas las cuales están definidas por el vector del promedio y la matriz de covarianza. Una decisión paramétrica asignará cada píxel a una clase.

Las reglas de decisión no paramétricas asignan los píxeles a cada grupo, basadas en la localización del píxel dentro de una firma no paramétrica.

Algoritmos utilizados para la asignación de clases

Isodata.- Esta basado en análisis de clúster (grupos) usando las estadísticas de los píxeles, este algoritmo es utilizado cuando no hay un conocimiento previo de la zona. El resultado es una imagen ordenada en grupos, el número de grupos es definido por el usuario, posteriormente cada grupo es etiquetado con una descripción de acuerdo a la interpretación del analista.

La definición de los grupos se realiza en pasos, los píxeles se ordenan por los valores espectrales descritos por el promedio y la desviación estándar, en el vector principal del primer paso serán distribuidos los valores de los píxeles y se definen ejes que separan las clases. En el siguiente paso, basado en las clases predefinidas

y el vector, son re-calculados los promedios y desviaciones estándar, para resumirlos en nuevas clases, que tendrán menos valores de desviación estándar, tratando de reducir la variabilidad dentro de la clase para llegar a las clases bien definidas. Los pasos pueden ser definidos por un número absoluto, por ejemplo 5 o calcular los pasos hasta que el 95% ó el 98% de los píxeles tienen una clase bien definida.

Distancia mínima espectral.- es la semejanza máxima espectral y espacial al píxel que da la información, el píxel candidato establece la relación con sus vecinos utilizando el promedio y la desviación estándar, así si el píxel candidato tiene una semejanza del 80% a una categoría B y el 70 % a la categoría A se clasifica con la categoría B.

Paralelepípedos.- Se establece un espacio dentro de la distribución de los píxeles, éstos son ordenados en categorías o clases. Para definir estas categorías se establecen los límites de clases con el promedio y la desviación estándar o definiendo formas geométricas que establezca la extensión de los límites con la información espectral.

Máxima probabilidad (maximum-likelihood).- Algunas veces llamado clasificador de Bayes. Se busca la semejanza espectral y la probabilidad que esta semejanza proporciona para asignar el píxel candidato a una clase, se aplican formulas para definir la probabilidad y asignar, basado en la distancia mínima, un píxel a una clase.

Por otra parte es importante mencionar que existen clasificaciones discretas y continua, en la primera cada píxel es asignado a una sola clase y la segunda es cuando cada píxel puede tener más de una clase, como ejemplo es la clasificación difusa o Fuzzy classification.

Trabajo en campo

La principal fuente de información útil para complementar, verificar, validar y obtener información a partir de los datos generados de la percepción remota, es sin duda alguna el trabajo de campo. Por lo tanto, es recomendable contar con información de campo para dos procesos principales, el primero para definir los campos de entrenamiento en el proceso de la clasificación y el segundo para verificar los resultados.

Las técnicas para obtener información del trabajo de campo son variadas conforme a los objetivos que se persiguen, para el caso de la percepción remota es importante considerar la unidad de muestreo en función de la resolución espacial y la escala cartográfica a trabajar, se recomienda considerar un grupo de píxeles de 3 x 3 para disminuir posibles errores de georreferencia (Chuvienco, 2002).

Se proponen diversas técnicas en la selección del método de muestreo, entre ellas se mencionan: aleatorio simple, aleatorio estratificado, sistemático, sistemático no alineado y por conglomerados (Chuvienco, 2002), cada uno de tiene ventajas y desventajas, como el tiempo necesario para cubrir los sitios de muestro

y el costo. La selección del método dependerá de cada objetivo y recursos con los que se cuentan.

Como se mencionó anteriormente la información de campo es necesaria para realizar la evaluación de los resultados, si bien es cierto que la evaluación puede ser elaborada con otras fuentes de información, como cartografía existente, la información de campo es necesaria, para estimar la exactitud de una clasificación, elaborando una matriz de confusión y utilizando diferentes pruebas estadísticas, como el estadístico de Kappa.

Hasta este momento se han presentado, en forma introductoria, las bases de la percepción remota y algunos métodos utilizados en el establecimiento de la misma en la Conabio, con el objetivo de dar sustento teórico a los programas desarrollados. En los dos siguiente capítulos se exponen los programas de puntos de calor y monitoreo de ecosistemas.

CAPÍTULO II

Implementación del programa de puntos de calor

II.1.- Importancia del fuego

El fuego es parte de la naturaleza y como parte de ella participa en el proceso de evolución, su comportamiento tiene efectos positivos y negativos. Positivos porque favorece el desarrollo de algunas especies biológicas, por ejemplo algunos tipos de pinos y negativos porque también es capaz de eliminar grandes extensiones de vegetación y contribuir a la extinción de especies.

II.1.1 El fuego y su importancia en la biodiversidad

Por mucho tiempo el fuego ha sido considerado como un elemento de la naturaleza con efectos negativos, por lo tanto, se ha buscado eliminarlo. Sin embargo con el desarrollo de la investigación y con mayor conocimiento de su comportamiento y contribución en la evolución de los ecosistemas, es necesario cambiar de etiqueta al fuego de gran depredador a colaborador.

Diversas investigaciones han arrojado como resultado que el fuego es un elemento clave en el desarrollo de muchos ecosistemas (Agee, 1993). El papel del fuego en los ecosistemas se puede resumir en tres categorías (Hardesty *et al.*, 2005; Myers, 2006):

- Ecosistemas independientes del fuego.- La participación del fuego en el desarrollo y evolución del ecosistema es prácticamente nula. Dentro de esta categoría entran aquellos ecosistemas que son demasiado fríos, húmedos o secos para quemarse. Por ejemplo: desiertos, tundra y bosque lluviosos (bosque mesófilo de montaña). La presencia del fuego se debe principalmente al desarrollo de las actividades productivas del hombre.
- Ecosistemas dependientes del fuego.- La presencia del fuego es esencial para su desarrollo; las condiciones de la vegetación facilitan la propagación del fuego. Dentro de estos ecosistemas existen especies dependientes del fuego o requieren de sus efectos para la reproducción. Estos ecosistemas tienen resistencia y capacidad de recuperación después de la presencia de fuego característico del ecosistema (The Nature Conservancy, 2004)

Algunos ejemplos de estos ecosistemas son: bosques y sabanas de pino, bosques de encino, bosques de coníferas, bosques de clima templado, bosques y pastizales dominados por encinos.

Sin embargo, la alteración del régimen y comportamiento del fuego modifica al ecosistema, lo que origina la pérdida de hábitats y especies.

- Ecosistemas sensibles al fuego, estos ecosistemas no requieren la presencia del fuego para su desarrollo y no presentan adaptación para ello, por lo tanto su recuperación es lenta. Las características de la vegetación no son inflamables, porque son áreas frescas o húmedas. La presencia del fuego es muy rara, por lo tanto son vulnerables al fuego y éste puede modificar la estructura del ecosistema. Algunos ejemplos de estos ecosistemas son: bosques latifoliados tropicales y subtropicales, bosques latifoliados y coníferas de zonas templadas en los ambientes más húmedos.

México al ser un país de grandes diferencias geográficas posee una gran diversidad de ecosistemas, desde los desiertos en la zona norte del país hasta los bosques fríos en los principales sistemas montañosos, así como bosques tropicales en la zona sur y sureste. Los ecosistemas presentes en México pueden ser clasificados en las tres categorías citadas por Myers (2006), dependiendo de sus características.

En la primera categoría el bosque mesófilo de montaña es el característico en México, este tipo de bosque no necesita el fuego para su reproducción, en cambio la presencia del fuego puede producir cambios negativos en la estructura, composición y riqueza florística del bosque (Asbjornsen & Gallardo 2004), principalmente cuando el fuego es introducido por el hombre.

En la categoría de ecosistemas dependientes de fuego, el bosque de pino (*Pinus hartwegii*) es incluido, éste ecosistema ha sido estudiado y se ha encontrado que el fuego contribuye a favorecer el contacto de las semillas con el suelo mineral, al eliminar barreras de vegetación como los zacatones, el suelo es enriquecido con más nutrientes, lo que favorece en el desarrollo de las plántulas (Rodríguez, 2006). Los incendios superficiales, históricamente eran muy frecuentes, las variaciones en la frecuencia contribuyeron al mantenimiento de la biodiversidad (Alvarado, 2006:181).

Finalmente en la última categoría ecosistemas sensibles al fuego, se integran las selvas. Sin embargo en los últimos años este tipo de vegetación se ha visto afectado por la presencia de huracanes, que han propiciado la abundancia de combustible muerto propenso a quemarse con la presencia del fuego.

En la tabla II.1 se aprecian algunos de los beneficios de la presencia del fuego en los principales ecosistemas de México.

Tabla II.1 Beneficios del fuego en la vegetación

TIPO DE VEGETACIÓN	BENEFICIOS
Bosque de clima templado y frío (bosque de pinos y bosque de encino)	Favorecen la apertura de conos y la emisión de semillas, controlan ciertas plagas, contribuyen a renovar el pastizal haciéndolo útil para el ganado, aunque este beneficio puede convertirse en daño si se permite el sobrepastoreo, abaten el material combustible reduciendo el riesgo de incendios forestales mayores
Selvas (selvas bajas, medianas y altas)	Mejoran la disponibilidad de nutrientes, favorecen la regeneración de ciertas especies
Vegetación de zonas áridas	Vuelven combustibles algunas especies para el ganado y la fauna silvestre, propician la reducción de algunas especies

Fuente: Comisión Nacional Forestal (2006)

II.1.1 El fuego como riesgo a la pérdida de la biodiversidad

El fuego es un elemento importante en la naturaleza, sin embargo éste se puede convertir en un gran depredador al pasar de fuego a incendio forestal. Para explicar esta situación recurrimos a las definiciones elaboradas por especialistas en el tema, que nos ayudaran a entender las diferencias y su actuación en la naturaleza.

Fuego.- Es el desprendimiento de calor y luz producido por la combustión de un cuerpo (Sosa *et al.*, 2000), en el caso que nos ocupa el cuerpo es la vegetación viva o muerta, a la que se le denomina combustible.

Incendio forestal.- Es la propagación libre y no programada del fuego sobre la vegetación en los bosques, selvas y zonas áridas y semiáridas; cuya ignición no estaba prevista, lo que obliga a realizar su extinción (CONAFOR, 2007). Es importante mencionar que no se considera a la superficie afectada como un elemento para la definición, por lo tanto, cualquier fuego descontrolado es considerado como incendio forestal, sin importar el área afectada.

Quema controlada.- proceso de aplicación del fuego en la vegetación que conjunta la utilización de métodos, equipos, herramientas y materiales para conducir y regular su magnitud y alcance, desde el inicio y hasta su conclusión o extinción. (Norma oficial mexicana NOM-015-SEMARNAT/SAGAR 1997 en CONAFOR, 2006).

Quema forestal o agropecuaria.- Quemadas que se realizan de manera controlada como última etapa del proceso de preparación de los terrenos en que tendrá lugar la siembra de cultivos o para inducir la regeneración o la formación de renuevos de vegetación, con fines forestales, agrícolas y ganaderos. (Norma oficial mexicana NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA 1997 en CONAFOR 2006)

Las definiciones antes presentadas indican el uso del fuego para fines económicos y para la regeneración de vegetación, así como su implicación en la afectación de la misma, por ende a la biodiversidad. Viendo la duplicidad de funciones, actualmente se ha introducido el concepto de manejo del fuego, el cual es definido como:

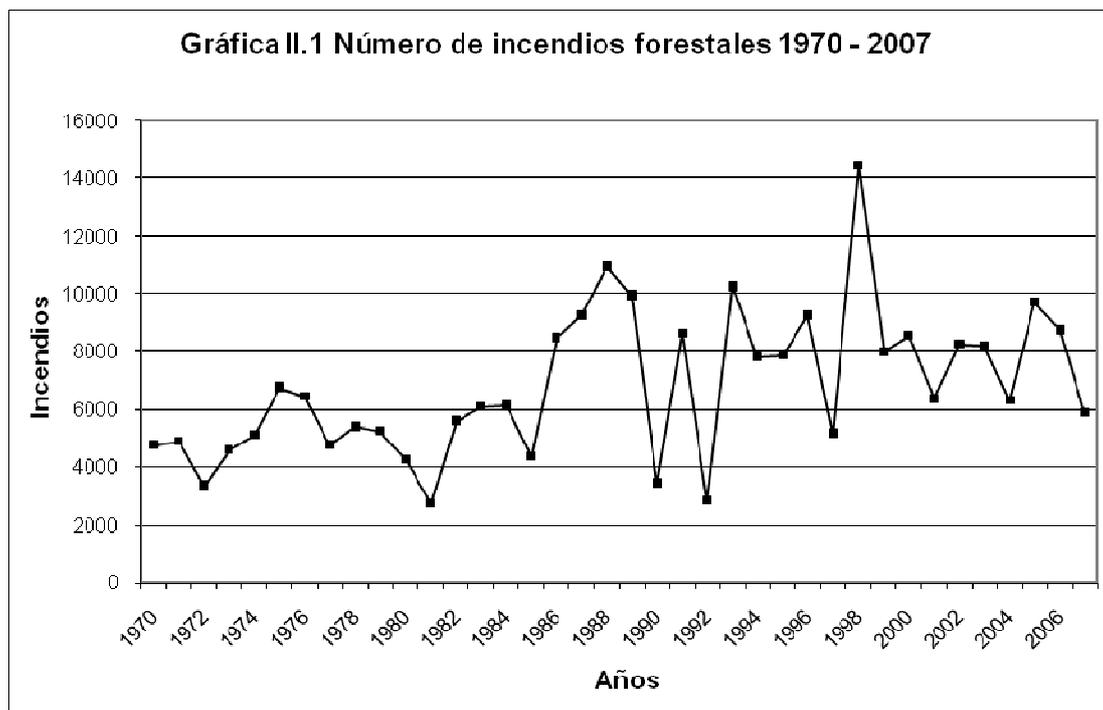
“Conjunto de acciones definidas dentro de un marco adaptativo, dirigidas a minimizar el impacto del fuego en los ecosistemas y otros bienes de la sociedad donde no es deseado, así como a mantener y restaurar su incidencia dentro de los rangos apegados a su rol natural (régimen natural) y a ser usado apropiadamente en donde los sistemas productivos lo requieran” (propuesta por The Nature Conservancy).

Dentro de esta definición se maneja el concepto de régimen del fuego, que se refiere al conjunto de condiciones del fuego característico de un ecosistema estas condiciones son: (Pantoja, 2007; Myers, 2006),

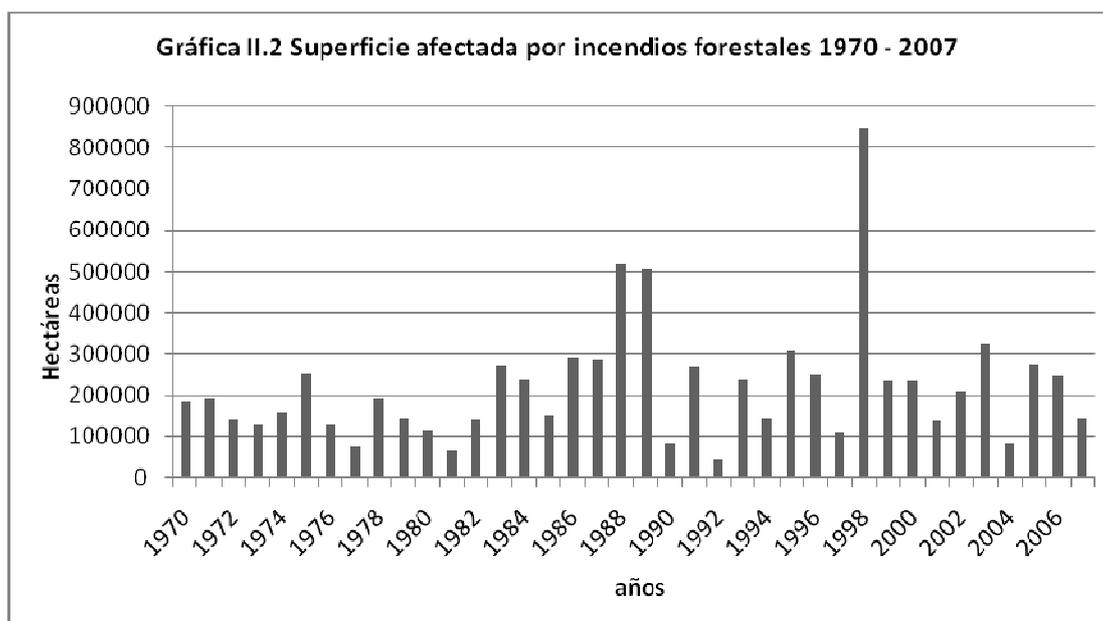
- Tipo de incendio.- Subterráneo, superficial o aéreo.
- Frecuencia.- Corresponde al tiempo de retorno en que se vuelve a registrar un incendio en el mismo sitio.
- Comportamiento de fuego.- Relacionado a la velocidad de propagación e intensidad.
- Severidad.- El impacto registrado en el medio natural (vegetación, fauna, suelos).
- Época.- Estación del año con relación a eventos meteorológicos
- Tamaño.- Extensión afectada por los incendios

En el manejo del fuego se considera como finalidad "minimizar el impacto del fuego en los ecosistemas", es decir no eliminarlo, pero si su impacto. Como parte de esta meta el combate de los incendios forestales es fundamental.

Los incendios forestales siempre han existido, sin embargo de 1970 a la fecha se ha registrado un incremento en la frecuencia, tamaño y severidad, como se puede observar en las gráficas II.1 y II.2



Fuente: CONAFOR 2005, 2008



Fuente: CONAFOR 2005, 2008

En este periodo de observación se distinguen dos grandes épocas:

- De 1970 a 1985, el número de incendios no sobrepasó los 6,500 y la superficie afectada no superó las 250,000 ha por año.
- De 1986 a 2007 el número de incendios sobrepasó los 6,000, con excepción de 3 años: 1990, 1992 y 1997 que registraron números muy semejantes a la época anterior. La superficie afectada en 3 ocasiones superó las 500,000 ha. Estos números muestran claramente que la segunda etapa ha presentado oscilaciones mayores.

El resultado indica una alteración en el régimen del fuego, a partir del año 1986, cuando inicia la segunda etapa, en la cual destacan los años de 1988 y 1998, años extremos en el número de incendios registrados 10,942 y 14,445 respectivamente y superficie afectada de 518,265 ha y 849,632 ha.

La alteración del régimen del fuego se ha visto favorecida por la participación del hombre al realizar cambios de uso del suelo, uso del fuego para abrir nuevos campos de cultivo, supresión del fuego, fragmentación de la vegetación, cambios en las prácticas de pastoreo, uso del fuego para la caza, favorecer o introducir especies exóticas o invasoras, crecimiento de zonas urbanas entre otros factores (Myers, 2006).

Las consecuencias de las alteraciones del régimen del fuego pueden ser observadas en las afectaciones en la cubierta vegetal, daños a la biodiversidad y afectación al equilibrio ecológico. Las afectaciones son directas e indirectas; directas porque elimina la cubierta vegetal, reducen las especies, favorece los procesos erosivos del suelo, disminuye la posibilidad de regeneración y elimina fauna; e indirectas porque elimina el hábitat de los organismos, así como la fuente de suministros de los alimentos.

En la tabla II.2 se presentan los posibles daños del fuego en los principales ecosistemas:

Tabla II.2 Daños del fuego en la vegetación

TIPO DE VEGETACIÓN	DAÑOS
Bosque de clima templado y frío (pinares y encinares)	Limitan o destruyen la regeneración natural, afectan el arbolado comercial y ocasionan pérdidas económicas, predisponen al arbolado adulto al ataque de plagas y de enfermedades, favorecen la invasión de especie no deseables, ocasionan daños severos a la capa de suelo superficial
Selva	Alteran la biodiversidad, destruyen especies comerciales y provocan daños económicos, dañan el suelo, favorecen el cambio de especies
Vegetación de zonas áridas	Ocasionan daños severos a la vegetación, reducen fuentes de trabajo de tipo recolección (orégano, lechuguilla, etcétera)

Fuente: CONAFOR, 2006

El año de 1998 fue para México uno de los peores años en incendios forestales, como se observa en las gráficas II.1 y II.2, provocando severos daños en áreas de importancia para la conservación de la biodiversidad.

La temporada de incendios de 1998, tuvo como origen las condiciones de sequía que se habían presentado desde el invierno de 1997 y el retraso de la temporada de lluvia de 1998, como consecuencia de la presencia del fenómeno climático de El Niño, considerado como uno de los más fuertes del siglo pasado (Manzo *et al.* 2004). También llamado El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (Magaña, 1999; González, 2008). Porque El Niño se encuentra relacionado con las variaciones periódicas de dos presiones atmosféricas la de Tahití, Polinesia francesa en el Pacífico central Ecuatorial y la de Darwin en el norte de Australia, llamada Oscilación del Sur (Álvarez *et al.*, 2001).

El ENOS es un fenómeno caracterizado por la presencia de anomalías en las condiciones de la temperatura del océano Pacífico tropical del este. Principalmente en las costas de América del sur. La temperatura de la superficie del mar registra 5 °C ó más de la media registrada entre 1950 –1979, en por lo menos seis meses consecutivos (Magaña, 1999). Este incremento de la temperatura esta asociado a la disminución de los vientos alisios del sureste, evitando el desplazamiento de la capa de agua superficial y el reemplazo de agua más fría del fondo, denominadas surgencias (Álvarez *et al.* 2001).

El aumento de la temperatura en el océano origina cambios en la circulación atmosférica; el agua caliente incrementa la temperatura de la atmósfera que tiene contacto con ella, generando fuertes precipitaciones, así como altas presiones anómalas a lo largo del ecuador (Álvarez *et al.*, 2001).

Los cambios en el océano originan anomalías climáticas en el comportamiento medio de la precipitación y de la temperatura en la parte continental. Existe un aumento en la precipitación en invierno y una disminución en verano. La temperatura aumenta debido a la disminución de la densidad de nubes lo que ocasiona una mayor incidencia de radiación en la superficie (Magaña 2004; González, 2008; Manzo *et al.*, 2004).

Uno de los parámetros geofísicos a considerar como un indicador de la presencia de El ENSO, además de la temperatura del mar, es la temperatura de la superficie de la tierra (LST, Land surface temperature), Manzo *et al.* (2004) muestran que el incrementó registrado en este parámetro durante El ENOS de 1997-1998, llega a ser hasta 5 °C más que en el mes de abril, en comparación con la temporada anterior 1996 –1997; en la región centro de México.

México se localiza en la Zona Intertropical del Pacífico, que en los años de El ENOS presenta un desplazamiento hacia el norte, quedando las costas mexicanas afectadas por los cambios generados por El ENOS.

En el año de 1997 la temporada de lluvias fue relativamente más alta que la media (CONAFOR, 2006), influenciada por la presencia de huracanes como Nora registrado en el mes de septiembre, Paulina en octubre y Rick en noviembre (SMN, 2008a), situación que originó la acumulación de biomasa, que se convertiría en combustible con la presencia de El ENOS. Debido al inicio tardío de la época de lluvias del año de 1998, recorrido de mayo hasta finales de junio (Palacio *et al.* 1999), influyendo en la disminución de la precipitación, principalmente de la parte sur de México. Así mismo por la elevación de la temperatura, casi en todo México la

máxima temperatura alcanzada en 1998 rebasó la máxima histórica del periodo de 1941-1997 en la época de estiaje (CONAFOR, 2006). El aumento de la temperatura de la superficie de la tierra durante El ENSO contribuyó en la vulnerabilidad de la vegetación (Manzo *et al*, 2004).

Como consecuencia la temporada de incendios forestales de 1998 fue el parte aguas en el combate de incendios forestales en México y se inicia una mayor participación institucional. Dentro de este marco la Conabio participa proporcionando información proveniente de imágenes de satélite para la prevención y combate de incendios forestales.

II.2. Técnicas utilizadas en la detección de incendios forestales

En México la institución responsable de coordinar el combate de incendios forestales es la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), institución que establece anualmente el Programa Nacional de Protección Contra Incendios Forestales y coordina al grupo intersecretarial que colabora en la prevención y combate de incendios. Una parte fundamental en este trabajo es la detección oportuna de un incendio, dentro de esta etapa la CONAFOR cuenta con diferentes formas de detección:

- Detección fija: incluyen las torres y puntos fijos de observación.
- Detección móvil: realización de recorridos de brigadas.
- Detección aérea: operación de aviones para la detección y recorridos aéreos.
- Detección satelital: ubicación y verificación de reportes de puntos de calor detectados por satélite.

En esta última forma, el programa para la detección de puntos de calor mediante técnicas de percepción remota participa proporcionando información oportuna.

La detección de los puntos de calor (posible incendio forestal) por medio de las imágenes de satélite tiene como antecedente la temporada de incendios forestales del año 1998.

En respuesta a la situación de emergencia en México, investigadores de diferentes instituciones mexicanas realizaron esfuerzos dirigidos a implementar algoritmos para la detección de incendios forestales utilizando imágenes de satélite. A continuación se citan algunos trabajos relacionados al tema:

Palacio *et al*. (1999).- Los autores realizan un análisis posterior a la emergencia, utilizando imágenes de satélite AVHRR recibidas en sistema de recepción de imágenes del Instituto de Geografía. Los autores mencionan la importancia de utilizar las imágenes nocturnas para la detección, con la finalidad evitar la saturación de la banda 3 en las áreas circunvecinas al punto de calor, así como evitar la reflexión solar.

Galindo, I. (2002).- La Universidad de Colima realizó la detección de incendios forestales utilizando imágenes de satélite AVHRR desde 1997 a 2003. La información generada de este sistema también fue utilizada por las instancias responsables de la prevención y control de incendios forestales.

Ortiz *et al.* (2003).- Los autores realizan un análisis de las áreas afectadas por el humo generado a partir de los incendios forestales utilizando imágenes AVHRR y GOES.

Manzo *et al.* (2004).- Realizan el análisis de los puntos de calor detectados con imágenes AVHRR y la temperatura de la superficie de la tierra. Los autores encontraron una relación directa que permite considerar a esta variable geofísica como un indicador en la definición de riesgo de incendios forestales.

Montero *et al.* (2004).-Implementaron un algoritmo contextual utilizando imágenes GOES-8 y GOES-12 para la detección de incendios forestales en el sureste Mexicano. Concluyendo que las imágenes GOES son útiles para el monitoreo por su alta resolución temporal (cada 30 minutos), esto permite dar un seguimiento a los incendios.

Servicio Meteorológico Nacional (2008b).- En 1998 el Ing. Ángel Terán desarrolla un método para la detección de incendios forestales utilizando imágenes de satélite GOES-12, con base a la identificación de las columnas de humo. El Servicio Meteorológico Nacional implementó el sistema de detección y seguimiento de incendios forestales. Posteriormente hace un convenio con la NASA para publicar los puntos de calor que dicha institución detecta.

La Conabio en 1998 realizó un análisis con imágenes de satélite DMSP-OLS (Defense Meteorological Satellite Program-Operational Linescan System) con el objetivo de identificar las áreas afectadas por los incendios forestales. La información de este análisis contribuyó a la definición de zonas que requerían atención inmediata en las cuales la Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) emprendió la campaña de restauración ecológica y contra el cambio de uso del suelo en áreas afectadas por incendios forestales.

Con base en esta experiencia se vio la oportunidad de obtener información de los satélites para la detección temprana de incendios forestales. Porque utilizando métodos convencionales de observación se dificulta la observación rápida y continua de todo el país, debido a la complejidad y extensión del territorio mexicano. Además de proporcionar información el mismo día que la imagen es registrada por el satélite.

De esta forma en el año de 1999 la Conabio implementó el programa para la detección de puntos de calor mediante técnicas de percepción remota, con el objetivo de proporcionar información para el combate de incendios forestales. Este programa se ha visto modificado y mejorado continuamente a lo largo de nueve años de operación, conforme a la disponibilidad de imágenes de satélite y revisión de métodos. Así como el surgimiento de nuevas tecnologías y productos que han hecho que el programa, año con año, incremente la generación información complementaria y disponible. Los resultados han sido distribuidos vía correo electrónico y publicados en la página WEB de la Conabio.

Para explicar la implementación del programa de puntos de calor es importante definir el concepto de punto de calor:

Un punto de calor es cualquier punto de la superficie terrestre que emita suficiente temperatura para ser registrada por el sensor a bordo de un satélite, esta temperatura debe cumplir con los umbrales establecidos para los tipos de imágenes utilizadas (en el caso de imágenes AVHRR nocturnas 25 °C, diurnas 38 °C y MODIS 47°C nocturnas y 87°C diurnas) así como las pruebas contextuales. Aunque no se tenga la certeza de ser un incendio forestal, sin embargo, esta información es útil para la identificación temprana de ellos.

Este concepto se asocia más a la intensidad de la temperatura que a la extensión del área que la está emitiendo, por ejemplo se han detectado pozos petroleros cuyas dimensiones son por debajo del tamaño del píxel de una imagen y sin embargo se detecta, por la cantidad de calor emitido.

De acuerdo con Chuvieco (2002), el proceso de detección en percepción remota consiste en conocer la presencia de un objeto o fenómeno que se requiere observar, en nuestro caso, el proceso de detección es utilizado para incendios forestales. Cuando se realiza este análisis se determina si el píxel cumple con los requisitos de temperatura y contexto, pero con este método no se sabe el número de incendios y tampoco el área afectada.

II.2.1 Programa con imágenes DMSP

Como se mencionó en el primer capítulo del presente informe, existen diversos tipos de imágenes de satélite, sin embargo para lograr el objetivo de evaluar los efectos de los incendios ocurridos en 1998 sobre la biodiversidad, fue necesario identificar las opciones de disponibilidad de las imágenes. En dicho momento en la página WEB del National Oceanic and Atmospheric Administration – National Geophysical Data Center (NOAA-NGDC) se encontró información sobre la detección de incendios forestales y se procedió a bajar los datos respectivos para México de 30 días; desde la segunda mitad del mes de mayo a la primera mitad del mes de junio. Posteriormente la Conabio solicitó al NOAA-NGDC las imágenes originales, principalmente de los meses de la temporada de incendios en México de febrero a junio.

Las imágenes utilizadas provenían de los satélites Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) utilizando el sensor Operational Linescan System (OLS), por lo tanto, son denominadas DMSP-OLS. Las imágenes son militares y administradas para fines civiles por el NOAA-NGDC en Boulder, Colorado. La Conabio recibió los datos en calidad de cortesía por parte del NOAA-NGDC. Las características de las imágenes se presentan en la tabla II.3.

Tabla II.3 Características de las imágenes DMSP-OLS

RESOLUCIÓN TEMPORAL	RESOLUCIÓN ESPACIAL	RESOLUCIÓN ESPECTRAL	RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA
Imágenes nocturnas 5:00 a.m	Fina 0.56 km Suavizada 2.8 km (promedio de 5 por 5 blocks de la resolución fina)	Banda 1: visibles e infrarrojo cercano (VNIR) (0.5 a 0.9 µm) La señal de la porción VIS es intensificada utilizando un tubo fotomultiplicador (photomultiplier tube (PMT)) Banda 2: Infrarrojo térmico (TIR) (10.3 – 12.9 µm)	8 bits 0 – 255 niveles digitales

Fuente: Elvidge *et al.*, 1997

Aprovechando la resolución espectral de las imágenes nocturnas, llamadas así porque son registradas a las 5:00 a.m. en ausencia de la influencia del sol, fueron utilizadas para la detección de incendios forestales. Porque tienen la capacidad de detectar niveles bajos de radiancia registrada en la región del visible e infrarrojo cercano (VNIR) durante la noche. En la región del visible es posible detectar nubes iluminadas por la luz de la luna, así como las luces provenientes de las ciudades, pueblos, industrias, flamas de gas y algunos eventos no periódicos como nubes iluminadas por relámpagos e incendios forestales. Esto último debido al uso de un tubo fotomultiplicador con el objetivo de identificar las fuentes de emisiones ligeras. Originalmente fue diseñado para la detección de las nubes nocturnas iluminadas por la luz de la luna (Elvidge *et al.*, 1997).

La información fue recibida en cintas de 8 mm como medio de almacenamiento. Las imágenes se encontraban en formato crudo nivel 0 e incluían el paso completo de la órbita de polo a polo (los satélites DMSP tienen una órbita helio-síncrona), por lo tanto, fue necesario realizar un pre-procesamiento, el cual consistió en los siguientes pasos:

- Desarrollo de un programa en C para transformar las imágenes digitales del sensor OLS a formato BIL (Band Interleave by Line), sin encabezado de imagen y registro (CONABIO, 1998).
- Localización, selección, recorte e inversión del área de interés. Las imágenes del satélite DMSP-OLS al pasar sobre México (a las 5:00 a.m) tienen un paso ascendente, el territorio mexicano es registrado en las imágenes de sur a norte, por lo tanto la posición de México se mostraba en forma inversa.
- Georreferencia utilizando como mínimo 100 puntos de referencia, para ello fue empleado el mapa de la división estatal de México con escala cartográfica de 1:1 000 000 y proyección Cónica Conforme de Lambert, utilizando los siguientes parámetros:

Elipsoide: Clark 1866
Datum: Norteamericano 1927
1er paralelo estándar: 17 30 00
2edo paralelo estándar: 29 30 00
Meridiano central: -102 00 00
Falso este: 2 000 000
Falso norte: 0

Estos parámetros permiten trabajar toda la República Mexicana, incluyendo la zona económica exclusiva, con datos positivos en metros.

La banda 1 VNIR registra la reflectancia de aquellos elementos que emiten gases o luces, como las ciudades, por lo tanto fue utilizada para detectar posibles incendios forestales, considerando que durante la noche no se realizan quemas agrícolas. Para ello fue aplicado un algoritmo de umbrales constantes (Jiménez, 2002) :

$$\text{Canal 1} > 45 \quad (1)$$

Donde:
Canal 1 = VNIR

45 = valor umbral establecido pero que no se transforma a ningún parámetro geofísico o biofísico (Jiménez, 2002). Este umbral se estableció en forma empírica, después de realizar varias pruebas con las imágenes recibidas.

Fue utilizada una máscara de luces estables elaborada por el Nacional Geophysical Data Center utilizando un análisis de serie de tiempo de las imágenes DMSP-OLS. Esta máscara contiene los sitios que emiten luces, gases y calor en forma constante como: ciudades, industrias, etcétera. Con la finalidad de ser eliminadas estas áreas del análisis. El compuesto original presenta porcentajes los cuales fueron recodificados en formato binario 0 y 1, donde 1 representa las áreas de luces constantes, mientras el 0 al resto del territorio.

Fueron recibidas 178 imágenes de las cuales se procesaron 146, que correspondieron a un total de 119 días, del periodo del 1 de febrero al 17 de junio de 1998.

Finalmente se generó un mapa con los puntos de calor detectados para el periodo antes citado, mostrando los polígonos que fueron conformados por los píxeles identificados, cada polígono tenía como atributos las fechas en las cuales fue detectado como punto de calor, facilitando de esta manera la información de duración o incidencia de la presencia de posible fuego.

Este mapa fue la base para realizar el estudio "Los incendios en México un diagnóstico de su efecto en la diversidad biológica". El resultado de este estudio se encuentra publicado en la página WEB de la CONABIO www.conabio.gob.mx

II.2.2 Programa con imágenes AVHRR

Para el año 1999 se estableció como meta proporcionar la información de los puntos de calor detectados el mismo día que fuese registrada la imagen por el satélite, para ello el uso de las imágenes DMSP-OLS no era lo más adecuado; porque dichas imágenes al ser de origen militar sólo podían ser distribuidas, para fines civiles, después de 3 días del registro. Por lo tanto fue necesario establecer un convenio con el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), quien contaba con un sistema de recepción de imágenes desde enero de 1996, para el abastecimiento de las imágenes del sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), a bordo de los satélites NOAA. El término "Very high resolution" se refiere a la alta resolución radiométrica (10 bits) (Kaufman & Justice, 1998). El instituto había realizado el análisis de los incendios forestales de 1998 utilizando las imágenes AVHRR.

El convenio se extendió hasta el año 2000, cuando la Conabio adquirió una estación de recepción de imágenes AVHRR de la compañía SmarTech, con la cooperación de otras instituciones, a fin de reducir el tiempo de respuesta para entrega de la información a las personas involucradas en el combate de incendios. Con esta estación se trabajó hasta el año 2003, porque a principios del año 2004 el sistema de recepción de la Conabio dejó de funcionar.

Durante el año de 1999, el proceso fue semi-automático y manual, se invertía hasta dos horas para la entrega de la información después de la recepción de la imagen, por tal motivo sólo se procesaron imágenes nocturnas y fue hasta el año

2000 cuando se estableció un proceso semi-automatizado mejorando la presentación y entrega de resultados. Al reducir el tiempo de procesamiento fue posible trabajar con imágenes nocturnas y diurnas.

El procedimiento se compone de cuatro etapas principales:

- Detección de los puntos de calor
- Caracterización del espacio geográfico del punto de calor
- Publicación de la información en la página WEB de la CONABIO
- Distribución de la información vía correo electrónico

II.2.2.1 Detección de los puntos de calor

1. Imágenes AVHRR

El Instituto de Geografía programó el envío de las imágenes AVHRR dos veces al día, vía FTP (File Transfer Protocol), el primer envío era a las 10:00 a.m. y el segundo a las 11:00 a.m, con el objeto de reducir los errores de envío.

Las imágenes AVHRR provenían del satélite NOAA14, sin embargo en ocasiones no fueron recibidas en la estación de recepción del Instituto de Geografía, por lo tanto eran sustituidas por las imágenes provenientes del satélite NOAA12. Las imágenes recibidas presentaban el nivel 1B, es decir estaban calibradas, corregidas radiométricamente y georreferenciadas con un proceso de navegación, utilizando los mismos parámetros de la proyección cartográfica empleada con las imágenes de satélite DMSP-OLS, como se citó anteriormente.

En la tabla II.4 se presentan las características de las imágenes AVHRR, utilizadas.

Tabla II.4 Características de las imágenes AVHRR

RESOLUCIÓN TEMPORAL Y HORA DEL PASO	RESOLUCIÓN ESPACIAL	RESOLUCIÓN ESPECTRAL	DENOMINACIÓN EN EL ALGORITMO	SATURACIÓN	RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA
Diaria Imágenes nocturnas del satélite NOAA14 entre las 4:00 y 6:00 hrs.	1.1 km	3 bandas b3= 3.55 - 3.93 Infrarrojo medio b4= 10.3 - 11.3 Infrarrojo térmico b5= 11.5 - 12.5 Infrarrojo térmico	TB ₃ TB ₄ TB ₅	47°C en las bandas 3, 4 y 5	10 bits 0 a 1023 niveles digitales
Imágenes diurnas NOAA14 entre las 15:00 y 18:00 hrs.	1.1 km	5 bandas b1= 0.5 - 0.68 Rojo Visibles b2= 0.725 - 1.10 Infrarrojo b3= 3.55 - 3.93 Infrarrojo medio b4= 10.3 - 11.3 Infrarrojo térmico b5= 11.5 - 12.5 Infrarrojo térmico	B ₁ B ₂ TB ₃ TB ₄ TB ₅	100% reflectancia en las bandas 1 y 2 47°C en las bandas 3 al 5	10 bits 0 a 1023 niveles digitales

B = Banda, TB = Temperatura de brillo

Fuente: Kaufman & Justice (1998), Chuvieco (2002); página WEB de NOAA-AVHRR

Las imágenes AVHRR tienen tres generaciones, en la primera generación las imágenes sólo presentan 4 bandas, el sensor iba a bordo de los satélites TIROS-N, lanzado en 1978 hasta el satélite NOAA-6. La segunda generación (AVHRR/2) a bordo de los satélites NOAA-7, lanzado en 1981, hasta NOAA14, las imágenes presentan 5 bandas, como se describe en la tabla II.4. Finalmente la tercera generación (AVHRR/3) con 6 bandas, a bordo de los satélites NOAA15, (lanzado en 1998), NOAA16, NOAA 17 y NOAA18.

Las diferencia entre la generación AVHRR/2 y AVHRR/3 es un cambio en la banda 3; en la última generación existe la banda 3A que cubre la región de los 1.58 a 1.64 μm (infrarrojo cercano) diseñado para el estudio de nieve y hielo y la banda 3B de 3.55 – 3.93 μm (infrarrojo medio térmico) diseñado para el estudio de la temperatura de la superficie. Estas dos bandas se intercambian, durante el día se utiliza la banda 3A y durante la noche la banda 3B, por tal motivo hasta el año 2003 fueron utilizadas las imágenes AVHRR provenientes de los satélite NOAA14 y NOAA12. En el año 2007 la Conabio recibe nuevamente las imágenes AVHRR directamente del satélite. A partir de febrero de 2008 son utilizadas sólo imágenes nocturnas para el programa de puntos de calor.

2. Algoritmo aplicado

En la detección de los puntos de calor es utilizado el algoritmo contextual diseñado por Prins y Menzel (1992), Flasse y Ceccato (1996). La Conabio realizó algunas adecuaciones a los umbrales establecidos. Las modificaciones fueron definidas empíricamente y bajo la observación diaria de los resultados por parte de las personas responsables del programa. El algoritmo y las adecuaciones se presentan a continuación:

a) Definición de píxel potencial

El primer paso es establecer el píxel potencial, éste se define al encontrar el incremento significativo de la temperatura de brillo en la banda 3 y en la diferencia en la respuesta de fuego en las bandas infrarrojo medio e infrarrojo térmico (Giglio *et al.* 2003). En el caso de las imágenes AVHRR los umbrales establecidos son:

Para imágenes nocturnas

$$TB_3 > 25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ y} \quad (2)$$

$$[TB_3 - TB_4] > 8 \quad (3)$$

Para imágenes diurnas

$$TB_3 > 38 \text{ }^\circ\text{C} \text{ y} \quad (4)$$

$$[TB_3 - TB_4] > 8 \quad (5)$$

La Conabio utiliza el umbral fijo para todo el país, porque dentro del procedimiento existe una etapa de control de calidad que se realiza en forma manual, un analista evalúa en forma visual los resultados obtenidos del algoritmo. Además al ser un algoritmo contextual se trata de identificar la respuesta

característica sin considerar el fuego en un sitio específico y de esta forma detectar fuego en diferentes ambientes (Flasse & Ceccato, 1996; Giglio *et al.*, 2003).

El primer umbral del algoritmo (2) y (4) es bajo para no eliminar los incendios potenciales en regiones más frías. El segundo umbral (3) y (5) es suficientemente alto para eliminar los píxeles que no son incendios, por ejemplo píxeles con valores altos de temperatura de brillo en ambos canales 3 y 4 (Flasse & Ceccato, 1996).

b) Eliminación de píxeles influenciados por el reflejo directo del sol

En el caso de las imágenes diurnas es necesario aplicar una prueba para eliminar todos los píxeles influenciados por la alta reflectancia en la banda 3, debido a la reflexión de la luz solar en la superficie (sun glint), principalmente en zonas de desierto y en los bordes de los cuerpos de agua. El algoritmo original establece una prueba basada en la reflectancia registrada en la banda 2. La Conabio introdujo dos modificaciones, la primera el porcentaje de albedo en la B_2 pasa de ser un umbral fijo a estacional, el valor puede variar entre 12 y 18 %, dependiendo de la posición del sol respecto al satélite. La segunda considera la suma de la reflectancia en la banda 1 y banda 2.

$$B_2 < 18 \% \text{ y } B_1 + B_2 < 13\% \quad (6)$$

c) Detección de nubes

Las áreas cubiertas por nubes no son posibles de analizar en la detección de puntos de calor y en algunas ocasiones el reflejo directo del sol (sun glint) en las orillas de las nubes puede ser detectado como punto de calor, por lo tanto es necesario identificar las nubes para eliminar estas áreas en el proceso de la detección, para ello se utilizan las siguientes condiciones:

Imágenes nocturnas

$$TB_5 < -1 \text{ }^\circ\text{C} \text{ y} \quad (7)$$

$$TB_3 < 25 \text{ }^\circ\text{C} \quad (8)$$

Imágenes diurnas

$$B_1 + B_2 > 60\% \quad \text{ó} \quad (9)$$

$$TB_5 < 4 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{ó} \quad (10)$$

$$[B_1 + B_2 > 40\% \text{ y } TB_5 < 7 \text{ }^\circ\text{C}] \quad (11)$$

d) Prueba contextual

Como parte del algoritmo se aplica una prueba contextual para caracterizar la respuesta espectral en ausencia del punto de calor y se compara el píxel potencial con los píxeles vecinos inmediatos, primero para caracterizar la respuesta espectral en ausencia del fuego y compararla con la respuesta de los píxeles potenciales. Si hay una diferencia considerable entre estas respuestas se considera como punto de calor (Flasse & Ceccato, 1996). Esta prueba es aplicada cuando son utilizadas imágenes diurnas para evitar la confusión de las áreas que reportan altas

temperaturas como los desiertos. Se establece una ventana de 3 x 3 píxeles. El centro de la ventana corresponde al píxel candidato. La ventana va creciendo hasta 15x15 píxeles, si al menos el 25 % de los píxeles en la ventana son calificados como validos. Serán píxeles válidos aquellos píxeles que no son agua, nubes y píxeles potenciales (Jiménez, 2002). Establecido el entorno válido (ev) se procede a calcular las siguientes estadísticas:

Media de TB_3 en el entorno válido = TB_{3ev}

Desviación estándar de TB_3 en el entorno válido = sTB_{3ev}

Media de la diferencia de $[TB_3 - TB_4]$ en el entorno válido = $TB_{3-4 ev}$

Desviación estándar de $[TB_3 - TB_4]$ en el entorno válido = $sTB_{3-4 ev}$

e) Selección de punto de calor

Un píxel potencial será punto de calor si cumple con las siguientes condiciones:

Imágenes nocturnas

Píxeles que cumplan con los umbrales de las pruebas de las ecuaciones 2 y 3.

Imágenes Diurnas

Píxeles que cumplan con las siguientes pruebas

$$[TB_3 - TB_4] > \max \{TB_{3ev} + 2(sTB_{3-4ev}) + 3^{\circ}C\} \quad y \quad (12)$$

$$TB_3 > TB_{3ev} + 2(sTB_{3ev}) + 3^{\circ}C \quad (13)$$

Si la relación (25% de píxeles válidos) de entorno no se cumple, se decide que el píxel candidato no es un incendio (Jiménez, 2002).

f) Eliminación de puntos de calor falsos

Como parte del algoritmo se utilizan mapas temáticos con áreas definidas como *no posible a incendiarse*, porque no existe vegetación que pueda ser considerada como combustible, con el objetivo de eliminar falsas alarmas. Los temas utilizados son:

- *Cuerpos de agua*: es un mapa binario, donde 1 es tierra y 0 es agua, el algoritmo se calcula sólo donde se presenta el valor 1.
- *Luces estables*: el objetivo es la detección de incendios forestales, por tal motivo se eliminan del análisis las zonas urbanas e industriales, así como puntos estables proporcionados por los usuarios como pozos petroleros y minas. El mapa de luces estables es un mapa binario, donde 1 es luz estable y 0 el resto del territorio, por lo tanto si el punto de calor se localiza en el valor 1, es considerado como falso.
- *Áreas de escaso combustible*: elaborado con el mapa de vegetación y uso del suelo, seleccionadas aquellas clases denominadas como: sin vegetación aparente, dunas costeras, y desiertos arenosos, estas clases fueron confirmadas con un análisis de la distribución del índice de vegetación NDVI (Normalize Differential Vegetation Index), obtenido de las imágenes AVHRR

del año 2001. Los puntos de calor localizados en estas áreas se consideran como falsos.

g) Control de calidad

Una vez definidos los puntos de calor, fue necesario establecer una etapa de control de calidad, para ello se utiliza la imagen original y los puntos de calor detectados, se eliminan aquellos puntos de calor que cumplan los siguientes criterios:

- La distribución de los píxeles es uniforme en líneas continuas y si la imagen original presenta líneas de ruido.
- Píxeles en la línea de costa, en muchas ocasiones son detectados como puntos de calor al influir el reflejo directo del sol.
- Píxeles cercanos a las nubes que cumplan con los siguientes parámetros:
 - Valores bajos en la banda 3 < 20 °C
 - La diferencia entre la banda 3 y 4 = 10 °C
 - Valores de la banda 5 $< a 5$ °C

2. Adecuaciones estacionales en las pruebas del algoritmo

A lo largo del año fue necesario adecuar los umbrales utilizados en el algoritmo debido a los cambios estacionales propios del ambiente; el correr diariamente el programa permitió identificar empíricamente los umbrales necesarios para México, conforme la temperatura incrementa en el año.

El umbral modificado fue el establecido para las imágenes diurnas, principalmente en los meses de abril y mayo, cuando aún se registran incendios y hay la presencia de humo generado por prácticas agropecuarias; bajo estas condiciones el algoritmo subestima la detección de puntos de calor.

Los criterios utilizados para las adecuaciones temporales fueron los siguientes:

Es preferible que el algoritmo tenga error de comisión que de omisión y tratar de evitar la eliminación de posibles incendios. Por lo tanto es preferible mantener el valor del umbral bajo.

Mantener el valor de la resta de $TB_3 - TB_4 > 8$; si el valor es demasiado alto se puede excluir pequeños incendios. Si el valor es demasiado pequeño puede excluir grandes incendios. Esto porque se compara la respuesta del incendio en la banda del infrarrojo medio y la banda del infrarrojo térmico; entre más fuerte es el incendio es más alta la respuesta en la banda del infrarrojo térmico.

En el caso de México la prueba para eliminar el "sun glint", el umbral puede variar entre 12 a 18 %, en función de la posición del sol. El porcentaje 18 es utilizado durante verano. La prueba introducida por la Conabio $B_1+B_2 < 13\%$, se ha adecuado utilizado los siguientes umbrales: 25 %, 18%, 14%.

En la máscara de nubes es preferible el error de comisión que de omisión, se pretende evitar la eliminación de posibles incendios, debido a que en las márgenes de nubes pueden crear detecciones falsas.

En la ecuación 9: $B_1 + B_2 > 60\%$ también se utilizan los valores de 50%

No cambiar los valores de la ecuación 10: $TB_5 < 4\text{ }^\circ\text{C}$

En la ecuación 11: en la primera parte $B_1 + B_2 > 40\%$ se ha utilizado valores de 30%, 45%, 80% y en la segunda $TB_5 < 12\text{ }^\circ\text{C}$ se ha utilizado $7\text{ }^\circ\text{C}$, pero es recomendable no cambiarlo, porque se desea detectar nubes a nivel de píxel que tienen influencia del suelo.

Los cambios realizados fueron los siguientes

- En abril 2003, con el objetivo de detectar incendios bajo la bruma se utilizó:
 $B_2 < 14\%$ (en lugar de 18%)
- En junio ya existía una sobre estimación de puntos de calor, en número y píxeles que rodean a otros puntos de calor. Por lo tanto, los valores de las siguientes ecuaciones fueron adecuados:

$B_1 + B_2 < 13\%$ (en lugar de 15%)

$B_2 < 14\%$ se regresa a $< 18\%$

II.2.2.2 Caracterización del espacio geográfico del punto de calor

Con el objetivo de conocer las características del espacio geográfico en la cual se localizan los puntos de calor detectados, se estableció el segundo procedimiento, donde se utilizan herramientas de sistemas de información geográfica.

1. Información de referencia

Fue seleccionada información geográfica que permitiera identificar y caracterizar el sitio en el cual se detectaba un punto de calor (división política (estado y municipio), tipo de vegetación, áreas naturales protegidas). Se identificaron los mapas temáticos a utilizar y estos pasaron por un proceso de preparación en el cual se incluye las etapas de:

- Unificación de proyección cartográfica.
- Reclasificación de las clases originales de los mapas a categorías de importancia para el programa.
- Cambio de formato de vector a raster con tamaño de celda conforme a la resolución espacial de la imagen utilizada (1.1 km para imágenes AVHRR y 1 km para imágenes MODIS).
- Establecimiento de la misma extensión del mapa cubriendo exactamente la misma área espacial.

Este proceso se realiza cada vez que se introduce un nuevo tema al programa o es actualizada la cartografía.

Una vez que la cartografía se encuentra preparada se introduce al programa para que se realice la sobreposición de los mapas con el objeto de extraer la información para caracterizar el sitio. La sobreposición se realiza con los puntos de calor detectados con cada una de las imágenes de satélite analizadas.

En 1999 todo el proceso fue realizado en el programa de Arc/info en formato vector por medio de la función identity, ésta es una operación de sobreposición que permite adicionar la información de la cartografía temática a los puntos de calor. Sin embargo a partir del año 2000, la sobreposición y obtención de la información se realizó en formato raster utilizando el programa IDL (Interactive Data Language), ésto permitió agilizar el proceso y reducir el tiempo de procesamiento. Actualmente se utiliza el software libre GRASS (Geographic Resources Analysis Support System).

La información para caracterizar el sitio es la siguiente:

- **Coordenadas geográficas.-** En un inicio (1999) se tomó como base la coordenada central del polígono generado por él o los píxeles detectados como puntos de calor. A partir del año 2000 fue posible la obtención de las coordenadas de cada píxel, al utilizar el software IDL.
- **Número de píxeles asociados.-** Si los píxeles se encuentran contiguos estos son asignados a un solo conglomerado, esta información es útil para proporcionar una idea general de la dimensión de la posible área afectada. Cada conglomerado recibe un número consecutivo denominado índice, que es utilizado como identificador, proporcionando las coordenadas de cada píxel.
- **Localización administrativa.-** Se identifica la entidad federativa y el municipio en el cual se localiza el punto de calor, utilizando la cartografía de división estatal escala 1: 1 000 000 y la división municipal escala 1: 250 000.
- **Tipo de vegetación y uso del suelo.-** Se utiliza la cartografía generada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, serie II, escala 1: 1 000 000. Esta variable es fundamental para iniciar la definición si es un incendio o una quema agrícola, basándose sobre el tipo de uso del suelo o vegetación. Como complemento a esta definición se asocia una variable más la susceptibilidad de la vegetación natural a los incendios. En 1998 se realizó el taller de consulta y validación de la información dentro del marco del programa "Los incendios de México: diagnóstico de su efecto en la diversidad biológica" CONABIO 1998, los expertos reunidos en este taller definieron 6 categorías:

Categoría 1. No importa.- áreas altamente transformadas por el hombre (ciudades, agricultura, praderas inducidas, etc.).

Categoría 2. Baja probabilidad de incendio con alta recuperabilidad.- rara vez se quema y si se quema se recupera fácilmente.

Categoría 3. Baja probabilidad de incendio con baja recuperabilidad.- rara vez se quema pero su recuperación es difícil.

Categoría 4. Alta probabilidad de incendio con alta recuperabilidad.- Se quema frecuentemente y se recupera rápidamente.

Categoría 5. Alta probabilidad de incendio con baja recuperabilidad.- Se quema frecuentemente y su recuperación es difícil.

Categoría 6. Otros

El mapa de vegetación y uso del suelo fue reclasificado en estas seis categorías (Ocaña & Díaz 1999), para seleccionar e identificar aquellos puntos de calor que se ubicaran en las categorías 3 y 4, porque si ocurriesen incendios en dichos tipos de vegetación el riesgo de perder biodiversidad es alto. Por lo tanto se proporciona una herramienta para jerarquizar la atención de incendios forestales.

- Áreas Naturales Protegidas (ANP).- Esta variable es importante para priorizar el combate de incendios, si éste ocurre en una ANP, tiene mayor prioridad, para ello se utiliza el mapa de ANP proporcionado por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas CONANP, a cada una de las ANP se definió un área de influencia de 5 km, pensando que en muchas ocasiones los incendios ocurren en el límite de la ANP y que puede ser una amenaza. De esta forma se cuenta con 3 categorías principales:
 - Nombre del ANP.- Si el punto de calor se localiza dentro del polígono definido como tal, por lo tanto se proporciona el nombre correspondiente.
 - Cerca de una ANP.- Si el punto de calor se localiza dentro del área de influencia.
 - No afecta.- Corresponde a que el punto de calor no está ni dentro de una ANP y tampoco cerca, por lo tanto no se considera como amenaza para ANP.

Para la temporada de incendios 2008, se ha actualizado el mapa de ANP con la versión de mayo de 2007. Sin embargo es necesario trabajar más en la edición de este mapa, debido a que existen algunos problemas de sobreposición en los límites de algunas ANP.

- Pendiente.- Considerando que una variable importante en la propagación de los incendios forestales es la inclinación del terreno, se determinó que dicha información era importante para priorizar el combate. La relación es directa a mayor pendiente mayor velocidad de propagación (comunicación personal de CONAFOR). La fuente de información es el Modelo Digital del Terreno (MDT) de 90 metros de resolución, elaborado por el INEGI, utilizando como base las cartas topográficas escala 1:250 000. A partir de este MDT fue calculado el mapa de pendientes en porcentaje.

2. Información en formato de polígono

Los puntos de calor se entregan en formato de puntos y polígonos, en coordenadas geográficas con datum Norteamericano 1927 y elipsoide Clark 1866. Tratando de conservar los polígonos que forman los píxeles definidos como puntos de calor.

Debido a que no se tiene la certeza si hay una fuente de calor o varias fuentes en un píxel y en que parte del píxel se encuentra localizado. Además proporciona una visión espacial bidimensional que provee una idea general de la posible área afectada. En el caso de los conglomerados (píxeles contiguos, unidos por un lado) conforman un solo polígono, por tal motivo en ocasiones el número de polígonos puede ser menor al número de los puntos registrados.

Con los polígonos diarios se generan compuestos mensuales y anuales, donde cada polígono tiene como atributos la o las fechas en la que fue detectado, así como la suma de las veces que fue detectado. De esta forma se tiene la información de las zonas que presentan mayor presencia de puntos de calor a lo largo del año y a lo largo del periodo analizado, desde 1999 a la fecha. Para este procedimiento aún se utiliza el programa Arc/Info.

II.2.2.3 Presentación de la información en la página WEB de la Conabio

En 1999 se tomó la decisión de generar una página WEB de la Conabio en la cual se publicara la información. En un principio el acceso era restringido, sólo personas autorizadas que trabajaban directamente en el combate de incendios, tenían acceso a ella. Esta situación cambió a partir del año 2000, cuando se abre la página WEB a todo el público.

Se inició la publicación el día 5 de mayo de 1999, manteniéndose hasta el día 15 de julio, cuando la temporada de lluvia había iniciado; como un compromiso con el Centro Nacional de Prevención y Combate de Incendios de la SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). A partir del año 2004 a petición de los usuarios el programa, principalmente de la CONAFOR, se encuentra activo todo el año.

La página WEB ha sufrido modificaciones a lo largo de los nueve años de operación, con la finalidad de proporcionar información útil para conocer la ubicación de los puntos de calor, las características geográficas del sitio e información para poder priorizar la atención. Esta evolución ha sido lograda gracias a la participación de los usuarios.

Actualmente la página consta de las siguientes partes como se muestra en la figura II.1.

A) Vista rápida de la imagen analizada. Se muestra el cubrimiento de la imagen, ya que el diseño de los sensores no permite observar en una sola imagen toda la república Mexicana. Así mismo proporciona la distribución de la nubosidad presente en el momento, debido a que son imágenes ópticas, existe el obstáculo de no poder ver debajo de las nubes por lo tanto detectar los incendios. Junto con la vista rápida se proporcionan datos numéricos sobre el porcentaje del área cubierta por la imagen y el porcentaje de nubosidad.

B) Definición de *punto de calor*. - Se proporciona el concepto de punto de calor

Fecha: 01/09/05 pasol agua
 Hora GMT: 19:37
 Hora local (México, D.F.): 13:37

Área

- México
- Estados Unidos

Punto de calor
 Se considera como punto de calor al elemento espacial mínimo de la imagen (píxel) que reporta una temperatura elevada. Para las imágenes diurnas la temperatura mínima considerada es de 42 C y para las imágenes nocturnas es de 25 C.

Índice de propagación de incendios
 Indica el riesgo de propagación de incendios forestales. Se basa exclusivamente en el vigor de la vegetación, cuanto más cerca está la vegetación, más espacio se podrá extender el posible fuego (incendio). Los valores para el índice son:
 Bajo -> Normal -> Alto -> Muy alto
 NA (No aplica) se refiere al agua, vegetación no arbolada y los usos de suelo mostrados en gris.
 ND (No disponible) indica que no hubo información para generar el índice.

Índice de vegetación
 Los valores del índice van de -1 a 1, entre más cercano al valor 1 la vegetación presenta mayor vigor. Los índices de vegetación son utilizados para conocer el comportamiento de la vegetación tanto espacial como temporal.

Nubosidad en la escena: 16%
Nubosidad sobre el país: 22%
Datos nulos en la escena: 31%
Datos nulos sobre el país: 0%

Riesgo de propagación de incendios forestales del 20 al 31 de Julio

- no arbolado
- riesgo bajo
- riesgo normal
- riesgo alto
- riesgo muy alto
- sin información

México

F Shapefile de puntos de calor
G Imagen de puntos de calor
D Índice de vegetación
H Mapas Dinámicos

K Vegetación con alta susceptibilidad de incendios

I

Índice	Total de píxeles	Longitud	Latitud	Tipo de Vegetación	Municipio/Estado	Áreas naturales protegidas	Pendiente	Índice de propagación
1	1	-99 11 19	19 37 26	Zona urbana	Cuatitlan, Edo. de Mexico	NO AFECTA	0°	NA
2	1	-99 13 4	19 35 50	Área agrícola de temporal	Cuatitlan Izcalli, Edo. de Mexico	NO AFECTA	0°	NA
3	1	-97 54 32	24 57 39	Matorral espinoso tamaulipeco con vegetación secundaria arbustiva	San Fernando, Tamaulipas	NO AFECTA	0°	NA

J

SUSCEPTIBILIDAD A LOS INCENDIOS DE LA VEGETACIÓN NATURAL
 La vulnerabilidad de los ecosistemas a los incendios forestales depende de la combinación de factores que los generan. En este estudio se ha considerado el tipo de vegetación, el tipo de suelo, la pendiente, la exposición, la humedad, la proximidad a las carreteras y a las zonas urbanas, entre otros. Este estudio se realizó con el propósito de determinar la susceptibilidad de los ecosistemas a los incendios forestales.

Categorías de susceptibilidad a los incendios de las comunidades vegetales

Categoría	Vegetación	Suelo	Pendiente	Exposición	Humedad	Proximidad a carreteras	Proximidad a zonas urbanas
1. No riesgos	Agropecuaria de temporal						
2. Baja susceptibilidad de incendios con alta resiliencia	Matorral espinoso						
3. Alta susceptibilidad de incendios con alta resiliencia	Matorral espinoso						

Nota: Para obtener puntos de calor sobre un Modelo Digital del Terreno y Vegetación, seleccionar el número en la columna "Índice". Los siguientes usos de suelo se muestran en gris: agricultura, área sin vegetación, cuerpos de agua, pastizal cultivado e inducido.

Figura II.1 Información disponible en la página WEB

C) Explicación del índice de vegetación.- Los valores del índice van de -1 a 1, entre más cercano al valor 1 la vegetación presenta mayor vigor. Los índices de vegetación son utilizados para conocer el comportamiento de la vegetación tanto espacial como temporal.

D) Distribución de los puntos de calor sobre el índice de vegetación NDVI calculado con la misma imagen de satélite. Este procedimiento se realiza con imágenes MODIS.

E) Índice de propagación.- Muestra el mapa calculado con la información de los últimos 10 días. Este procedimiento se realiza con imágenes MODIS y se explicará más adelante.

F) Opción para obtener los puntos de calor en formato shapefile, tanto en forma de polígonos como de puntos. Se consideró que este último formato era útil para la ubicación rápida de los puntos de calor en un sistema de información geográfica comercial.

G) Vista rápida de la distribución de los puntos de calor.- Se muestra un mapa con la distribución geográfica de los puntos de calor en México detectados con la imagen.

H) Acceso a la sección de mapas dinámicos.- Mediante el cual el usuario puede realizar búsquedas y consultas en forma dinámica, con los puntos de calor y cartografía digital de referencia, con diferentes formatos, tanto de vector (polígonos, líneas y puntos) como de raster, esta sección se ha desarrollado sobre el programa ArcIMS.

La cartografía utilizada en esta sección pasó por un proceso de generalización cartográfica, siguiendo los pasos descritos por Navarro (2004):

- Selección.- Fue seleccionada la cartografía con la información más importante conforme a las necesidades de los usuarios.
- Simplificación.- Se determinaron las características conforme a la escala establecida (área mínima cartografiable, tamaño de celda en el caso de los mapas en formato raster) y los requerimientos de los usuarios.
- Clasificación.- Los mapas pasaron por un proceso de reclasificación de acuerdo a las necesidades del combate de incendios.
- Simbolización.- Fue definida la simbología que mejor expresara los elementos a representar, principalmente para el formato vector y colores para el formato raster.
- Inducción.- Exponer la cartografía lo más simplificada posible, para agilizar el despliegue de la información, pero que facilita realizar inferencias entre los puntos de calor y el espacio geográfico en el cual se localizan.

La cartografía expuesta en la sección de mapas dinámicos es:

- División política (estatal y municipal).
- Cabeceras municipales.
- Carreteras principales.

- Vegetación potencial (elaborada por el INEGI).
- Imagen de satélite con un modelo digital del terreno que proporciona información sobre la distribución de la vegetación y sistemas montañosos.
- Mapa de vegetación y uso del suelo, agrupado en 14 categorías, con la finalidad de reducir el número de clases que maneja el mapa de vegetación y uso del suelo y facilitar la interpretación visual:
 - Bosque conservado
 - Bosque fragmentado
 - Selva conservada
 - Selva fragmentada
 - Matorral conservado
 - Matorral fragmentado
 - Pastizal natural conservado
 - Pastizal natural fragmentado
 - Agricultura y pastizales inducidos o cultivados
 - Vegetación acuática, manglar
 - Zonas sin vegetación aparente

La categoría conservada se refiere a las áreas de vegetación que no presentan vegetación secundaria, actividad agrícola o pecuaria, por ejemplo bosque de encino –pino, selva baja caducifolia.

La categoría fragmentada se refiere a áreas de vegetación con asociaciones de vegetación secundaria, agricultura o pastizal cultivado o inducido, por ejemplo bosque de encino – pino con vegetación secundaria.

I) Tabla con el contenido de la caracterización geográfica del sitio donde se localizan los puntos de calor, la cual puede ser ordenada por el nombre de la entidad federativa, municipio, por tipo de vegetación, o por ANP, para facilitar la búsqueda. En el rubro tipo de vegetación y uso del suelo, las categorías: agricultura, pastizal inducido o cultivado se muestran en color gris, para facilitar la búsqueda de información al sector forestal, sin embargo es importante conservarlos para el sector agrícola por la actividad de quema agrícola. Por otra parte los volcanes activos como: volcán Popocatepetl, volcán de Colima y el Chichonal o Chichón son caracterizados con una figura de Volcán, a solicitud de protección civil.

j) Vista rápida de la localización de los puntos de calor con dos imágenes, la primera muestra los puntos de calor sobre un MDT y la segunda sobre la vegetación agrupada combinada con el MDT. En ambos casos se despliega información complementaria como la división municipal y principales carreteras, esta vista rápida proporciona información espacial para conocer la accesibilidad al sitio donde fue detectado un punto de calor.

k) Son marcados con una **X** aquellos puntos de calor que se encuentran en los tipos de clases 3 y 4 del mapa de Susceptibilidad a los incendios de la vegetación natural.

II.2.2.4 Distribución de la información vía correo electrónico

En los primeros años de desarrollo del programa nos enfrentamos a limitaciones tecnológicas por parte de los usuarios, no se contaba con acceso a la página WEB de la Conabio, los procesadores de las computadoras no eran suficientemente rápidos para desplegar la información gráfica a una velocidad adecuada. Por lo tanto se estableció el envío de la información por vía correo electrónico en formato ASCII (American Standard Code for Information Interchange), para su fácil acceso por parte de los usuarios. En 1999 la información sólo era recibida por personal involucrado en el combate de incendios del Centro Nacional de Incendios, sin embargo a partir del año 2000 la lista de usuarios incrementó involucrando a diferentes usuarios en el interior de la república, principalmente de la SEMARNAP y Secretarías de Ecología de los Gobiernos Estatales.

Año con año la lista es depurada y se ha incrementado notablemente. Para el año 2007 se estableció que los propios usuarios a partir de la página WEB pudieran solicitar ser inscritos a la lista de correos que reciben la información. Actualmente se cuenta 544 correos electrónicos, pertenecientes a diferentes instituciones como CONAFOR; SEMARNAT, SAGARPA, CONANP, Organizaciones no gubernamentales (ONG) y estudiantes.

II.2.3 Programa con imágenes MODIS

Las imágenes AVHRR fueron diseñadas para fines de investigación meteorológica, sin embargo han sido útiles en la detección de incendios forestales (Flasse & Ceccato, 1996; Kaufman & Justice, 1998).

El 18 de diciembre de 1999 fue lanzado el satélite Terra, por Estados Unidos, que lleva a bordo entre otros sensores, el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), mismo que está diseñado para la investigación de tres de las principales esferas de la Tierra: atmósfera, hidrosfera y litosfera.

En esta última es donde el interés de la Conabio se ha centrado principalmente en el monitoreo de ecosistemas y en la detección de incendios forestales.

En octubre del año 2001 la Conabio adquiere, con el apoyo del FONDEN (Fondo Nacional para Desastres Naturales) y de la SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca), un sistema de recepción de imágenes de satélite MODIS, con la finalidad de contar con las imágenes en tiempo real y colaborar en la emergencia de desastres naturales.

II.2.3.1 Detección de puntos de calor con imágenes MODIS

1. Imágenes utilizadas

Las imágenes MODIS provienen de los satélites Terra y Aqua (lanzados en el 4 de mayo de 2002), son recibidas en la Conabio diariamente, en el mejor de los casos son recibidas hasta 8 imágenes al día, cuatro nocturnas y cuatro diurnas, en la siguiente tabla se muestran las principales características.

Tabla II.5 Características de las imágenes MODIS

RESOLUCIÓN TEMPORAL Y HORA DEL PASO EN MÉXICO	RESOLUCIÓN ESPACIAL	RESOLUCIÓN ESPECTRAL	RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA
Diaria Imágenes nocturnas satélite: Terra Aqua	3 bandas de 500 metros 22 bandas de 1000 metros	Cubre regiones del infrarrojo (IRC e SWIR) 5 bandas cubren el infrarrojo cercano (IRC)(0.743 – 0.965) 11 bandas cubren el infrarrojo medio (IRM) 3.660 – 9.880) 6 infrarrojo térmico (10.780 – 14.385	12 bits 0 – 4095 niveles digitales
Diaria Imágenes diurnas Satélite: Terra Aqua:	2 bandas de 250 metros 5 bandas de 500 metros 29 bandas de 1000 metros	Cubren el rojo y infrarrojo cercano. Cubren la región del visible y algunas regiones del IRC e SWIR. 12 bandas cubren la región del visible e Infrarrojo cercano (VIS-IRC) (0.4 – 0.965 μm), 11 bandas cubren el Infrarrojo medio (IRM) y 6 térmico (10.78 – 14.38 μm).	12 bits 0 – 4095 niveles digitales

Fuente: Chuvieco, 2002; página WWW de MODIS

2. Algoritmo aplicado

El algoritmo utilizado en la detección de incendios forestales fue desarrollado por la Universidad de Maryland, tiene como objetivo identificar los píxeles con uno o más fuegos que se encuentran activos en el momento que pasa el satélite, estos píxeles se les denomina Fire píxel; posteriormente se aplica una serie de pruebas para confirmar o desechar los píxeles.

Actualmente la Conabio utiliza la versión 4.3.2. del algoritmo, el código fuente fue obtenido de la página de la NASA e implementado en la estación de recepción de imágenes MODIS.

Como las condiciones ambientales durante la noche y día son diferentes, además durante el día el reflejo directo del sol puede incrementa la respuesta en las bandas térmicas, se expondrá el proceso del algoritmo con las adecuaciones pertinentes para cada caso. En la tabla II.6 se muestra las bandas utilizadas en el algoritmo.

Tabla II.6 Información utilizada de las imágenes MODIS

NÚMERO DE BANDA	LONGITUD DE ONDA	DENOMINACIÓN EN EL ALGORITMO	SATURACIÓN	OBJETIVO
1	0.65	$\rho_{0.65}$	--	Eliminar los destellos del sol y falsas alarmas en la costa, utilizando la máscara de nubes
2	0.86	$\rho_{0.86}$	--	Eliminar el brillo de la superficie, destellos de sol y falsas alarmas en la costa
7	2.1		--	Eliminar destello del sol y falsas alarmas en la costa
21	4.0	T_4	227°C	Canal con alto rango para la detección de fuegos activos
22	4.0	T_4	58°C	Canal con bajo rango para la detección de fuegos activos
31	11.0	T_{11}	127°C	Detección de fuegos activos y máscara de nubes
32	12.0	T_{12}		Máscara de nubes

Fuente: Giglio *et al.*, 2003; Kaufman & Justice, 1998

El algoritmo aplicado consiste en una serie de pasos sucesivos, iniciando con la eliminación de áreas o píxeles que no cumplen con los requerimientos establecidos y continuando con la aplicación de umbrales y pruebas contextuales para diferenciar entre el punto de calor y el área que le rodea. A continuación se explican cada uno de estos pasos, conforme a los documentos escritos por Giglio *et al.* (2003), Kaufman & Justice (1998) y Justice *et al.* (2006). En el presente informe se utiliza grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$) para facilitar la lectura, sin embargo el algoritmo corre con grados Kelvin (K).

El algoritmo identifica el incremento significativo de la radianza en la banda (21 ó 22) de los $4\ \mu\text{m}$ y la radianza absoluta y relativa observada en la banda (31) de los $11\ \mu\text{m}$. Se busca aprovechar las diferencias de la respuesta del fuego en las bandas infrarrojo medio e infrarrojo térmico (Giglio *et al.*, 2003). Porque la señal característica de un incendio activo es la diferencia entre la banda de $4\ \mu\text{m}$ y $11\ \mu\text{m}$.

El algoritmo empieza con la eliminación de aquellos píxeles considerados como datos nulos, nubes (conforme a la máscara nubes generada con la misma imagen (ver inciso (a) de esta sección) y cuerpos de agua (utilizando una máscara pre-definida). Para la identificación de estos píxeles son aplicados los siguientes procesos:

a) Generación de máscara de nubes

Eliminación de áreas cubiertas por nubes que no permiten la observación de la superficie terrestre, para ello se utilizan las siguientes pruebas:

Imágenes nocturnas

$$T_{12} < 17\ ^{\circ}\text{C} \quad (14)$$

Imágenes diurnas

$$\begin{aligned} &(\rho_{0.65} + \rho_{0.86} > 0.9) \text{ ó } (T_{12} < -8\ ^{\circ}\text{C}) \text{ ó} \\ &(\rho_{0.65} + \rho_{0.86} > 0.7) \text{ y } (T_{12} < 12\ ^{\circ}\text{C}) \end{aligned} \quad (15)$$

Estas pruebas permiten identificar nubes grandes y espesas, dejando las nubes pequeñas y los bordes de las nubes. Todos los píxeles identificados como nubes son eliminados del análisis (Giglio *et al.*, 2003).

b) Eliminación y selección de píxeles potenciales

Se aplica una prueba para eliminar los píxeles con menor posibilidad a contener un incendio, los píxeles que cumplan las siguientes pruebas son denominados píxeles potenciales:

Con imágenes nocturnas, sí:

$$T_4 > 32\ ^{\circ}\text{C} \text{ y } \Delta T > 10\ ^{\circ}\text{C} \quad (16)$$

Con imágenes diurnas, sí:

$$T_4 > 37\ ^{\circ}\text{C} \text{ y } \Delta T > 10\ ^{\circ}\text{C} \text{ y } \rho_{0.86} < 0.3 \quad (17)$$

Donde:

$$\Delta T = T_4 - T_{11}$$

En caso de no cumplir la prueba son eliminados. Aquellos píxeles que cumplan las pruebas pasan a las siguientes etapas.

c) Identificación de píxeles candidatos

Los autores plantean dos caminos para la identificación de píxeles candidatos, la primera es la prueba de umbrales absolutos y la segunda es una prueba contextual:

Prueba de umbrales absolutos.- Donde el umbral debe de ser lo suficientemente alto para eliminar las falsas alarmas. Será un píxel candidato sí:

$$T_4 > 47 \text{ }^\circ\text{C (con imágenes nocturnas)} \quad (18)$$

$$T_4 > 87 \text{ }^\circ\text{C (con imágenes diurnas)} \quad (19)$$

Al aplicar esta prueba se trata de eliminar ciertas influencias como el reflejo directo del sol (sun glint), por lo tanto el umbral es alto (Giglio *et al.*, 2003).

d) Caracterización del fondo

Tiene el objetivo de detectar los fuegos activos que no son detectados por la prueba de umbrales. La prueba consiste en caracterizar la señal radiométrica del píxel potencial en ausencia del fuego, para ello se caracteriza la señal de los píxeles vecinos. Se asume que la correlación entre la temperatura del fondo del píxel candidato y la temperatura de los píxeles que le rodean decrece con la distancia (Kaufman & Justice *et al.*, 1998).

Se utiliza una ventana creciente, el centro de ésta es el píxel candidato, para calcular la señal radiométrica son utilizados los píxeles dentro de esta ventana que cumplan con las siguientes condiciones:

- Píxeles que no sean datos nulos
- Píxeles localizados en tierra
- No son nubes
- No son píxeles fuego del fondo, estos son definidos sí:

$$\text{Prueba 1: } T_4 > 37 \text{ }^\circ\text{C y } \Delta T > 10 \text{ }^\circ\text{C (imágenes nocturnas)} \quad (20)$$

$$\text{Prueba 1: } T_4 > 52 \text{ }^\circ\text{C y } \Delta T > 20 \text{ }^\circ\text{C (imágenes diurnas)} \quad (21)$$

La ventana inicia con un tamaño de 3 x 3 píxeles alrededor el píxel candidato. Los píxeles adyacentes a este píxel son excluidos de la caracterización de fondo, porque se consideran que no son confiables debido a la respuesta triangular a lo largo del escaneo del sensor MODIS (Kaufman & Justice, 1998). La ventana incrementa a un máximo de 21 x 21 píxeles, hasta que al menos el 25% de los píxeles dentro de la ventana sean considerados como válidos. Durante este paso, se realiza una búsqueda optimizada de vecino más cercano para corregir el efecto de bowtie, el cual es el efecto de solapamiento en el escaneo de MODIS (Justice *et al.*, 2006), MODIS realiza un barrido consecutivo de 10 líneas de 1 km, 20 de 500 m y 40 de 250 m lo que provoca el solapamiento de los bloques en los extremos de la imagen (Calle *et al.* 2003). Con esta ventana se revisa aproximadamente 20 km de distancia del píxel candidato.

Cuando se encuentra un número suficiente de píxeles vecinos válidos, son calculadas las siguientes medidas estadísticas:

Para los píxeles vecinos válidos

Media (\bar{T}_4) y media de la desviación absoluta (δ_4) de T_4

Media (\bar{T}_{11}) y media de la desviación absoluta (δ_{11}) de T_{11}

Media ($\overline{\Delta T}$) y media de la desviación absoluta ($\delta_{\Delta T}$) de ΔT

Para los píxeles vecinos rechazados como píxeles de fondo son utilizadas las siguientes medidas:

Media (\bar{T}'_4) y media de la desviación absoluta (δ'_4) de $4 \mu\text{m}$. Estos valores son útiles para rechazar falsas alarmas.

e) Prueba contextual

Si la caracterización del fondo fue exitosa, se aplican pruebas de umbrales contextuales para detección relativa del fuego. El objetivo es buscar la firma característica del fuego activo (en T_4 y T_{11}) que difiere sustancialmente de los píxeles que no tienen fuego (Justice *et al.*, 2006). Las pruebas a aplicar son las siguientes:

$$\text{Prueba 2: } \Delta T > \overline{\Delta T} + 3.5\delta_{\Delta T} \quad (22)$$

$$\text{Prueba 3: } \Delta T > \overline{\Delta T} + 6 \text{ K} \quad (23)$$

$$\text{Prueba 4: } T_4 > \bar{T}_4 + 3\delta_4 \quad (24)$$

$$\text{Prueba 5: } T_{11} > \bar{T}_{11} + \delta_{11} - 4\text{K} \quad (25)$$

$$\text{Prueba 6: } \delta'_4 > 5 \text{ K} \quad (26)$$

Las tres primeras condiciones aíslan los píxeles candidato del fondo de no-fuego. El factor de 3.5 de la prueba 2 y es más grande que el factor 3 de la prueba 4, con el objetivo de ayudar a ajustar la correlación entre las observaciones en las bandas de 4 y 11 μm .

La prueba 5 es aplicada sólo en las imágenes diurnas, se utiliza para rechazar píxeles con nubes que pueden aparecer calientes en la banda de 4 μm (debido al reflejo de la luz del sol) y aún frías en la banda térmica de 11 μm . Esto ayuda a reducir las falsas alarmas en la costa, producidas por píxeles de agua más fríos que son incluidos en la ventana de análisis (Giglio *et al.*, 2003)

f) Detección tentativa de fuego

Para las imágenes nocturnas un píxel candidato será definido como punto de calor cuando:

{Prueba 1 es verdadera}

ó

{Las pruebas 2 – 4 son verdaderas}

Para las imágenes diurnas un píxel candidato será definido como punto de calor cuando:

{Prueba 1 es verdadera}

ó

{Las pruebas 2 – 4 son verdaderas y [prueba 5 ó prueba 6 es verdadera]},

De otra manera es clasificado como no-punto de calor.

Cuando la caracterización del fondo falla, solo la prueba 1 es aplicada, si el umbral no se cumple el píxel es clasificado como no conocido, indicando que el algoritmo no pudo definir la situación.

Debido a la influencia del sol durante el día, a las imágenes diurnas se les aplica otras pruebas con el objeto de eliminar falsas alarmas causadas por reflejo del sol (sun-glint).

g) Rechazo del reflejo del sol

Algunos elementos de la naturaleza provocan reflejo del sol como los cuerpos de agua, nubes de cirrus y suelo desnudo, este reflejo puede causar falsas alarmas. El reflejo del sol es rechazado usando el ángulo θ_g (Giglio *et al.*, 2003) entre los vectores dirigidos de la superficie al satélite y la dirección de reflexión especular, donde:

$$\text{Prueba 7: } \cos \theta_g = \cos \theta_v \cos \theta_s - \text{sen } \theta_v \text{ sen } \theta_s \cos \Phi \quad (27)$$

Donde θ_v y θ_s son los ángulos de vista y solar del cenit, respectivamente y Φ el ángulo de azimut relativo. Se realiza un conteo de los píxeles adyacente al agua, por ejemplo el número de píxeles de agua dentro de 8 píxeles rodeando al píxel fuego tentativo, y es denotado por N_{aw} . El número de píxeles denotados como agua en las ventanas para caracterizar el fondo se denomina N_w . Las siguientes condiciones son evaluadas :

$$\text{Prueba 8: } \theta_g < 2^\circ \quad (28)$$

$$\text{Prueba 9: } \theta_g < 8^\circ \text{ y } \rho_{0.65} > 0.1 \text{ y } \rho_{0.86} > 0.2 \text{ y } \rho_{2.1} > 0.12 \quad (29)$$

$$\text{Prueba 10: } \theta_g < 12^\circ \quad (30)$$

Si una o más de estas condiciones son satisfechas, el píxel candidato es rechazado como un reflejo del sol y clasificado como no-fuego, de otra manera es clasificado como fuego.

Es importante mencionar que existen otras dos pruebas en el algoritmo original, rechazo por el borde en desiertos y rechazo por falsas alarmas en la costa, sin embargo la Conabio no las aplica, porque en el código fuente disponible no son consideradas.

II.2.3.2 Índice de propagación

La recepción de las imágenes de satélite MODIS permitió calcular diariamente el índice de vegetación NDVI (índice normalizado de vegetación) y EVI (índice de vegetación mejorado). A partir de estos índices se calcula un índice de propagación de incendios, este se basa exclusivamente en las condiciones de la vegetación.

El índice de propagación se determina con la comparación del NDVI actual con un NDVI estimado para la misma fecha, con el promedio del NDVI de los 4 años inmediatos anteriores, que se obtienen de un análisis de serie de tiempo, utilizando el análisis armónico de series de tiempo HANTS por sus siglas (De Badts *et al.* 2006); permitiendo saber si la condición actual de la vegetación está por arriba del promedio, por lo tanto se considera que no existe estrés hídrico y la posibilidad de propagación de un incendio es baja, por el contrario si la condición actual esta por debajo del promedio, se considera que existe estrés hídrico, por lo tanto las condiciones de la vegetación pudiese ser propicias para propagarse un incendio, una vez que se presente un punto de calor. Es importante resaltar que existen tipos de vegetación que pueden ser potencialmente incendiadas por las condiciones propias durante la época seca del año.

El resultado se presenta en un mapa con las condiciones de los 10 días posteriores a su publicación, mostrando las áreas donde se pudiese propagar incendios una vez que se haya iniciado. Este mapa se publica en la página WEB de la Conabio.

II. 3 Resultados

II.3.1 Puntos de calor detectados

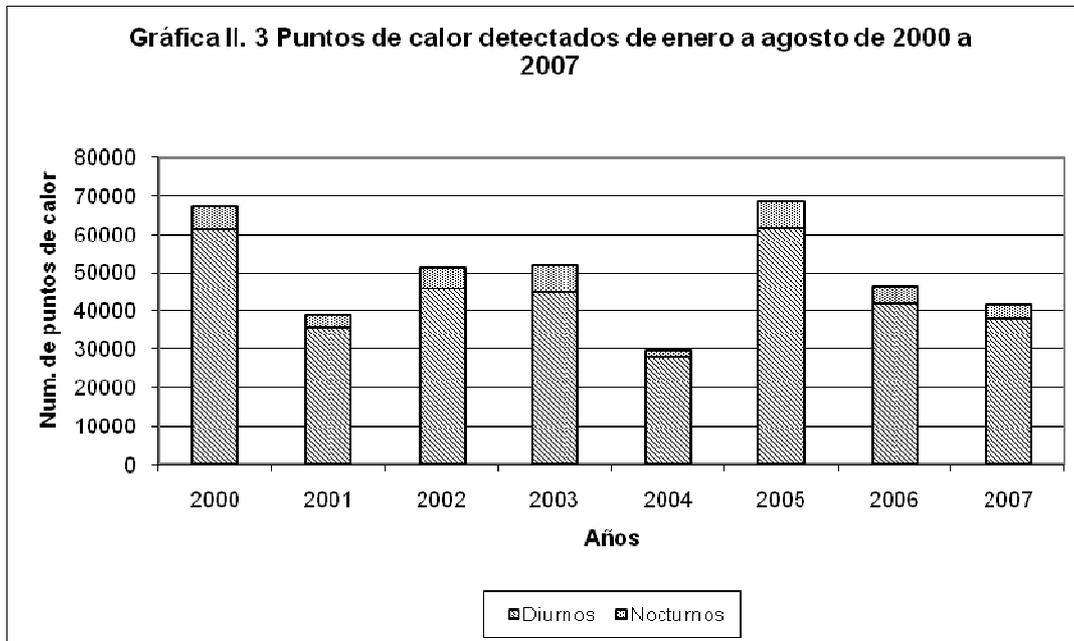
Desde el inicio del programa de puntos de calor en el año de 1999 hasta el año 2007 se procesaron 11,270 imágenes, con las cuales se han detectado 510,521 puntos de calor en el territorio mexicano. En los primeros años del programa se trabajó durante los meses de mayor incidencia de incendios forestales, de enero a mayo, con excepción del año 1999 que fue de mayo a julio y sólo con imágenes nocturnas, a diferencia del resto de los años. Paulatinamente el tiempo de observación se amplió y a solicitud de la Comisión Nacional Forestal, a partir del año 2004 el programa se encuentra en operación todos los días del año.

En la tabla II.7 se muestra el total de puntos de calor detectados por año para un solo tipo de imágenes, para evitar duplicidad en los resultados del análisis. Imágenes AVHRR de 1999 a 2003 y MODIS de 2004 a 2007. Bajo estas condiciones los puntos de calor suman 407,753 puntos de calor.

Tabla II.7 Puntos de calor detectados

	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Puntos de calor Nocturnos	2,549	5,757	3,068	5,833	7,293	2,060	7,139	4,606	3,796
Puntos de calor Diurnos		61,569	36,000	46,120	44,950	30,204	64,040	43,327	39,442
Total	2,549	67,326	39,068	51,953	52,243	32,264	71,179	47,933	43,238

Debido a la diferencia del periodo de observación en los diferentes años de operación y con el objetivo de realizar una comparación interanual e intra-anual de los puntos de calor, para el presente análisis se utilizaron sólo los puntos detectados en el periodo de enero a agosto, desde el año 2000 al 2007, como se muestra en la siguiente gráfica.

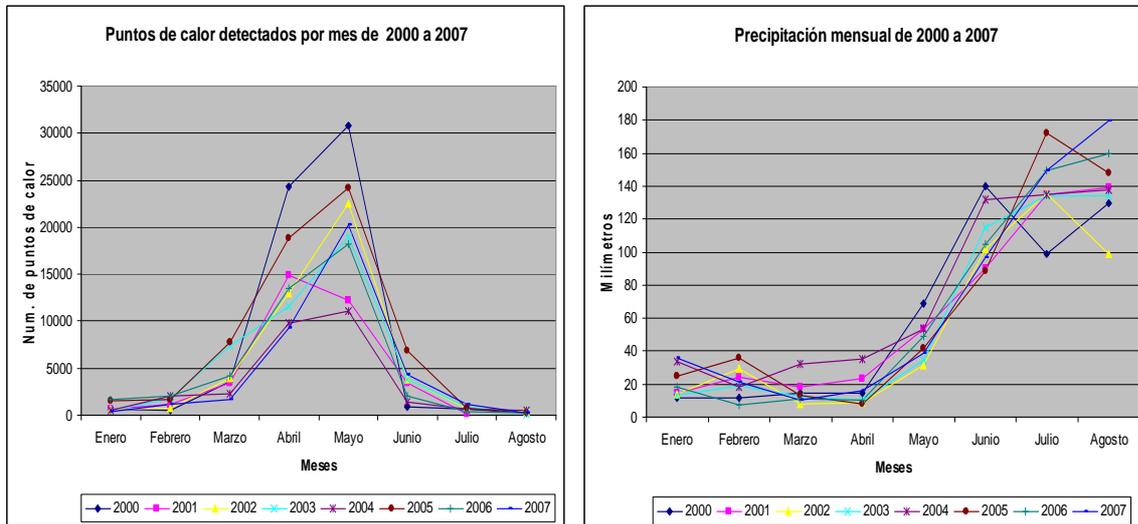


Uno de los primeros resultados observados es la diferencia en el número de puntos de calor detectados durante el día y la noche; este primer resultado indica mayor presencia del fuego durante el día, debido principalmente al uso del fuego en las actividades agropecuarias. Esta aseveración es confirmada al revisar el número de puntos de calor ubicados en áreas definidas como agricultura y pastizal cultivado, en promedio es del 33%, una zona ejemplo de esta situación es en el estado de Campeche donde gran cantidad de los puntos de calor registrados se ubican en zonas ganaderas. Por lo tanto se tiene mayor certeza que los puntos de calor detectados con imágenes nocturnas corresponden a incendios.

Son identificados dos extremos en el número de puntos de calor, el extremo mínimo es el año 2004 y el máximo es el año 2005, seguido, con valores similares, por el año 2000. El resto de los años se encuentra entre estos dos extremos. La frecuencia de puntos de calor se encuentra relacionada con las condiciones de humedad prevalecientes en el periodo observado y la presencia de fenómenos meteorológicos como los huracanes.

El año 2004 fue considerado como un de los años más húmedos, presentando precipitaciones desde el mes de enero (SMN, 2008), éste año registró la mayor cantidad de precipitación anual en México 872.1 mm, del periodo analizado. En caso contrario el año 2005 no fue el más seco de los diez años analizados, debido a la presencia del huracán Wilma y Stan, sin embargo durante los meses de abril y

mayo la precipitación de dicho año fue por debajo de la media. El año 2000 registró en los meses de abril y mayo una incidencia mayor de puntos de calor, como se observa en las siguientes gráficas, sin embargo en comparación con el año 2005 un mes antes y después registra menor número.



Gráficas II.4 Distribución temporal de puntos de calor y precipitación
Fuente: Datos de precipitación SMN,2008

Los meses que registran mayor número de puntos de calor es de marzo a mayo, periodo que coincide con la época más intensa de incendios forestales (información proporcionada personalmente por la CONAFOR), el incremento se inicia en el mes de marzo aumentando paulatinamente hasta mayo, posteriormente existe una disminución drástica hacia el mes de junio, éste comportamiento continua en el resto de los meses.

La distribución intra-anual está relacionada con el comportamiento de la precipitación a lo largo del año; los meses con menor precipitación son marzo y abril, el incremento de la precipitación se inicia en el mes de mayo, esto pareciera que no coincide con el alto número de puntos de calor, sin embargo la temporada de lluvia inicia en la última semana de mayo y existe un incremento de precipitación en el mes de junio, situación que coincide con la disminución drástica de los puntos de calor y la disminución de la actividad agrícola en la etapa de preparación de la tierra.

Los huracanes que más influencia han tenido en la presencia de puntos de calor son: Isidore registrado en septiembre del año de 2002, afectando las inmediaciones de la ciudad de Mérida, Yucatán. De igual forma el huracán Wilma que tocó tierra en las costas de Cancún, en el año 2005, y para el año 2006 es una de las zonas más afectadas por incendios forestales. Esta relación directa ha llevado a las autoridades de CONAFOR y otras instancias a realizar trabajos de prevención contra incendios forestales en las áreas afectadas por los huracanes, como fue después del huracán Dean ocurrido en el año 2007.

Espacialmente la presencia de puntos de calor inicia en la región sur y sureste de México, en los estados de la península de Yucatán, así como en Chiapas y

Oaxaca, incrementan hacia el centro y centro occidente, para continuar hacia el Noroeste y finalmente termina en el estado de Baja California donde existe un clima similar al mediterráneo.

Como parte de los resultados del programa para la detección de los puntos de calor se ha implementado la colaboración con el grupo intersecretarial para la prevención y combate de incendios precedido por la CONAFOR; la Conabio participa activamente con el compromiso de proporcionar diariamente la información de los puntos de calor.

Otro de los resultados importantes ha sido la divulgación del programa por medio de cursos al personal involucrado en la prevención y combate de incendios forestales. La Conabio ha impartido 6 cursos para la correcta interpretación y manejo de la información publicada en su página WEB. Como parte de estos cursos es la retroalimentación de los usuarios.

Finalmente no todos los puntos de calor que se detectan son incendios ni todos los incendios son detectados, debido a las limitaciones del sistema y los algoritmos utilizados. Sin embargo la información proporcionada por los puntos de calor a las diferentes instancias a lo largo de los años ha sido de utilidad para: confirmar incendios forestales, ubicar con mayor rapidez incendios, definir áreas de problemáticas por incidencia de incendios, y para planificar acciones de prevención y combate.

II.3.2 Validación

A la fecha no se ha realizado una validación general que nos permita evaluar numéricamente los resultados, sin embargo han existido diferentes ejercicios que han permitido continuar con el programa.

En el año 2001 se realizó un ejercicio de validación de los puntos de calor detectados con imágenes AVHRR usando información de campo recibida de algunas delegaciones de SEMARNAT. Desafortunadamente la información no fue uniforme para todo el país, solo correspondió a 10 estados y el Distrito Federal, los estados fueron Campeche, Colima, Chiapas, Guanajuato, Hidalgo, Michoacán, Morelos, Tlaxcala, Veracruz y Yucatán, además el periodo de observación no era el mismo, en algunos estados fue de 4 meses y en otros de una semana; sin embargo se procedió a realizar el análisis.

Fueron recibidas 1198 coordenadas, de ellas sólo el 20% fueron comparadas con los puntos de calor, debido a que el 80% restante presentaron los siguientes problemas:

- Error en las coordenadas (3%),
- La hora de inicio se registró después del paso de la imagen nocturna y la hora de término fue registrada antes del paso de la imagen diurna, por lo tanto no era posible detectarlos (70%).
- No se contó con la imagen correspondiente a la fecha del incendio (3%).
- Sin dato en la imagen, debido a la forma de México y el área que registra la imagen (2%).

- Máscara de luces (6%) los incendios ocurrieron en las inmediaciones de las urbes.
- Presencia de nubes (16%).

Del 20% de los puntos de calor restantes fueron analizados, el 22% fueron detectados adecuadamente. El 78% no fue detectado y tuvo tres principales razones:

1.- No alcanzaron el umbral mínimo establecido en el algoritmo 26%, de estos el 38 % registraron una superficie afectada de 0 a 10 hectáreas.

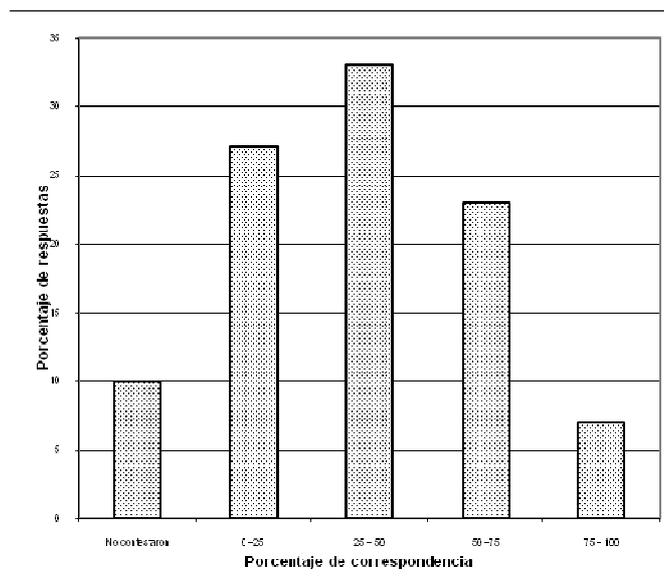
2.- Eliminados por otras pruebas 7%, el 33% de estos incendios se registró en zonas semiáridas.

3.- El 26% de las coordenadas no contaban con la información de la hora de inicio y término del incendio, por lo tanto cabe la posibilidad de que los incendios ocurrieran entre los pasos del satélite.

Es importante mencionar que el 44% de las coordenadas recibidas procedieron del Distrito Federal, entidad que cuenta con un sistema de prevención y combate que permite tener observadas las áreas de bosque las 24 horas del día, al ser la entidad de menor territorio en el país. Y contar con un sistema adecuado para su combate.

En el año 2003 la Conabio realizó una consulta sobre el uso de la información proporcionada por el programa de puntos de calor, dirigida a personal de la SEMARNAT y CONAFOR, se obtuvo la respuesta de 30 cuestionarios de 21 estados de la república, cabe aclarar en ese tiempo la SEMARNAT transfería la responsabilidad del combate de incendios a la CONAFOR.

La respuesta a la pregunta ¿cuál es el porcentaje de correspondencia entre los puntos de calor y los incendios forestales? Se puede ver en la gráfica II.5



Gráfica II.5 Porcentaje de correspondencia entre puntos de calor e incendios forestales

El porcentaje de incendios detectados se incrementó en comparación del ejercicio anterior y se espera que al usar las imágenes MODIS se pudiese incrementar dicho porcentaje. Desafortunadamente no se ha podido realizar un ejercicio similar con los resultados más recientes de las imágenes MODIS.

A partir del alto porcentaje de la ocurrencia de incendios fuera del horario del paso de los satélites sobre México se estableció la necesidad de obtener un mayor número de observaciones (Jiménez *et al.*, 2004), situación que se podría cumplir con la recepción de las imágenes MODIS.

En la siguiente tabla se muestra la hora del paso de los satélite Aqua y Terra para el día 14 de febrero de 2003, como ejemplo de mayor número de observaciones, sin embargo es necesario considerar el cubrimiento de México por la imagen.

Tabla II.8 Hora del paso de los satélites sobre México

SATÉLITE	HORA LOCAL	
Aqua	0:51:50	Nocturna
Aqua	2:25:40	Nocturna
Terra	10:18:09	Diurna
Terra	11:55:09	Diurna
Aqua	13:20:10	Diurna
Aqua	14:59:20	Diurna
Terra	22:06:50	Nocturna
Terra	23:44:40	Nocturna

A pesar que no se tiene un número exacto de validación es importante mencionar que el programa es utilizado por las instituciones involucradas en la prevención y combate de incendios como es la CONAFOR, CONANP y SAGARPA y la consecuencia de este uso es la evolución hacia un sistema de alerta temprana como se explicará en el siguiente apartado.

I.4 Evolución del programa a un sistema de alerta temprana

La iniciativa de proporcionar información sobre la detección de incendios forestales a partir de imágenes de satélite se convirtió a un programa que ha durado nueve años. Se espera que ahora evolucione a un programa de alerta temprana bajo el esquema de geosistemas y bajo los conceptos de riesgos naturales, utilizando los mecanismos de atención de emergencia. Se contempla las tres fases de atención de desastres naturales: antes - alerta temprana-, durante -monitoreo de incendios- y después - identificación rápida de áreas quemadas-.

Un geosistema es una entidad del territorio compleja e integrada, que se compone por elementos que se relacionan entre sí, y que a su vez tiene relaciones con otros. Los componentes y las relaciones del geosistema se expresan en aspectos espaciales de localización y distribución. Sus principales componentes se clasifican en grandes rubros: sistema natural abiótico, (clima, hidrología, relieve, geformas, suelos), el sistema natural biótico (vegetación, fauna) y sistema cultural (presencia y actividad humana), (García y Muñoz, 2002).

El concepto de riesgo natural a utilizar en la presente propuesta es el utilizado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), quien lo define como:

Producto de tres factores: El valor de los bienes expuestos (C), tales como vidas humanas, edificios, carreteras, puertos, tuberías, etc; la vulnerabilidad (V), que es un indicador de la susceptibilidad a sufrir daño, y el peligro (P) que es la probabilidad de que ocurra de cierta intensidad en un lugar determinado; así $R = C \times V \times P$. El grado de preparación de una sociedad determina la disminución de la vulnerabilidad y, en consecuencia, del riesgo (CENAPRED, 2008).

En el caso de los incendios forestales, los bienes expuestos (factor C) son la vegetación y la fauna, en ocasiones pueden ser casa habitación u otros bienes materiales de la sociedad. El peligro (factor P) se refiere a las condiciones del sistema natural abiótico (precipitación, temperatura, inclinación del terreno, velocidad y dirección del viento) y biótico (disponibilidad de combustible, estrés hídrico en la vegetación) que pueden propiciar un incendio, así como la participación del sistema cultural, se ha dicho que el 80% de los incendios son de origen humano, ya sea por actividades productivas o intencionales. La vulnerabilidad (factor V) está conformada por las condiciones del sistema biótico y el grado de preparación del sistema cultural para la atención de una emergencia.

Como se ha expresado en los párrafos anteriores la participación del sistema cultural es fundamental en dos aspectos: como origen y como prevención y combate. Sin embargo por el perfil de la Conabio, el presente trabajo se enfoca en los aspectos del sistema natural abiótico y biótico, quedando pendiente el sistema cultural. En los siguientes párrafos se establecerán los lineamientos a seguir para establecer el nuevo programa.

II.4.1 Alerta temprana

La fase de *-antes-* se conforma por la alerta temprana, la cual consiste en la publicación del mapa del índice de propagación de incendios forestales, como se muestra en la figura II.1A que se basa exclusivamente en el vigor de la vegetación, utilizando índices de vegetación NDVI (por sus siglas en inglés índice de vegetación de diferencia normalizada), que considera el verdor, densidad y humedad de la vegetación, en esta primera etapa se evalúa el sistema biótico. Esta información se obtiene de las imágenes de satélite MODIS.

Con el objetivo de mejorar este mapa, se pretende utilizar un modelo de capacidad de combustión que está basado en las observaciones diarias, desde los satélites, de las condiciones meteorológicas. Utilizando productos de EOS (Earth Observing System) para producir mapas regionales de precipitación, temperatura de la superficie y humedad relativa del aire. El modelo usa la ecuación de peligro de incendio del Servicio Forestal de Estados Unidos, para estimar el flujo de la humedad en y fuera de la materia muerta sobre el suelo forestal, evaluando el sistema abiótico y su influencia en el sistema abiótico. El resultado es una estimación del contenido de humedad del material que se quema.

La información utilizada proviene del Tropical Rainfall Monitoring Misión (TRMM) y productos MODIS como la temperatura de la superficie, humedad relativa. Esta información se recibe casi en tiempo real.

Los dos productos descritos con anterioridad son la base para generar un mapa que defina áreas de peligro y vulnerabilidad de que un incendio se propague, una vez que éste ocurra.

II.4.2 Monitoreo de incendios

La siguiente fase *-durante-* consiste en el proceso de monitoreo en el momento que ocurren los incendios, conformada por la detección de puntos de calor (figura II.2B). Este proceso se ha descrito en las secciones anteriores y consiste en:

- Detección de puntos de calor con imágenes MODIS y AVHRR
- Caracterización geográfica del sitio en el cual se localizan los puntos de calor detectados.
- Publicación de la información.- Los resultados desde 1998, se encuentran disponibles en la página Web de la Conabio; se espera que a finales de 2008 se cuente con un nuevo diseño de la página, para facilitar la consulta y búsqueda de la información a los usuarios.
- Distribución de la información, por correo electrónico.- Actualmente se tiene más de 400 direcciones electrónicas a las cuales se envía la información.
- Una parte esencial en este trabajo ha sido la comunicación con los usuarios quienes han proporcionado ideas y adecuaciones al programa durante estos nueve años de trabajo.

II.4.3 Identificación rápida de áreas quemadas

Esta fase consiste en la identificación de las áreas quemadas, ocasionadas por los incendios forestales, utilizando imágenes de satélite MODIS (figura II.2C). Se tienen como antecedente el proyecto de Áreas quemadas de Latinoamérica 2004, el cual se realizó como una actividad de la Red Latinoamericana de Teledetección e Incendios Forestales (Redlatif) que forma parte de GOF-C-GOLD (RedLatif, 2008).

Para definir las áreas quemadas se utilizaron compuestos de 32 días del producto de reflectancia MOD09, generados por la Universidad de Maryland. En la selección de las áreas quemadas fueron utilizados los índices Normalized Burn Ratio (NBR) y el Burned Area Index (BAI), selección de umbrales y un análisis de contexto (Chuvienco *et al.*, 2008). Posteriormente para el caso de México se realizaron algunas pruebas utilizando el NBR y NDVI.

Con este antecedente se espera realizar algunos ajustes al método para adecuarlo a las condiciones de México, principalmente modificaciones de los umbrales por ecorregión y por época del año. Las ecorregiones están definidas principalmente por biomas específicos como respuesta a las condiciones ambientales existentes. La ventaja de contar con la identificación es complementar los trabajos realizados por personal experto de la CONAFOR, quienes establecen el área afectada una vez que terminó el incendio.

Insumos

Sistema de recepción de imágenes de satélite



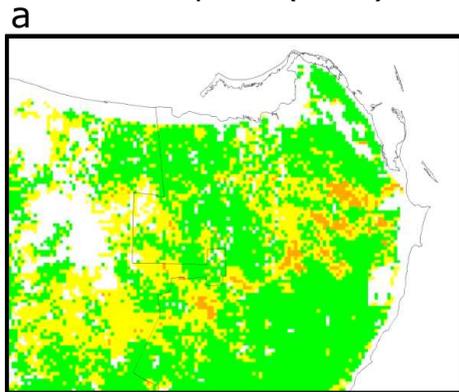
Imágenes de satélite MODIS y AVHRR

Imagen de satélite MODIS 10 de mayo 2006, Península de Yucatán

65

Productos

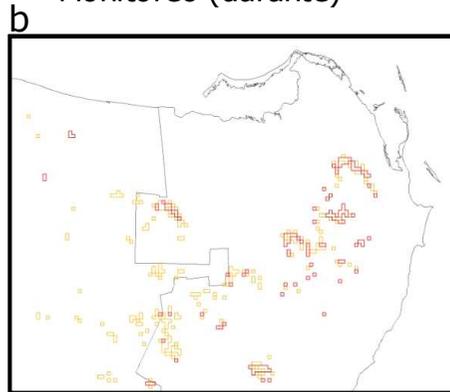
Alerta temprana (antes)



Índice de propagación

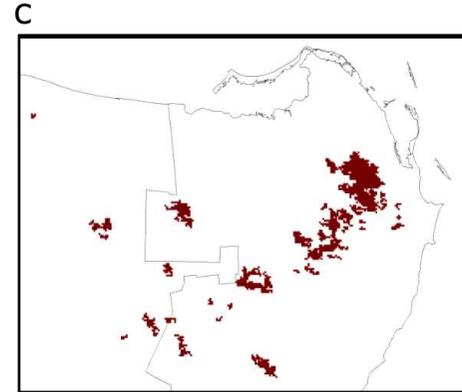


Monitoreo (durante)



Detección de puntos de calor con información del sitio

Impacto de incendios (después)



Identificación de áreas quemadas

II.2 Sistema de alerta temprana

CAPÍTULO III

Implementación del Programa de Monitoreo de Ecosistemas

III.- Implementación del programa monitoreo de ecosistemas

A partir de la necesidad de conocer los cambios que presentan los ecosistemas en México, la Conabio estableció el programa Monitoreo de Ecosistemas mediante técnicas de percepción remota, con el objetivo de "Realizar el seguimiento de los cambios en forma espacial y temporal de la distribución de la vegetación, definir áreas con problemas de cambio y en ellas realizar un análisis con imágenes a mayor detalle" (Conabio, 2002). Sin embargo, debido a la relevancia de los incendios forestales del año 1998, las actividades del área se enfocaron al programa de puntos de calor, como se explicó en el capítulo 2, mientras el monitoreo de ecosistemas consistió en evaluar cambios de uso del suelo y vegetación en sitios de interés de la Conabio.

III.1 Cambios de uso de suelo y vegetación

La evaluación de cambio de vegetación y uso de suelo fue realizada en tres sitios de relevancia, ubicados en Michoacán, Valle de Bravo en el Estado de México, y Guerrero. En este proceso participaron principalmente dos personas Dr. Schmidt y Geog. María Isabel Cruz López. Los resultados del análisis se encuentran publicados en la página WEB de la Conabio en la siguiente liga:

http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/cambios_veg/doctos/cambios_vegetacion.html

En el presente informe se explica con mayor detalle los métodos utilizados en los tres casos de estudio, así como algunas soluciones aplicadas a los problemas presentados, con el objetivo de facilitar el trabajo en estudios posteriores. Los tres casos se presentan en forma conjunta, para evitar repeticiones y resaltar las particularidades.

III.1.1 Definición de área de estudio

En el análisis geográfico la definición del área de estudio es fundamental. En este proceso es necesario establecer criterios para la delimitación del área de interés conforme al objetivo del análisis, por lo tanto las áreas tienen formas espaciales diferentes.

Michoacán

El caso de estudio de Michoacán estuvo relacionado con el proyecto Tropical Ecosystem Environment Observation by Satellites (TREES), realizado por el Joint Research Centre de la Comisión Europea. El proyecto TREES tenía como objetivo la identificación y monitoreo de áreas (hot spot) de deforestación en el trópico húmedo.

En noviembre de 1997 el proyecto TREES realizó un taller para identificar áreas de deforestación actual y potencial en las zonas húmedas del trópico, a escala mundial, de esta manera estar en condiciones de obtener una fuente de referencia para identificar hot spot de deforestación y establecer criterios para su evaluación (Achard *et al.*, 1998). El resultado principal fueron mapas a escala continental. Una

de las recomendaciones emitidas fue el uso de imágenes de satélite para monitorear dichas áreas.

Posteriormente se establece la necesidad de realizar un mapa global con imágenes de satélite AVHRR. Como parte de la validación se seleccionaron sitios en diversas partes del mundo, para analizar el cambio de uso de suelo y vegetación utilizando imágenes de satélite Landsat. Los sitios fueron delimitados con el path-row de las imágenes.

Uno de aquellos sitios correspondió al área cubierta por la imagen Landsat con path-row 28-46, del sistema de referencia denominado Worldwide Referente System-2 (WRS-2). Esta área corresponde a la unión de tres entidades federativas de México: sur de Michoacán, este y noreste de Jalisco y noreste de Guanajuato, como se muestra en el mapa III.1.

Las coordenadas extremas del área de estudio son:

Esquina	Latitud	Longitud
Nor-oeste	21° 05' 9.63" N	102° 51' 06.98" W
Sur-este	19° 20' 1.62" N	100° 53' 09.92" W

Valle de Bravo

En el año 2000 la organización no gubernamental (ONG) Pro-cuenca Valle de Bravo solicitó a la Conabio la elaboración del mapa de vegetación y uso del suelo actual de la cuenca, así como la realización de un análisis de los cambios presentados en los últimos 30 años. Esta información es una herramienta fundamental en el trabajo de mantenimiento de las condiciones naturales de la cuenca y calidad de agua.

El área de estudio estuvo conformada por la cuenca que alimenta la presa Valle de Bravo, localizada en el Estado de México. Para su delimitación se utilizó un Modelo Digital del Terreno (MDT), elaborado por el INEGI, con resolución de 90 metros y una imagen Landsat ETM+. El área de estudio se puede ver en el mapa III.1, las coordenadas extremas de la cuenca son:

Esquina	Latitud	Longitud
Nor-oeste	19° 23' 49.94" N	100° 13' 45.16" W
Sur-este	19° 04' 47.91" N	99° 51' 17.11" W

Guerrero

En el año 2002, la Procuraduría Federal de Protección del Ambiente (PROFEPA) solicitó a la Conabio su colaboración para identificar áreas con proceso de deforestación en 3 municipios del sur del estado de Guerrero, utilizando imágenes de satélite. El área de estudio no estaba delimitada con precisión, por lo tanto, se utilizaron dos criterios principales: la frontera de los tres municipios y la ubicación de 18 localidades donde se había reportado problemas de deforestación. En la delimitación fue utilizada la cartografía topográfica como principal fuente de información. Finalmente se decidió definir un recuadro que cumpliera los dos criterios mencionados, con las siguientes coordenadas.

Esquina	Latitud	Longitud
Nor-oeste	18° 17' 31.22" N	101° 44' 9.51" W
Sur-este	16° 25' 10.4" N	100° 23' 4.8" W

III.1.2 Materiales y fuentes de información

En los tres casos de estudio se utilizaron imágenes Landsat, registradas por diferentes sensores y por lo menos en dos fechas diferentes. Las fuentes de los datos fueron variadas dependiendo de la existencia y disponibilidad de las imágenes.

Michoacán

Las imágenes de satélite utilizadas fueron Landsat TM (Thematic Mapper), proporcionadas por el proyecto TREES. Las imágenes ya presentaban correcciones radiométricas y parcialmente atmosféricas. Sólo fue necesario realizar la georreferencia de la imagen de fecha 7 de abril de 1998 y con base en ésta se realizó la rectificación de la imagen de fecha 9 de abril de 1993. En la tabla III.1 se muestran las características principales de las imágenes utilizadas.

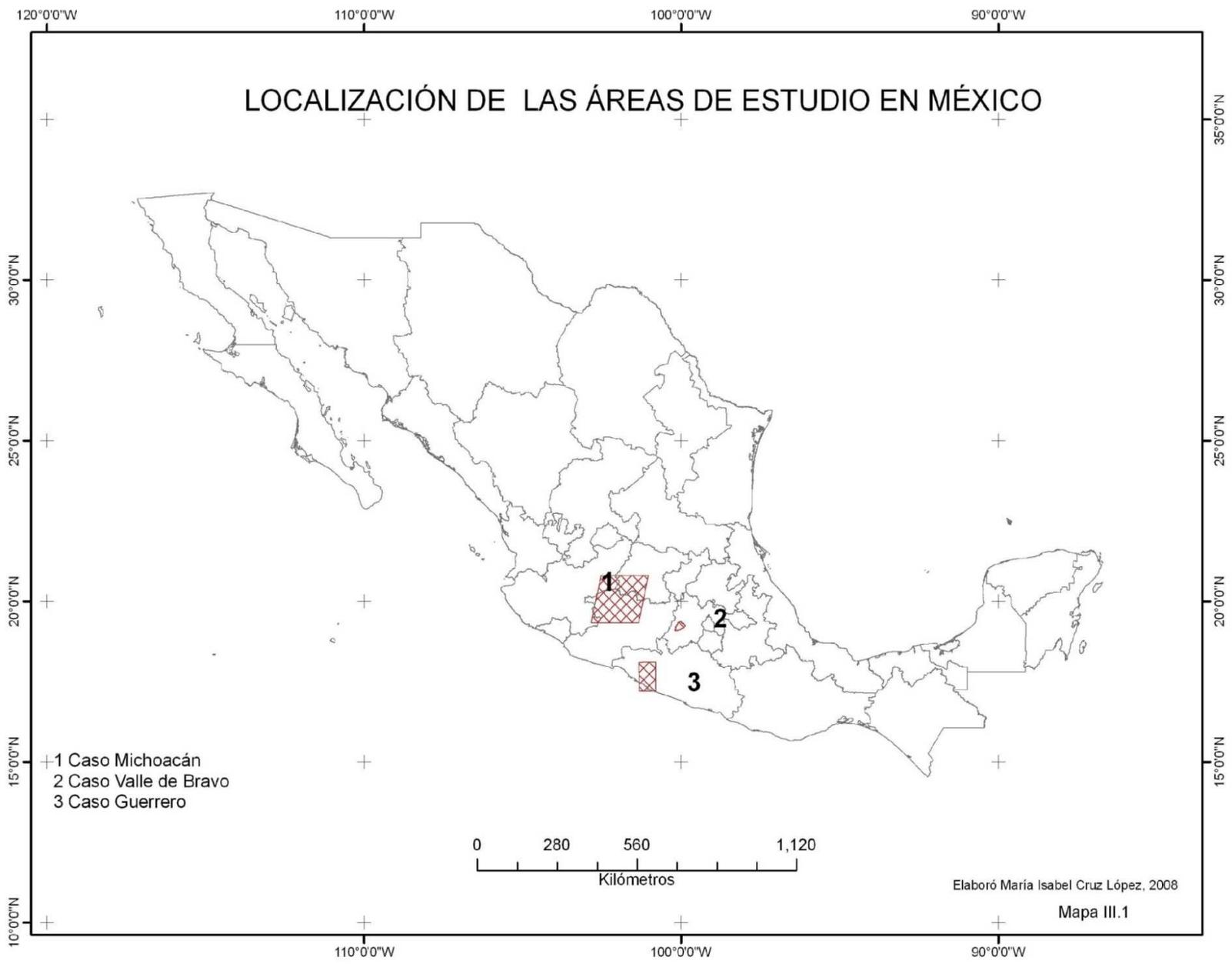
Valle de Bravo

Con el objetivo de cubrir un periodo amplio de tiempo y evaluar los cambios de vegetación y uso del suelo en la cuenca, fue necesario utilizar imágenes Landsat MSS (Multi Spectral Scanner) de las décadas de 1970 y 1980. Mientras para establecer el estado actual de la vegetación y uso del suelo se utilizó una imagen Landsat ETM+ (Enhanced Thematic Mapper plus) de fecha 13 de enero de 2000. En la tabla III.1 se muestran las características principales.

Las imágenes Landsat MSS fueron proporcionadas por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y forman parte del proyecto NALC. Las imágenes conforman una tripleta de las décadas 1970, 1980 y 1990 (esta última no fue utilizada en el proyecto). Como parte del proyecto NALC las imágenes fueron corregidas imagen a imagen utilizando un modelo digital del terreno (MDT) y referenciadas a un mapa base, con un tamaño de píxel de 60 m, con el objetivo de facilitar el co-registro con imágenes Landsat TM, cuya resolución es de 30 metros (USGS, 1996).

La imagen Landsat ETM+ forma parte de la serie de imágenes utilizadas en el Inventario Nacional Forestal 2000, realizado por el Instituto de Geografía de la UNAM, INEGI y SEMARNAP. El Instituto de Geografía fue el encargado de adquirir y realizar el pre-procesamiento de las imágenes.

Por lo tanto las imágenes de satélite utilizadas en este proyecto se encontraban listas para ser clasificadas. En la tabla III.1 se muestran las características principales.



Guerrero

Dos imágenes Landsat fueron proporcionadas por la PROFEPA y el Instituto de Geografía de la UNAM, una con fecha del 24 de octubre de 1992 y la otra del 13 de abril de 2000. La primera imagen corresponde al sensor TM y la segunda a ETM+. En la tabla III.1 se muestran las principales características.

Tabla III.1 Características de las imágenes de satélite utilizadas en los tres casos de estudio.

	MICHOCÁN		VALLE DE BRAVO			GUERRERO	
	Fecha 1	Fecha 2	Fecha 1	Fecha 2	Fecha 3	Fecha 1	Fecha 2
Fecha	9 de abril de 1993	7 de abril de 1998	23 de noviembre de 1973	14 de marzo de 1986	13 de enero de 2000	24 de octubre de 1992	13 de abril de 2000
Sensor	TM	TM	MSS	MSS	ETM +	TM	ETM +
Resolución espacial	30 m	30 m	60 m	60 m	30 m	30 m	30 m
Path-row	28-46	28 - 46	27-47	27-47	27 - 47	27-48	27 -48
Número de Bandas	7	7	4	4	8	7	8

III.1.3 Esquema de clasificación

Antes de iniciar con la extracción de información de las imágenes de satélite es necesario establecer el esquema de clasificación, el cual se refiere a la descripción de los elementos que se espera identificar en ellas, considerando características de resolución de las imágenes.

Michoacán

El proyecto TREES estableció su propio esquema de clasificación, éste fue adecuado a las condiciones de México, utilizando como base el mapa de uso de suelo y vegetación elaborado por el INEGI. Debido a la diversidad de ecosistemas presentes en México, así como elementos identificados en las imágenes, como nubes y sombras. Se identificaron 17 clases que posteriormente fueron reagrupadas a 9 clases, conforme a los requerimientos y definiciones del proyecto TREES, como se muestra en la tabla III.2.

Tabla III.2 Esquema de clasificación

CLASES DEL PROYECTO TREES	CLASES ORIGINALES
Agricultura	Agricultura de temporal Agricultura de riego
Áreas sin vegetación	Zonas urbanas Suelo desnudo Colada de lava
Matorral	Matorral
Bosque y selva	Bosque de encino Bosque de pino-encino Selva baja caducifolia
Cuerpos de agua	Cuerpos de agua Vegetación acuática
Bosque degradado	
Mosaico	Mosaico
Pastizal	Pastizal

Valle de bravo

La base del esquema de clasificación fue el mapa de uso de suelo y vegetación elaborado por el INEGI, sin embargo por la limitante de las imágenes para identificar vegetación secundaria, se consideró sólo las siguientes clases:

- Agricultura de temporal
- Agricultura de riego
- Pastizal
- Bosque de encino
- Bosque de pino-encino (en esta clase se consideró también el bosque de encino-pino, debido a que en el trabajo de campo se detectaron algunas zonas con la presencia de dicha vegetación, aunque en menor cantidad).
- Bosque de pino
- Bosque de oyamel (en esta clase se consideró la combinación de oyamel y pino)
- Bosque mesófilo de montaña
- Cuerpos de agua
- Zonas urbanas

Guerrero

A diferencia de los dos casos anteriores, en el caso de Guerrero el objetivo era identificar áreas de deforestación, por lo tanto se consideró el siguiente esquema de clasificación.

- Bosque
- Bosque abierto
- Selva
- Agricultura y pastizal
- Cuerpos de agua
- Suelo desnudo
- Otros (se puede considerar: matorral, ciudades, vegetación acuática, nubes, sombras, etcétera)

Clases de no vegetación o uso del suelo

En las imágenes de satélite se identifican elementos de la naturaleza que no corresponden a un esquema de clasificación de la vegetación y uso del suelo; sin embargo es importante considerar estos elementos dentro del proceso de clasificación, porque son parte de la información que nos proporciona los datos de sensores remotos y en ocasiones cubren áreas significativamente grandes, impidiendo la identificación de la cobertura del suelo.

Conforme a los resultados de los tres casos de estudio se definieron las siguientes clases:

- Nubes.- Cuando la nubosidad es lo suficientemente densa es poco probable que se pueda ver que hay debajo de ella. Existe cierta influencia de la

atmósfera que puede ser disminuida por métodos de corrección atmosférica, pero no las nubes densas.

- Sombras.- Debido al ángulo de observación y a la posición del sol al momento del registro de la imagen, se generan sombras por diversos factores, entre ellos la configuración del relieve y la presencia de nubes. Las sombras presentan valores bajos de reflectancia e impiden discernir la cobertura del suelo.
- Fuegos.- En las imágenes de la fecha 2 en los casos de Michoacán y Guerrero, se presentaron fuegos activos asociados a quemas agrícolas o incendios forestales.
- Áreas quemadas.- En el caso de México, si las imágenes son registradas en los meses de enero a mayo, la posibilidad de identificar áreas que han tenido presencia de fuego es muy alta, debido a incendios forestales o por quemas agrícolas.
- Humo.- Generalmente se presenta con reflectancia alta y puede ser diferenciado de la nubosidad por su forma y por la identificación del punto de origen.

III.1.4 Método de clasificación

El tema que más se ha trabajado en el ámbito nacional e internacional con las imágenes de satélite, es sin duda la clasificación de la vegetación y uso del suelo. En el caso de México dos de las instituciones que han generado cartografía a escala 1:250 000, para todo el país, utilizando imágenes de satélite han sido el INEGI y el Instituto de Geografía de la UNAM. En ambos casos se utilizó la interpretación visual (Palacio *et al.*, 2000). El INEGI ha generado dos mapas de Uso del suelo y vegetación para todo México y el Instituto de Geografía el Inventario Nacional Forestal, 2000 – 2001.

Sin embargo hay diversos ejemplos donde se utiliza la clasificación automática. Trejo & Hernández (1996) identifican la selva baja en el estado de Morelos aplicando una clasificación no supervisada. Enfatizan en la dificultad de discernir entre las asociaciones de vegetación y su heterogeneidad, por lo tanto realizan una agrupación de clases afines, por ejemplo bosque templado (incluyeron los bosques de *Abies* sp., *Pinus* spp. y mixto). Mencionan los problemas en la clasificación debido a la configuración del relieve, presencia de cañadas y laderas.

Mas & Ramírez (1996) exponen la ventaja de incluir cartografía temática en la clasificación de las imágenes, para diferenciar entre las clases que presentan confusión espectral, los temas utilizados fueron geología, altitud, clima, pendiente y suelo. Mencionan dos principales limitaciones en el uso de esta técnica a) dificultad para generar las reglas de reclasificación y b) la falta de actualización de la cartografía.

Palacio & González (1994) realizan una comparación entre la clasificación automática y visual, aplican tres tipos: clasificación supervisada, no supervisada y visual, concluyen que la evaluación de exactitud fue mejor en la supervisada, seguida de la visual y por último por medios no supervisados. Enfatizan las limitaciones para diferenciar algunas clases debido al comportamiento espectral y la

aparición visual. Así como en la necesidad del conocimiento en campo para la interpretación visual.

Mas & Ramírez y Palacio & González mencionan que en el proceso de exactitud es necesario agrupar clases afines (por ejemplo bosque de pino/oyamel y bosque de Oyamel), debido a la limitación de las imágenes para diferenciar clases espectrales muy similares.

Álvarez *et al.* (2003) y Lunetta *et al.* (2002) aplican la clasificación no supervisada para evaluar las condiciones del paisaje para todo México. Utilizan imágenes Landsat MSS, de tres fechas diferentes, pertenecientes al proyecto North American Landscape Characterization (NALC). Primero se agrupan los píxeles en clases espectrales aplicando el algoritmo ISOCCLUS, obteniendo aproximadamente 80 clases por imagen, ajustando este número en las zonas áridas de México. Posteriormente las clases resultado son etiquetadas conforme al esquema de clasificación, con la participación de expertos en vegetación y utilizan cartografía temática auxiliar, como fotografía aérea y mapas temáticos escala 1: 250 000, para mejorar las clasificaciones. Fueron aplicadas dos reclasificaciones para llegar a 12 clases establecidas en el esquema de clasificación.

En los trabajos realizados en la Conabio fueron aplicadas diversas técnicas de clasificación automática e interpretación de imágenes, que combinadas mejoraron los resultados. Así mismo se utilizó información y cartografía auxiliar. En cada caso fue necesario realizar ajustes conforme a las particularidades de cada área de estudio, nivel de detalle requerido y elementos poco comunes presentes en las imágenes. A continuación se explicarán los métodos utilizados en los tres casos de estudio.

1. Clasificación no supervisada

Consiste en un proceso automático que se basa en buscar el comportamiento homogéneo de los píxeles considerando el número de bandas espectrales seleccionadas, criterios para medir la similitud de los píxeles, en este caso se utilizó la distancia espectral (distancia euclidiana) y un método de agrupamiento, en este caso fue el ISODATA. Este algoritmo establece el centro de cada grupo, conforme al número establecido por el usuario en forma arbitraria, utilizando el resultado del cálculo de distancia espectral los píxeles son asignados al centro más próximo. Este proceso es iterativo, redefiniendo el criterio para cada grupo, hasta cumplir el número de interacciones establecidas por el usuario o cuando todos los píxeles han sido asignados a una clase. El usuario establece los criterios de distancia mínima entre grupos, tamaño mínimo de grupo y número de grupos o clusters.

En la definición del número de clusters (grupo de píxeles con condiciones espectrales similares) a obtener, se usaron por lo menos 3 veces el número de clases que se espera identificar en la imagen, con el objetivo de evaluar la separabilidad de los datos. Sin embargo esto depende de las características de la imagen, del área de estudio y condiciones ambientales.

El objetivo de aplicar una clasificación no supervisada fue para identificar los problemas de combinación y separación de las clases espectrales para los tipos de

vegetación, por ejemplo: una clase espectral puede estar incluyendo dos tipos de vegetación o el mismo tipo de vegetación es considerado en dos clases espectrales diferentes. Debido a respuesta espectral de los elementos de la superficie terrestre. Este método es útil para la evaluación de la imagen.

En el caso de Guerrero la clasificación no supervisada fue la base para obtener los resultados, debido a que no se contaba con información auxiliar. Las clases obtenidas de la clasificación no supervisada fueron evaluadas visualmente considerando la distribución espacial y su respuesta espectral, de esta forma se definieron las categorías del esquema de clasificación.

2. Índices de vegetación

Se calculó el índice de vegetación denominado NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada), utilizando la banda roja e infrarroja de las imágenes, con el objetivo de discernir las áreas de mayor cobertura de vegetación de aquellas que no presentan o es escasa. En algunos casos ayudó a discernir algunos tipos de vegetación, al utilizar umbrales en los histogramas del NDVI, para identificar las clases de agua, vegetación densa y suelo desnudo.

3. Clasificación supervisada

La clasificación supervisada implica tener un conocimiento previo del área de estudio o por lo menos cartografía o información auxiliar existente. La técnica consiste en reconocer píxeles con características similares conforme a un referente, el cual es denominado campo de entrenamiento o firma espectral. Con base a estos campos se aplica un clasificador basado en estadísticas para que todos los píxeles de la imagen sean clasificados, utilizando ciertas reglas de decisión. En los casos de Michoacán y Valle de Bravo fue utilizado el clasificador de máxima probabilidad.

Se eligieron campos de entrenamiento lo más homogéneos posible, ubicados en el centro de la cobertura a caracterizar, para evitar los efectos de borde o mezcla de coberturas en los píxeles (Sánchez, 1997). Para ello se utilizó la información proporcionada por el mapa de uso de suelo y vegetación producidos por el INEGI. Así como el trabajo de campo para los casos de Michoacán y Valle de Bravo. El proceso de selección de campos de entrenamiento se realizó en dos formas:

- Manual.- El cual consistió en definir un área de interés por medio de interpretación visual, dibujando polígonos procurando cumplir con las recomendaciones antes señaladas.
- Automático.- Basado en las características espectrales de los píxeles vecinos de un píxel seleccionado denominado semilla. Con base a las características de este píxel se busca los píxeles más semejantes a él, utilizando ciertos parámetros espectrales y espaciales, que fueron definidos conforme a las características observadas.

El número de campos de entrenamiento para cada clase estuvo en función de la distribución y extensión, variables estimadas con base a la interpretación visual de la imagen y la cartografía existente. Así mismo se consideraron las diferentes

respuestas espectrales de una misma cobertura, por ejemplo diferentes cuerpos de agua y tipos de agricultura. Fueron considerados por lo menos 5 campos de entrenamiento para cada clase establecida en el esquema de clasificación.

4. Asignación de píxeles

Una vez evaluados los campos de entrenamiento se aplicó el clasificador de máxima probabilidad, para asignar los píxeles a las diferentes clases definidas por medio de los campos de entrenamiento.

El resultado fue revisado y a partir de los mismos se adecuaron los campos de entrenamiento las veces necesarias, hasta que después de una revisión visual general se logró considerarlo como adecuado.

5. Unión de resultados y revisión general

En los casos de Michoacán y Valle de Bravo la clasificación supervisada fue modificada con los resultados obtenidos del índice de vegetación, e información auxiliar. Finalmente fue aplicada una interpretación visual para corregir detalles inesperados, como confusión de clases o clases identificadas con anterioridad como fuegos.

En los casos de Michoacán y Guerrero para definir los fuegos activos y las áreas quemadas se utilizaron las bandas 6 y 7. Para los fuegos activos se utilizaron los umbrales mayor o igual a 170 en la banda 6 y en la banda 7 el valor fuera mayor o igual a 200. (Los valores 170 y 200 son los niveles digitales de las imágenes). Mientras la identificación de las áreas quemadas se realizó con interpretación visual.

La banda 6 de las imágenes Landsat tiene una resolución espectral de 10.40 y 12.50 μm , que corresponde al infrarrojo térmico, registra la energía emitida por la Tierra, mientras la banda 7 cubre a la región de 2.08 – 2.35 μm corresponde al infrarrojo reflejado. El comportamiento de la vegetación en la banda 7 es de la siguiente manera: cuando se encuentra con vigor existe menor reflectancia debido a la presencia de agua que absorbe la energía, cuando la vegetación se quema existe mayor reflectancia en la banda 7 por la disminución de la humedad.

El uso de la cartografía auxiliar fue aplicado en los casos de Michoacán y Valle de Bravo, en casos específicos como:

En Michoacán la respuesta de un tipo de agricultura de riego era muy semejante a la respuesta de bosque localizado en las partes más altas de los cerros. Por lo tanto, fue utilizada la variable de la pendiente para discernir entre estas dos clases. Considerando que los sistemas de riego no funcionan por arriba del 3 % de inclinación del terreno.

En Valle de Bravo se utilizó la variable de altitud para diferenciar entre bosque de oyamel y bosque de pino. En la clasificación de la imagen se utilizó sólo la clase de bosque de pino y con la ayuda de la altitud se cambió a la clase de

oyamel. Al considerar que este tipo de bosque sólo se desarrolla por arriba de los 2900 msnm.

En Guerrero fue realizada una interpretación visual para definir la clase *bosque*, por ser ésta la de mayor interés, el resultado de este paso fue sustituido en la clasificación no supervisada.

Finalmente se realizó una revisión minuciosa de las clasificaciones realizando adecuaciones conforme se encontraba incongruencias, basados en la cartografía auxiliar e interpretación visual. De esta forma se obtuvieron los mapas de vegetación y uso de suelo a partir de las imágenes de satélite.

III.1.5 Trabajo en campo

El trabajo en campo fue realizado para los casos de Michoacán y Valle de Bravo. La participación de personal con conocimientos de vegetación es indispensable en el equipo de trabajo para la identificación correcta de la vegetación. En el primer caso participo el Biol. Daniel Ocaña y en el segundo el Biol. Pedro Díaz, ambos miembros de la Subdirección de Sistemas de Información Geográfica de la Conabio.

El trabajo en campo se dividió en dos etapas, la primera etapa fue el trabajo en gabinete, cuyo objetivo fue definir los sitios de interés a visitar conforme a los criterios de confusión de clases, dudas de cambio entre la información reportada en los mapas y los datos de las imágenes de satélite, así como la accesibilidad, debido a que se contaba con tiempo reducido para el desarrollo de esta etapa. Durante el trabajo en gabinete se preparó una ficha de campo por cada sitio a visitar. La ficha contiene los siguientes rubros:

- Datos de localización del sitio
- Identificador único
- Nombre (compuesto por la fecha y el identificador único)
- Localidad, municipio y estado
- Coordenadas geográficas en gabinete (obtenidas de las imágenes)
- Coordenadas geográficas en campo (este rubro sería llenado en campo utilizando GPS)
- Copia de la cartografía 1:50 000, identificando el sitio de interés
- Información sobre la vegetación o uso del suelo
- Tipo de vegetación esperada conforme a la clasificación obtenida
- Tipo de vegetación encontrada en campo
- Características de la estructura de la vegetación
 - Tipo de vida dominante
 - Altura de los estratos observados (arbóreo, arbustivo y herbáceo)
 - Porcentaje de cobertura horizontal de los estratos observados
- Especies observadas
- Espacio para incluir el número de fotografía
- Perturbaciones (tipo de perturbación)
- Observaciones

La segunda etapa consistió en la visita en campo, el tiempo de duración varió en los dos casos, debido a la extensión del área de estudio y a la disponibilidad de recursos.

Michoacán

El trabajo en campo se realizó en el mes de septiembre de 1999 con 5 días de duración. Fueron recorridas diversas áreas de interés para la identificación de la vegetación y uso del suelo, se obtuvieron 94 puntos de verificación. Esta información fue esencial para modificar los campos de entrenamiento, realizándose cambios y adecuaciones a la clasificación de las imágenes, principalmente en las categorías de selva baja y bosque.

Valle de Bravo

El trabajo de campo se realizó los días 22 y 23 de septiembre de 2000. Se recorrieron diversas áreas de interés, con el objetivo de corroborar los límites e identificar el uso de suelo y la vegetación dominante, obteniéndose 24 puntos de verificación. La información de campo fue esencial para la clasificación de las imágenes.

En algunas de las ocasiones no se podía llegar al punto localizado en gabinete, pero se procuraba llegar lo más cerca posible, por otra parte si a lo largo del trayecto se ubicaba algún otro sitio de interés fue registrado y elaborada su ficha correspondiente.

Guerrero

No se realizó trabajo en campo

III.1.6 Resultados

Michoacán

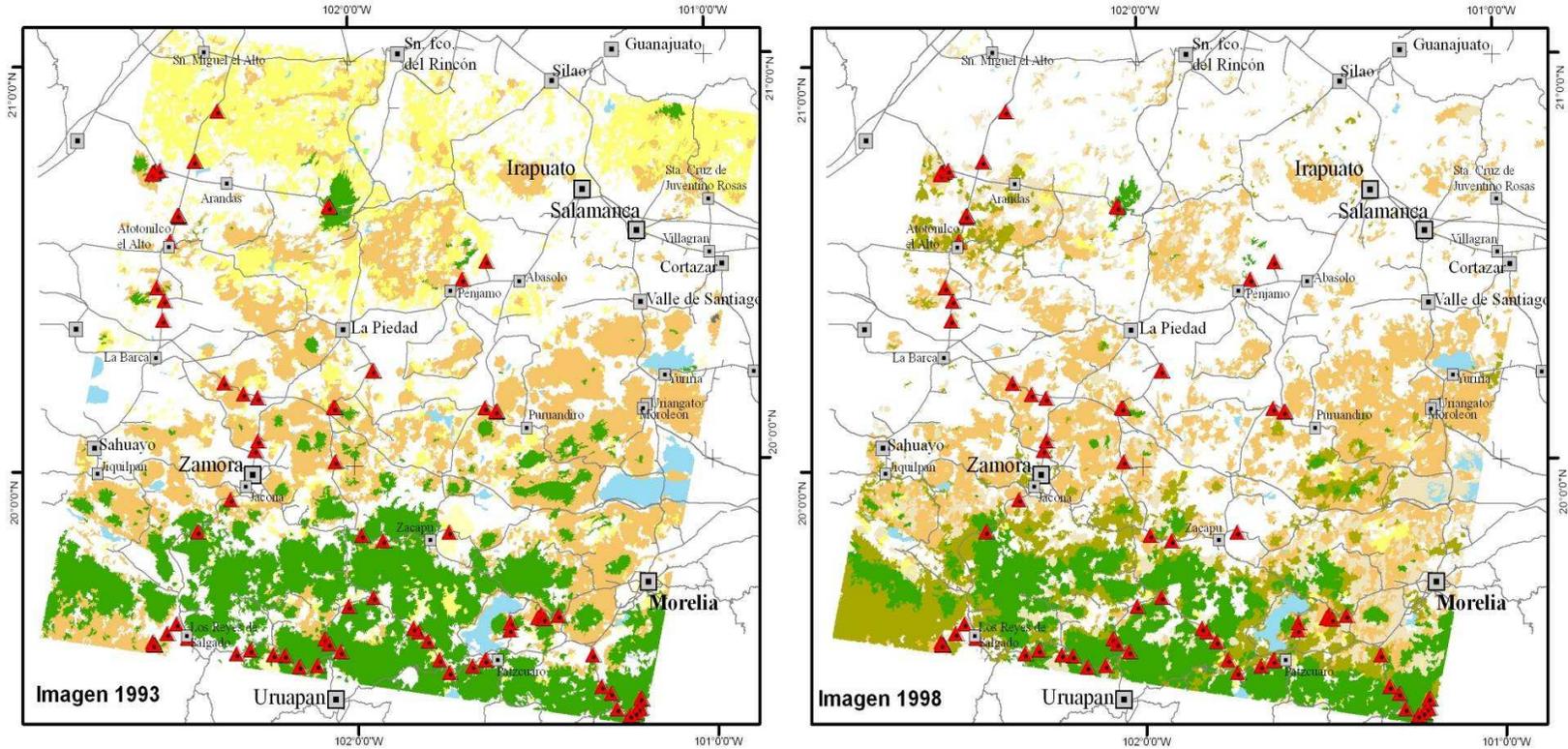
Los resultados numéricos se presentan en la tabla III.3 y la gráfica III.1, mientras la distribución espacial en el mapa III.2. El año de 1998 fue un año con sequía prolongada, debido a la presencia del fenómeno de El ENOS durante el año 1997, situación que se manifestó en los datos de la imagen de satélite del año 1998. Durante este año se identificaron áreas quemadas que fueron incluidas en la clase sin vegetación. El humo e incendios activos fueron eliminados al aplicar el área mínima cartografiada de 50 ha (establecida por el proyecto TREES).

Tabla III.3 Vegetación y Uso del suelo, caso Michoacán

	IMAGEN DE 1993		IMAGEN DE 1998	
	Ha	%	Ha	%
Agricultura	1,390,191.15	46.40	1,597,962.41	53.34
Áreas sin vegetación	40,883.49	1.36	282,260.57	8.83
Matorrales	608,275.38	20.30	500,335.77	16.70
Bosques y selvas	482,859.53	16.12	302,539.40	10.10
Cuerpos de agua	56,849.61	1.90	26,526.67	0.89
Mosaico	367.43	0.01	259,596.06	8.67
Pastizal	416,388.21	13.90	26,593.92	0.89
Total	2,995,814.80	100.00	2,995,814.80	100.00

Vegetación y uso del suelo, caso Michoacán

79



Simbología

Localidades

- 20001 - 50000
- 50001 - 100000
- 100001 - 600000
- ▲ Puntos de trabajo en campo
- Carreteras principales

Vegetación y uso del suelo

- Agricultura (temporal y riego)
- Pastizal (cultivado, inducido, natural)
- Matorral
- Bosques y selva baja
- Mosaico
- Sin vegetación aparente
- Cuerpos de agua

Proyección cartográfica: UTM
 Datum: NAD27
 Esferoide: Clarke 1866
 Zona : 13 norte

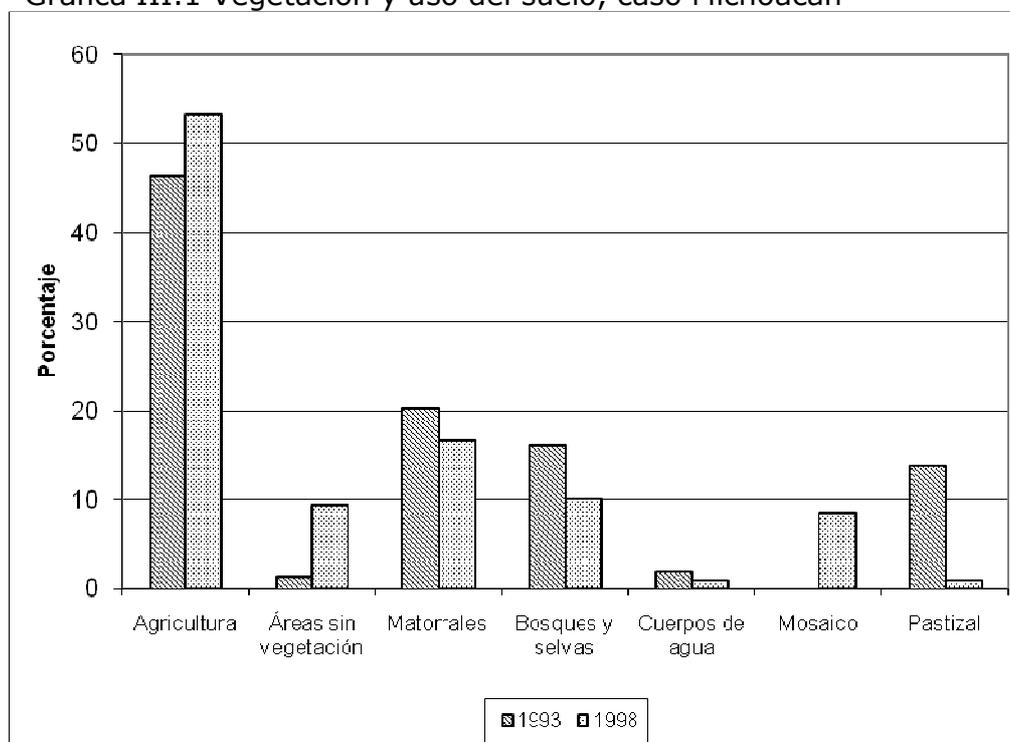
FUENTE:
 - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (1999) Análisis de cambio de uso de suelo y vegetación, Caso Michoacán
 - Imágenes de satélite LANDSAT TM de 1993 y 1998
 - Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (1995) Censo de población y vivienda 1995
 - Instituto Mexicano del Transporte (1996) "Carreteras"
 - Trabajo en campo realizado en septiembre de 1999



Elaboró: María Isabel Cruz López (2008)

Mapa III.2

Gráfica III.1 Vegetación y uso del suelo, caso Michoacán



Valle de Bravo

Los resultados cuantitativos se pueden ver en la tabla III.4 y gráfica III.2, mientras la distribución espacial en el mapa III.3. El mapa presenta sólo las clasificaciones de los años 1973 y 2000, con la finalidad de comparar el cambio del año inicial y final.

Tabla III.4 Vegetación y uso del suelo, caso Valle de Bravo

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN	1973		1986		2000	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Agricultura de temporal	15,327.5	24.9	15,710.7	25.5	19,923.8	32.4
Agricultura de riego	1,301.4	2.1	2,346.57	3.8	1,129.86	1.8
Pastizal	5,630.4	9.1	6,896.88	11.2	4,293.45	7.0
Bosque de encino	602.19	1.0	447.48	0.7	410.22	0.7
Bosque de pino-encino	17,048.1	27.7	17,563.5	28.5	18,080.8	29.4
Bosque de pino	15,066.9	24.5	12,021.6	19.5	11,295.5	18.3
Bosque de oyamel	4,754.34	7.7	47,39.13	7.7	4,527.81	7.4
Bosque mesófilo de montaña	8.82	0.0	6.93	0.0	6.21	0.0
Cuerpos de agua	1,768.05	2.9	1,756.8	2.9	1,795.5	2.9
Zona urbana	53.91	0.1	72.09	0.1	98.46	0.2
Total:	61,561.6	100.0	61,561.7	100.0	61561.61	100.0

Fuente: Conabio 2002 http://www.Conabio.gob.mx/conocimiento/cambios_veg/doctos/resultados_valle.html

Vegetación y uso del suelo, caso Valle de Bravo

82

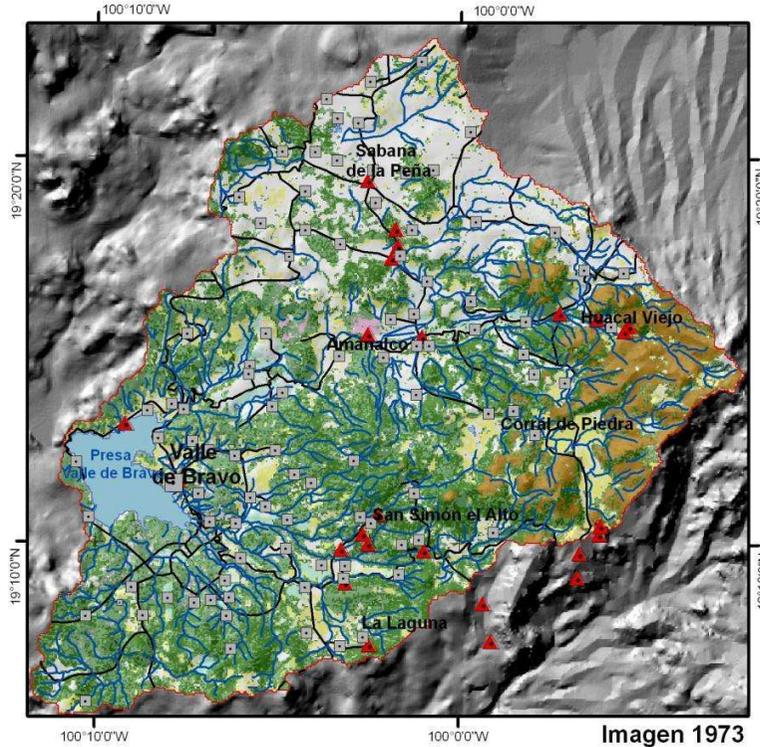


Imagen 1973

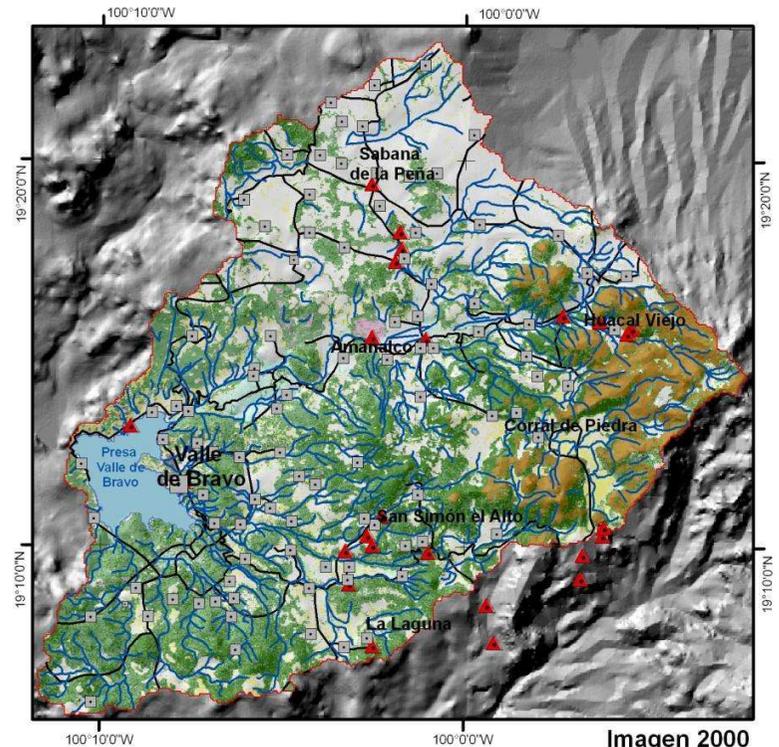


Imagen 2000

Simbología

- Puntos de trabajo en campo
- Ríos
- Carreteras
- Localidades

Vegetación y uso del suelo

- | | |
|-------------------------|----------------------------|
| Agricultura de temporal | Bosque mesófilo de montaña |
| Agricultura de riego | Cuerpo de agua |
| Pastizal | Zona urbana |
| Bosque de encino | |
| Bosque de pino - encino | |
| Bosque de pino | |
| Bosque de oyamel | |

Proyección cartográfica UTM
Datum NAD27
Esferoide : Clarke 1866
Zona : 14 norte

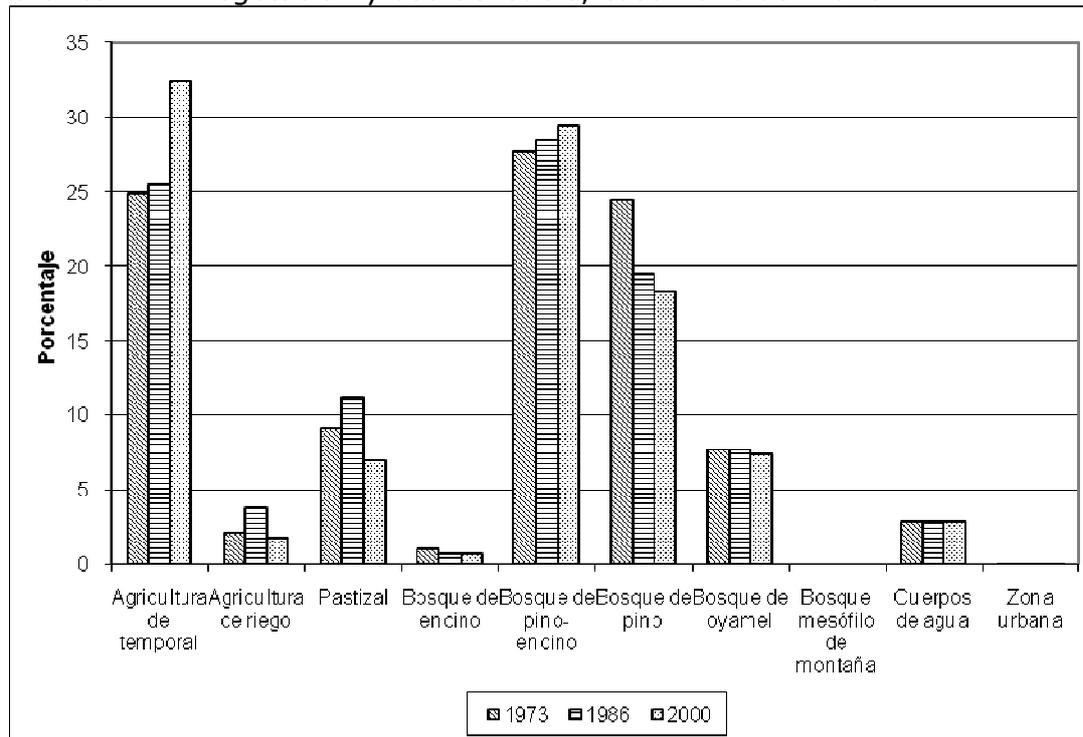
FUENTE:
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2000)
- Análisis de cambio de uso de suelo y vegetación, Caso Valle de Bravo
- Imágenes de satélite LANDSAT MSS 1973 y ETM+ 2000
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (1995)
- Censo de población y vivienda 1995
- Instituto Mexicano del Transporte (1996) "Carreteras"
- Trabajo en campo realizado en septiembre de 2000



Elaboró: María Isabel Cruz López (2008)

Mapa III.3

Gráfica III.2 Vegetación y uso del suelo, caso Valle de Bravo



Guerrero

Los resultados se muestran en la tabla III.5, gráfica III.3 y mapa III.4. Para la interpretación de los datos se debe tomar en cuenta que los resultados corresponden a una clasificación no supervisada y no se contó con información de campo, por lo tanto los resultados no están verificados por lo que existe mayor posibilidad de confusión y error.

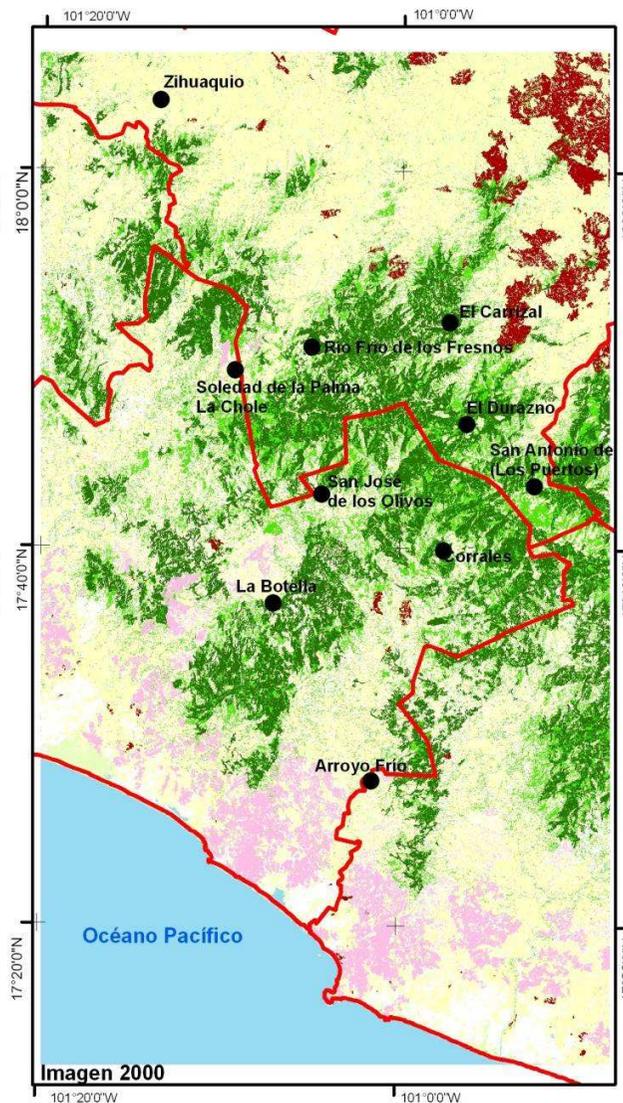
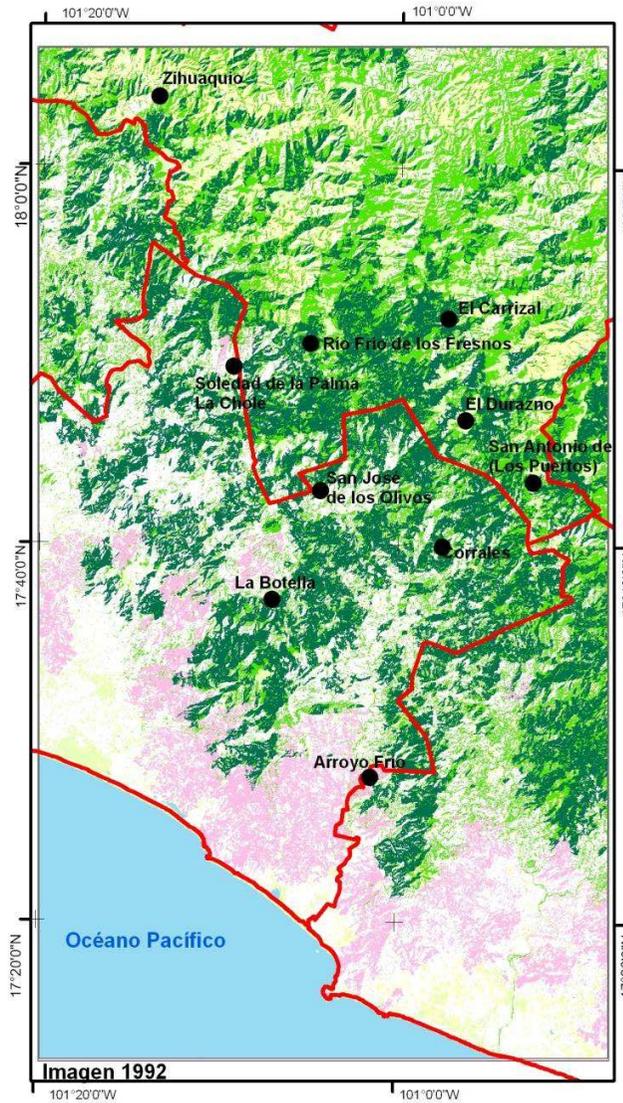
Tabla III.5 Vegetación y uso del suelo, caso Guerrero

	IMAGEN DEL DÍA DE 24 DE OCTUBRE DE 1992		IMAGEN DEL DÍA DE 13 DE ABRIL DE 2000	
	Ha	%	Ha	%
Bosque	122,331.00	22.07	78,542.00	14.14
Bosque abierto	103,872.00	18.74	61,205.00	11.02
Selva baja	34,967.00	6.31	26,096.00	4.70
Agricultura y pastizal	169,029.00	30.50	111,146.00	20.01
Agua	67,237.00	12.13	68,598.00	12.35
Suelo desnudo	37,736.00	6.81	168,232.00	30.29
Otros	19,023.00	3.43	29,193.00	5.26
Áreas quemadas	-	0.00	12,345.00	2.22
	554,196.00	100.00	555,357.00	100.00

Fuente: CONABIO 2002

http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/cambios_veg/doctos/resultados_guerrero.html

Vegetación y uso del suelo, caso Guerrero



Simbología

- Localidades
- División Municipal

Vegetación y uso del suelo

- Bosque
- Bosque abierto
- Selva baja
- Agricultura y pastizal
- Agua
- Suelo desnudo
- Otros
- Áreas quemadas

Kilómetros
0 5 10 20

Proyección cartográfica: UTM
Datum: NAD27
Esperide: Clarke 1866
Zona: 14 norte

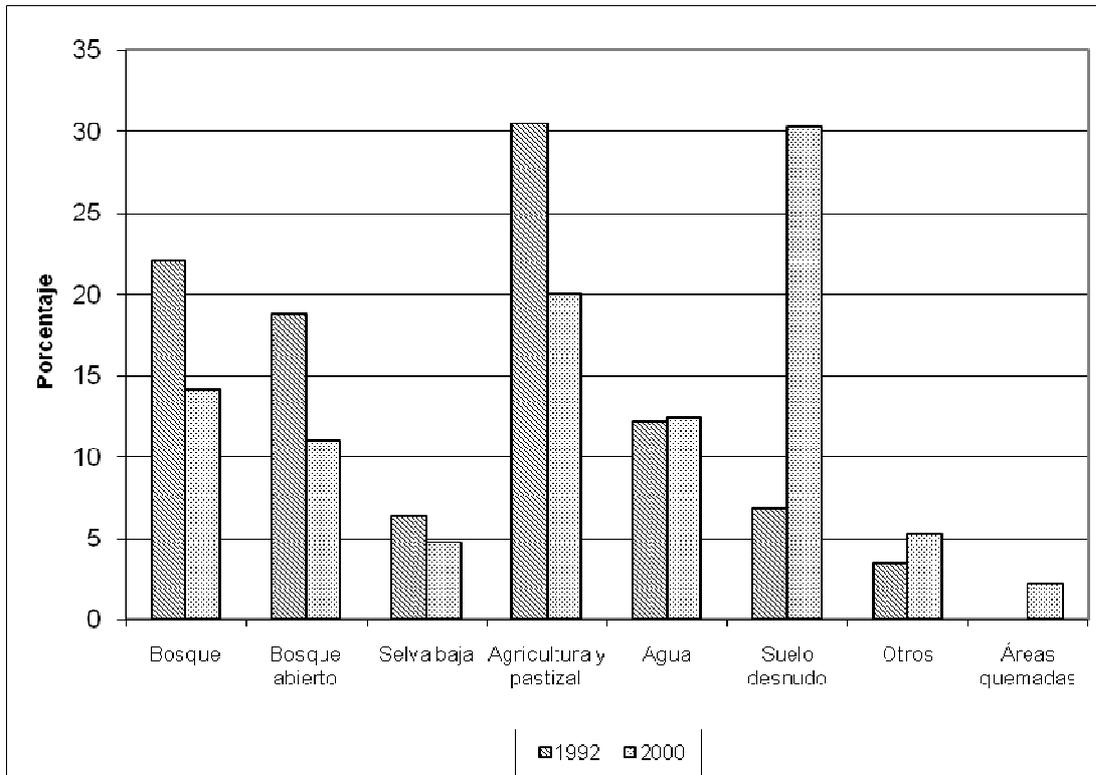
FUENTE

- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2000) Identificación de zonas de bosque en el estado de Guerrero
- Imágenes de satélite LANDSAT TM y ETM+ de 1992 y 2000
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (1995) "Censo de población y vivienda 1995"
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2006) "División Municipal de México, 2005".



Elaboró: María Isabel Cruz López (2008)
Mapa III.4

Gráfica III.3 Vegetación y uso del suelo, caso Guerrero



III.1.7 Análisis de cambio de uso de suelo

En percepción remota existen diversas técnicas para el análisis de cambio de vegetación y uso del suelo, tales como diferencia entre imágenes, cocientes multitemporales, vectores multitemporales, análisis de series de tiempo, análisis posclasificación, entre otros.

Debido a las diferencias de las imágenes como niveles de pre-procesamiento, fecha de registro (con excepción del caso Michoacán), resolución espacial, radiométrica y espectral, por ser imágenes de sensores distintos; se decidió aplicar el método posclasificador, el cual consiste en la comparación de los mapas generados a partir de la clasificación de las imágenes.

Las imágenes utilizadas en los tres casos de estudio fueron registradas en la época seca del año, de octubre a abril. Sin embargo existen diversos factores que deben ser tomados en cuenta para el análisis de cambio, por ejemplo el mes de octubre corresponde al periodo posterior a la época de lluvia, por lo tanto, la vegetación tiende a conservar aún la humedad y se observa vigorosa. Mientras el mes de abril es uno de los meses más secos, cuando la vegetación ha perdido hojas y la influencia del suelo es fuerte, principalmente en aquellas zonas donde la distribución horizontal de la vegetación es abierta, esto no necesariamente es un cambio de vegetación. Por otra parte en este mes la presencia del fuego (ya sea por incendios forestales o quemas agrícolas) es muy importante.

Finalmente situaciones poco comunes, como el año de 1998 con sequía extrema, influyen en la respuesta espectral de los diferentes tipos de cobertura del suelo. Como el caso de Michoacán, donde a pesar de que ambas imágenes fueron registradas en el mes de marzo. La imagen de la segunda fecha se observa diferente, debido a que en el año de 1998 México se vio afectado por el fenómeno ENOS. Provocando condiciones de sequía en la mayor parte del país, viéndose reflejado en la escasa o nula precipitación, como resultado de ello se registro una disminución en la superficie en las categorías de agua y bosque entre otros.

Considerando estos antecedentes a continuación se presentan los resultados de cambio de uso del suelo mediante mapas y una matriz de cambios en porcentaje.

Michoacán

El resultado de la clasificación fue transformado a formato vector y por factor de escala cartográfica fueron eliminados polígonos menores a 50 ha. Los resultados se muestran en el mapa III.5 y tabla III.6

Tabla III.6 Matriz de cambio en porcentaje caso Michoacán

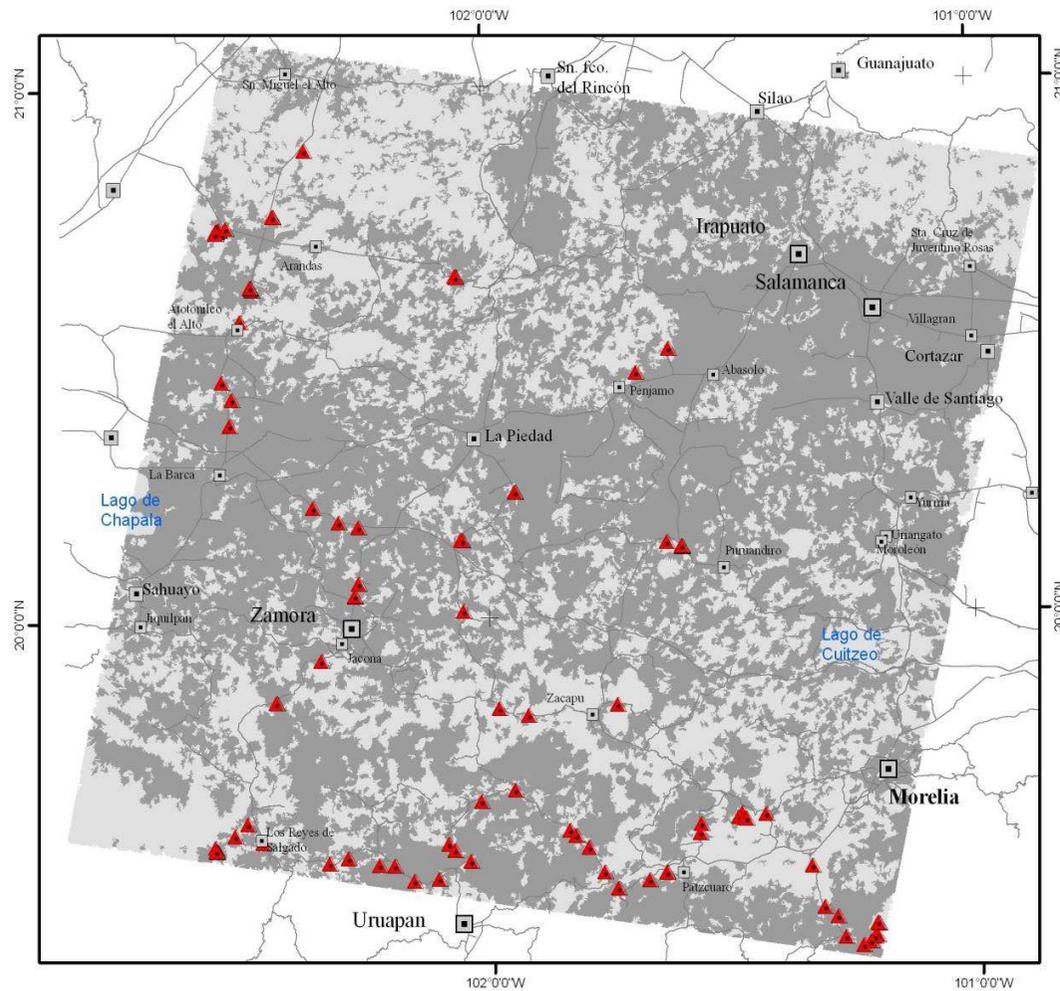
		CLASES DE LA IMAGEN DE 1993						
		Agricultura	Áreas sin vegetación	Matorrales	Bosques y selva baja	Cuerpos de agua	Mosaico	Pastizal
CLASES DE LA IMAGEN DE 1998	Sin datos	0	0	2	1	0	0	0
	Agricultura	78	45	12	4	21	38	93
	Áreas sin vegetación	7	55	14	7	29	20	3
	Matorrales	5	0	64	7	1	0	2
	Bosques y selva baja	1	0	0	59	0	0	0
	Cuerpos de agua	0	0	0	0	45	0	0
	Mosaico	8	0	7	22	4	41	0
	Pastizal	1	0	1	0	0	0	1
	Total	100	100	100	100	100	100	100

Los cambios identificados están relacionados con un aumento en las clases de agricultura a costa de la clase "Pastizal", "Mosaico", "Cuerpos de Agua" y "Matorral". Así como un aumento en la clase "áreas sin vegetación" a costa de las clases "Cuerpos de agua", "Mosaico" y "Matorrales".

Algunos de estos cambios obedecen principalmente a la disminución de precipitación en el año 1998, como fue citado anteriormente. Ejemplo de ello se observa en el cambio de la clase "bosque y selva baja" a mosaico el cual representa el 22%, porque la vegetación presentaba condiciones de sequía y era susceptible a eliminarse. Mientras la clase "mosaico" cambia el 20 % a área sin vegetación, que puede estar asociado a las áreas quemadas. El cambio de la clase "cuerpos de agua" a la clase "áreas sin vegetación" (29%), debido a la reducción del nivel de agua, principalmente en el lago de Cuitzeo, mientras el 21% cambia a la actividad agrícola, registrándose principalmente en las inmediaciones del lago de Chapala.

Detección de cambio en vegetación y uso del suelo, caso Michoacán 1993 - 1998

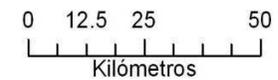
87



- Simbología**
- Localidades**
- 20001 - 50000
 - 50001 - 100000
 - 100001 - 600000
 - ▲ Puntos de trabajo en campo
 - Carreteras principales

Áreas de cambio

- Áreas de cambio
- Áreas de sin cambio



Proyección cartográfica UTM
Datum NAD27
Esperoide : Clarke 1866
Zona : 13 norte

- FUENTE:**
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (1999) Análisis de cambio de uso de suelo y vegetación, Caso Michoacán
 - Imágenes de satélite LANDSAT TM de 1993 y 1998
 - Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (1995)
 - Censo de población y vivienda 1995
 - Instituto Mexicano del Transporte (1996) Carreteras
 - Trabajo en campo realizado en septiembre de 1999



Elaboró: María Isabel Cruz López (2008)

Mapa III.5

Valle de Bravo

La diferencia de la resolución espacial (60 y 30 m) influyó determinadamente en la identificación de cambios, por lo tanto los resultados fueron entregados en forma tabular (tabla III.4). Sin embargo para el presente informe se realizó el mapa y la matriz de cambio correspondiente. Los mapas resultantes de las clasificaciones fueron recodificados a 4 categorías, debido a la confusión espectral (Mas & Ramírez, 1996; Palacio & Luna, 1994) y la diferencia espacial. como se presenta en la tabla III.7:

Tabla III.7 Categorías de comparación Valle de Bravo

CATEGORÍA	CLASES
1 Agropecuario	Agricultura de temporal, Agricultura de riego, Pastizal
2. Bosques	Bosque de encino, Bosque de pino-encino, Bosque de pino, Bosque de oyamel, Bosque mesófilo de montaña
3. Cuerpos de agua	
4. Zona urbana	

En la tabla III.8a y III.8b y mapa III.6 se presentan los resultados del cambio. En el mapa se identifican cambios principalmente en el borde de las categorías, los cuales se deben principalmente a la diferencia de resolución espacial, pero también al avance de las actividades agropecuarias.

Tabla III.8a Matriz de cambio en porcentaje caso, Valle de Bravo

		Categorías imagen 1973			
		Agropecuario	Bosques	Agua	Zona Urbana
Categorías imagen 2000	Agropecuario	87	16	2	14
	Bosques	12	84	2	19
	Agua	0	0	96	0
	Zona Urbana	0	0	0	67
	Total	100	100	100	100

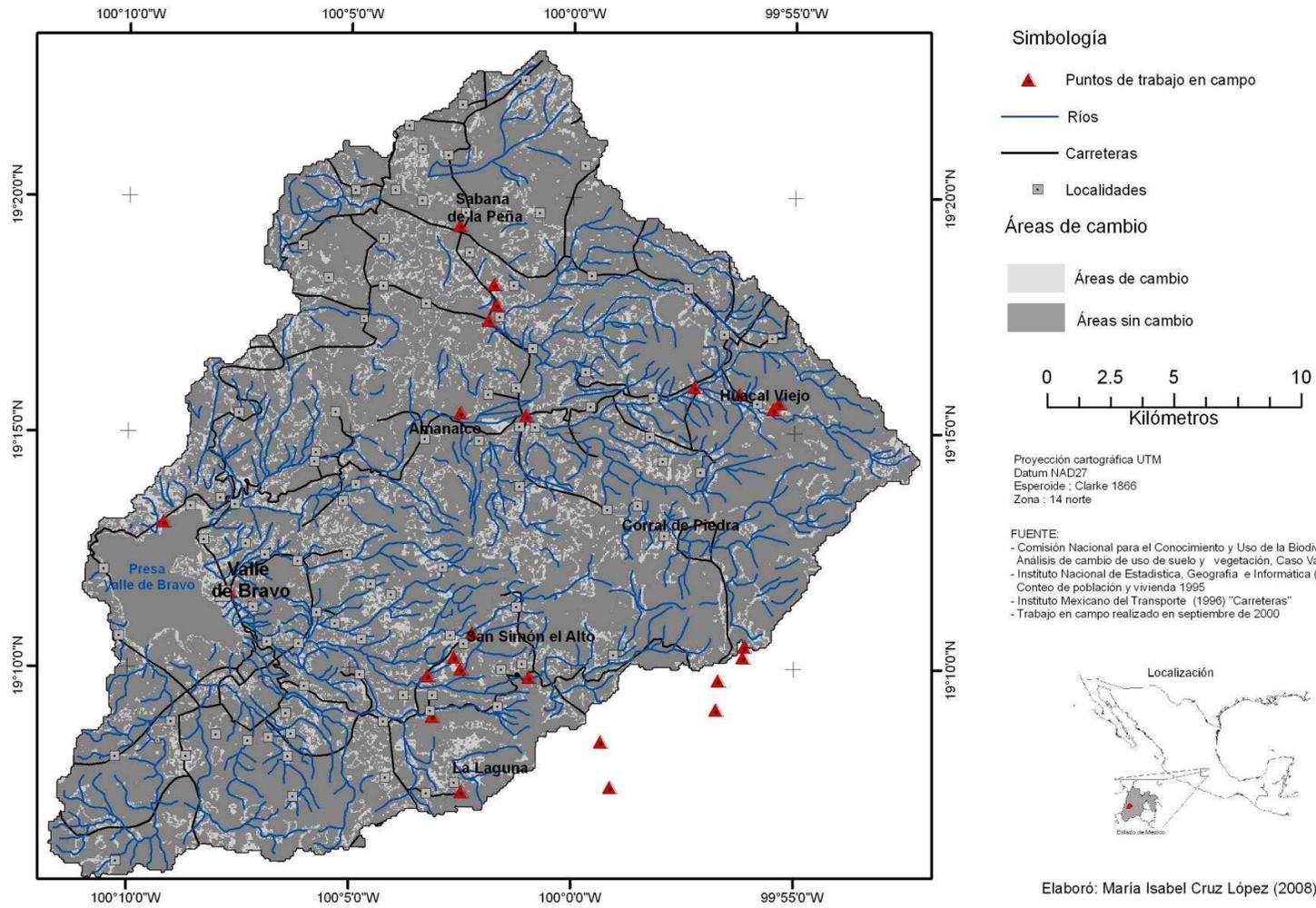
Para un mejor entendimiento de los cambios ocurridos se presentan los resultados del cambio en hectárea.

Tabla III.8b Matriz de cambio en hectáreas caso, Valle de Bravo

		Categorías imagen 1973			
		Agropecuario	Bosques	Agua	Zona Urbana
Categorías imagen 2000	Agropecuario	19400,76	5895,63	43,20	7,47
	Bosques	2738,25	31539,06	33,12	10,17
	Agua	73,62	30,42	1691,46	0,00
	Zona Urbana	46,71	15,21	0,27	36,27
	Total	22259,34	37480,32	1768,05	53,91

Detección de cambio en vegetación y uso del suelo, caso Valle de Bravo 1973 - 2000

06



mapa III.6

La categoría bosque tiende a disminuir principalmente porque el 16% se transforma a actividad agropecuaria, identificándose principalmente en las zonas planas, como ejemplo en la localidad La Laguna, localizada al sur de la cuenca, o por la eliminación de áreas de la categoría "Bosque" en el extremo noreste de la cuenca.

En la matriz de porcentaje el cambio de zona urbana a otros usos es relativamente alto, esto obedece a la diferencia de resolución espacial, por ejemplo la imagen Landsat ETM+ permitió identificar zonas arboladas en la orilla de la ciudad que fueron clasificadas como bosque, o áreas con muy baja vegetación que se pudo clasificar como pastizal.

Si se observa la matriz de cambio en hectáreas se identifica en aumento de la categoría zona urbana a costa de las actividades agropecuarias (46.71 ha) y bosque (15.21 ha), esto obedece al crecimiento de la ciudad de Valle de Bravo y fraccionamientos construidos en la orilla de la presa.

Guerrero

En el caso de Guerrero los resultados fueron presentados en forma de tablas y para identificar los cambios espaciales se realizó la comparación de los mapas, los resultados se presentan en la tabla III.9 y mapa III.6.

Tabla III.9 Matriz de cambio en porcentaje caso Guerrero

		Clases imagen 1991						
		Bosque	Bosque abierto	Selva	Agricultura o pastizal	Agua	Suelo desnudo	Otros
Clases imagen 2000	Bosque	44	15	1	3	0	2	15
	Bosque abierto	21	18	3	7	0	3	13
	Selva	0	0	43	6	0	0	1
	Agricultura y pastizal	13	22	22	32	0	17	18
	Agua	0	0	0	0	100	0	2
	Suelo desnudo	12	31	27	47	0	70	35
	Otros	7	10	4	3	0	4	15
	Área quemada	2	4	0	2	0	4	3
Total	100	100	100	100	100	100	100	

Nota: en el año 1991 no se identificaron áreas quemadas

La clase que presenta mayor transformación es "bosque abierto". El 31% pasa a "suelo desnudo" y el 22% a la clase "agricultura y pastizal".

El 60 % de la clase "bosque" cambia a otra clase, el cambio más significativo es a "bosque abierto con el 21 %". Este cambio es de gran importancia para análisis posteriores de deforestación.

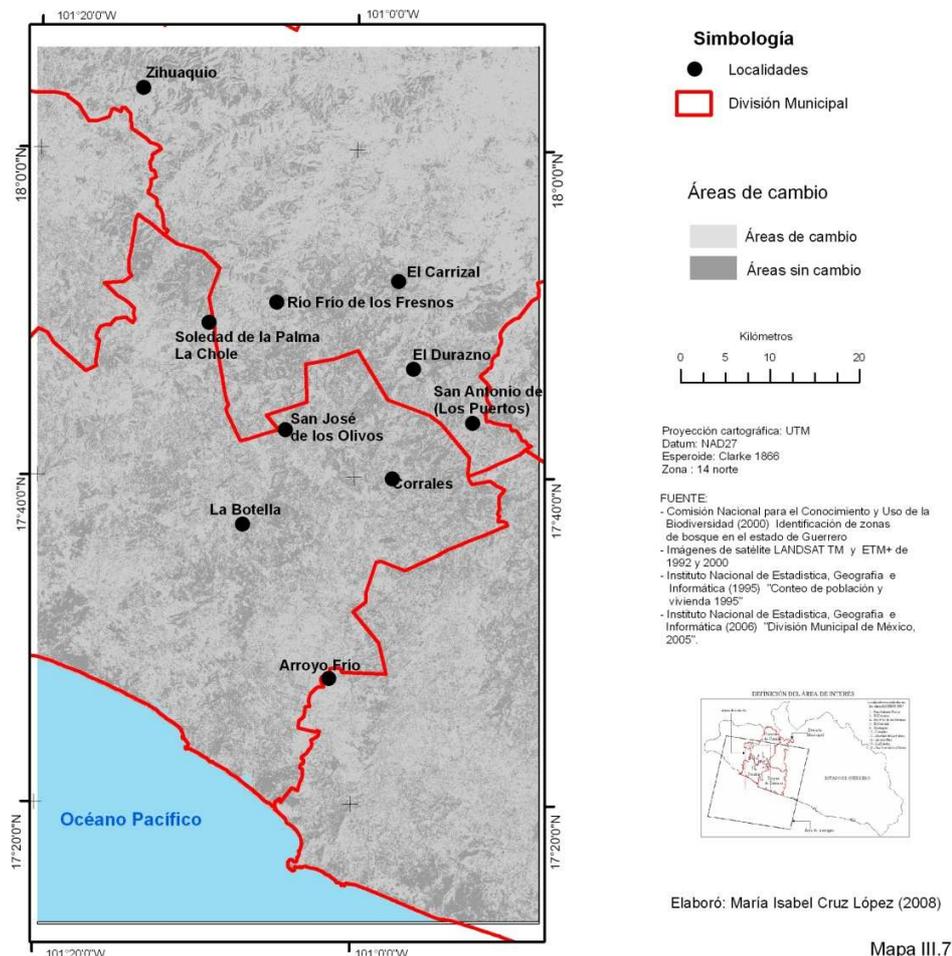
La clase "agricultura y pastizal" presenta una disminución, debido a que el 46% de esta clase pasa a "suelo desnudo".

Las 12,354 ha de la clase "áreas quemadas" identificadas en el año 2000 (ver tabla III.5 pag.77), corresponden principalmente en zonas definidas como "bosque abierto", "suelo desnudo" y "agricultura y pastizal", esto puede indicar el origen del fuego, incendio forestal o quemas agropecuarias identificadas en la imagen.

La clase "selva" también presenta un cambio hacia "suelo desnudo" y "agricultura y pastizal", en esta clase se debe considerar que las características de selva en esta zona y por la fecha de la imagen, puede presentar reducida respuesta de vegetación, al perder las hojas en temporada de estiaje.

La clase que presenta un fuerte incremento es el "suelo desnudo" (ver tabla III.5 pag.77) que pasa del 6% al 30%, el cual esta asociado a los puntos anteriores.

Detección de cambio en vegetación y uso del suelo, caso Guerrero 1992 - 2000



El desarrollo de los tres casos de análisis de cambio de vegetación y uso del suelo, permitió adquirir conocimiento en el tema, así como proporcionar información útil a los usuarios que la requerían. Sin embargo se considera que faltó realizar el seguimiento a estos proyectos, con excepción del caso Valle de Bravo, ya que en el

año 2007 se realizó la actualización del mapa de uso del suelo y vegetación utilizando imágenes de satélite SPOT.

Por otra parte permitió valorar los alcances y limitaciones del uso de este tipo de imágenes de satélite en el desarrollo del programa de monitoreo de ecosistemas de la Conabio. Una forma de medir las limitaciones es la detección de posibles errores en la identificación de cambio, debido a los errores de la clasificación. Para ello se calculó el porcentaje de cambios dudosos, considerados en esta categoría, porque es difícil que ocurran en condiciones naturales en el periodo de tiempo que se analizaron las imágenes. Estos cambios fueron:

Caso Michoacán

Agricultura a bosque y selva baja, matorral, mosaico
Matorral a bosque y selva baja
Bosque y selva a matorral

Los cambios dudosos suman el 7.5% de 2,995,814.8 ha. De estos el más repetido fue de agricultura a mosaico.

Caso Valle de Bravo

Agricultura a bosque
Bosque a agua
Agua a bosque
Zona urbana a agricultura, bosque

Los cambios dudosos sumaron el 4.7 % de 682,891 ha. El cambio con mayor cobertura fue de agricultura a bosque. En este caso la diferencia de la resolución espacial de 60 y 30 m es una variable a considerar en el análisis.

Caso Guerrero

Selva a bosque, bosque abierto
Agricultura a bosque, bosque abierto
Agua a bosque, bosque abierto, selva, otros, área quemada
Suelo desnudo a bosque, bosque abierto, selva
Otros a bosque, bosque abierto, selva

Los cambios sumaron el 4.7% de 553,279.06 ha, los casos con mayor repetición fueron de agricultura a bosque o bosque abierto.

Las imágenes de satélite son una herramienta básica para el monitoreo de ecosistema, sin embargo es de suma importancia tomar en consideración diferentes aspectos de relevancia para el entendimiento del comportamiento de la naturaleza y de la influencia del humano. Como es la resolución de las imágenes, condiciones dominantes en el momento del registro de las imágenes y el trabajo de campo.

III.2 Estudios actuales de monitoreo de ecosistemas

La implementación del programa de monitoreo de ecosistemas ha recobrado fuerza para desarrollarse tanto a nivel de ecosistema individual a escala nacional, por ejemplo manglares, como a nivel de la distribución de todos los ecosistemas. Es en el mes de mayo de 2006, cuando la coordinación de percepción remota (CPR) realizó adecuaciones al objetivo de este programa, quedando de la siguiente forma:

“Caracterizar espacial y temporalmente los ecosistemas con técnicas de percepción remota para contribuir en el seguimiento y conocimiento de la biodiversidad.” (Conabio, 2006:1).

De esta manera no solo se enfoca al estudio de la vegetación sino a otros ecosistemas, como los oceánicos. Actualmente la CPR realiza diversos proyectos enfocados al monitoreo de ecosistemas a escala nacional, a nivel de vegetación y de ecosistemas específicos. La realización de estos proyectos es gracias a la participación de todos los miembros de la coordinación, así como a cada uno de los responsables en alcanzar los objetivos y metas propuestos.

Monitoreo de cambios de uso del suelo

Como el monitoreo de la vegetación formó parte de la iniciativa de la creación del área de percepción remota, actualmente se tiene como objetivo “crear un sistema de monitoreo de la cobertura de la tierra con herramientas de percepción remota y Sistemas de Información Geográfica –SIG- (complementando con los procesos convencionales) para obtener información de manera más rápida y expedita de la cobertura del suelo para todo México” (Plan de trabajo, 2008).

Para este proyecto se tiene establecido trabajar con imágenes MODIS, debido a su resolución temporal que permite contar con información oportuna.

Monitoreo sistematizado a largo plazo de los manglares de México

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar un programa de monitoreo sistematizado a largo plazo a través de indicadores ambientales, para determinar las condiciones de la vegetación y los principales agentes de transformación de los manglares de México. El proyecto tuvo su inicio en mayo de 2006 y como producto final es el mapa de distribución actual del manglar, escala 1:50 000. Los resultados se encuentran en la página WEB de la Conabio, en la siguiente liga:

[http://www. Conabio.gob.mx/conocimiento/manglares/doctos/manglares.html](http://www.Conabio.gob.mx/conocimiento/manglares/doctos/manglares.html)

Monitoreo de temperatura superficial y color del mar (CHL Clorofila a, TSM Turbidez)

El objetivo del proyecto es establecer un sistema automatizado para la generación diaria de productos oceánicos sobre la temperatura superficial y color del mar de los mares mexicanos, utilizando imágenes de satélite AVHRR y MODIS, para proporcionar información base a estudios sobre ecosistemas marinos y climatología oceánica.

CONCLUSIONES

Si partimos del concepto de geografía, que es el estudio de las relaciones que existen entre el hombre y el ambiente que le rodea y la definición de percepción remota, que es el estudio de la superficie terrestre sin estar en contacto físico con él, entonces los elementos que conforman el ambiente pueden ser estudiados a partir las técnicas de percepción remota. Esto no solo consiste en almacenar y automatizar datos e información geográfica, sino estudiar y analizar el espacio geográfico con las herramientas que facilitan conocer sus características, propiedades, funciones y relaciones de los elementos que componen el ambiente, con la finalidad que los resultados sean útiles en la toma de decisiones.

El ambiente natural se encuentra influenciado por las actividades del ser humano y por la dinámica propia de la naturaleza. Por lo tanto la biodiversidad, que se refiere a la variedad de la vida, incluidos los ecosistemas, los complejos ecológicos de que forman parte, la diversidad entre las especies y la que existe dentro de cada especie. El concepto de biodiversidad involucra todos los tipos de variedades biológicas, que a grandes rasgos puede dividirse en tres niveles: genes, especies y ecosistemas (Conabio, 2001). Se encuentra amenazada por muchos factores, tanto naturales como sociales.

Por otra parte la biodiversidad al incluir todo los tipos de variedades biológicas es compleja, y no fácil de conocer, sin embargo en el nivel de ecosistemas es donde la geografía y la percepción remota proporcionan métodos para su estudio.

Las técnicas de percepción remota empleadas en el estudio de la biodiversidad han proporcionado datos e información para el conocimiento de las condiciones de los ecosistemas en un tiempo determinado. Pero es a su vez una herramienta para realizar el seguimiento de estas condiciones a través del tiempo. Como sucede con el programa de monitoreo de ecosistemas. Así como el seguimiento de uno de los mayores depredadores de la naturaleza "el fuego" mediante el programa de puntos de calor.

Considerando la identificación de los elementos que pueden ser expresados en el espacio geográfico (localización y distribución), definiendo su extensión (delimitación y diferenciación), buscando conocer como actúan los elementos en dicho espacio geográfico, así como con otros espacios geográficos (interacción) y en un tiempo diferente (temporalidad), los puntos que podemos citar a partir de este trabajo son:

1. Las técnicas de percepción remota proporcionan herramientas para estudiar el espacio geográfico en diferentes áreas del conocimiento, como es el caso que nos ocupa, el estudio de la biodiversidad a nivel de ecosistema. Los resultados de estos análisis proporcionan información para el estudio a otros niveles, como la distribución de una especie.

2. Los resultados obtenidos del implemento de las técnicas de percepción remota han contribuido en la entrega de información a diferentes sectores de población, que requieren no sólo de datos, sino de información procesada de fácil acceso. De esta forma se transforman los proyectos a programas operativos que ofrecen respuestas rápidas para la toma de decisiones.
3. La interacción con los usuarios de la información proporcionada es de vital importancia para asegurar el uso adecuado de la información y a la vez mejorar e incrementar los resultados.
4. La experiencia adquirida a lo largo de este tiempo hace que los problemas enfrentados en un momento específico, puedan ser superados en nuevas situaciones.
5. En el implemento de las técnicas de percepción remota es indispensable la integración de un grupo de trabajo interdisciplinario, que permita intercambiar los conocimientos de diversas disciplinas para alcanzar mejores resultados.
6. El implemento de las técnicas de percepción remota en la Conabio obedeció en una primera instancia al planteamiento de evaluar la capacidad del uso de las imágenes de satélite para conocer la biodiversidad. Esta capacidad ha sido demostrada, no sólo como resultado de una investigación, sino como programas operativos que ofrecen información diariamente.
7. El contar con imágenes diarias que cubran en un observación casi todo el territorio mexicano, una o varias veces al día, como son las imágenes AVHRR y MODIS, se convierten en fuente de datos indispensable para el monitoreo diario de vegetación e incendios forestales. Sin embargo por el diseño de otro tipo de imágenes como Landsat permiten observar con mayor detalle la vegetación e identificar los cambios y evaluar las condiciones de los ecosistemas, a pesar de no contar con ellas todos los días.
8. Es de relevancia establecer que esta técnica tiene ventajas y desventajas, las cuales deben ser consideradas en el uso y análisis de los resultados que se obtienen a partir de las imágenes de satélite.
9. La evolución de las imágenes de satélite han permitido mejorar e incrementar los resultados obtenidos. El caso concreto son las imágenes utilizadas en el programa para la detección de puntos de calor.

En el inicio del programa fueron utilizadas imágenes DMSP, que tienen la desventaja de la disponibilidad inmediata, porque sólo después de 3 días del registro de la imagen podía ser distribuida. Además por el diseño del sensor, si no está presente la luna hay una alta probabilidad de no

detectar puntos de calor. Finalmente la resolución espacial, que es suavizada a 2.8 km, presenta una limitante, porque es necesario que un incendio forestal emita altas temperaturas y ser muy grande para poder ser detectado. Por lo tanto, este tipo de imágenes fue de gran utilidad para la evaluación posterior de los incendios registrados en el año 1998, pero no para el programa.

Posteriormente el uso de las imágenes AVHRR fue de gran ayuda, por su disponibilidad y características, a pesar que éstas imágenes fueron diseñadas principalmente para estudios de la atmósfera y no con fines de análisis de incendios. En diferentes regiones del mundo donde se han utilizado este tipo de imágenes para la detección de incendios tienen buenos resultados. Sin embargo actualmente se presenta una fuerte limitante, en la tercera generación de este tipo de imágenes existe un cambio de la región del espectro electromagnético que registra la banda 3. Durante la noche registra en el infrarrojo medio y durante el día cambia a infrarrojo cercano, situación que afecta en la detección de incendios. Por lo tanto se reduce el número de observaciones.

Finalmente las imágenes MODIS desde su concepto fueron diseñadas para el estudio de anomalías de temperatura que se asocian a los incendios forestales. Con diferentes ventajas: incremento en la resolución espacial de 1.1 a 1 km para las bandas térmicas y a 250 metros las bandas 1 y 2 utilizadas para la detección de nubes. El nivel de saturación en las imágenes MODIS es más alto que las imágenes AVHRR, esto permite una mejor diferenciación de los posibles puntos de calor. Además se cuenta con dos bandas térmicas útiles para la detección de incendios.

Actualmente se prepara la siguiente generación de imágenes que pueden sustituir a las imágenes MODIS, las cuales son las imágenes VIIRS (Visible/Infrared Imager/Radiometer Suite).

En el caso de las imágenes utilizados en los análisis de cambios de vegetación y uso del suelo, han mejorado la resolución espacial que facilita la interpretación de las imágenes. Sin embargo hay que considerar estos cambios para realizar análisis multitemporales.

10. A partir del conocimiento del estado de la biodiversidad es posible dar un seguimiento de estas condiciones mediante percepción remota, en función del uso que ser humano realiza de la biodiversidad o por los cambios que otros elementos de la naturaleza generen como el paso de un huracán. En diferentes escalas.

ANEXO 1

Personas que han participado profesionalmente en la Coordinación de Percepción Remota:

Dr. Michael Schmidt	(abril de 1998 a mayo de 2003)
Dr. Rainer Ressler	(agosto de 1999 a enero 2003)
Mat. Silke Ressler	(agosto de 1999 a enero 2003)
Lic. Sandra Gómez	(agosto 2001 a enero 2002)
Ing. Gerardo López Saldaña	(junio 2002 a la fecha)
Pasante en Geog. Alejandra Nuñez	(agosto 2002 a diciembre 2002)
Mtro. Geog. Abraham Navarro	(mayo 2003 a junio 2003 y octubre 2003 a mayo 2004)
Biog. Eric de Bats	(agosto 2003 a junio 2005)
Dr. Albertus Wickel	(noviembre 2004 a diciembre 2006)
Dr. Sergio Cerdeira	(junio 2005 a la fecha)
M en C. Joanna Acosta	(julio 2005 a la fecha)
M en C. María Teresa Rodríguez	(agosto 2005 a la fecha)
Geog. Rodrigo	(junio 2006 a 2006)
Ing. Raúl Sierra	(marzo 2007 a octubre 2007)
Ing. Luis Sánchez	(abril 2007 a la fecha)
Pasante en Geog. Araceli Pérez	(noviembre 2006 a octubre 2007, enero 2008)
Pasante en Geog. Margarita Ascensión	(2006 a la fecha)
Pasante en biología Alma Vázquez	(diciembre 2007, abril-junio 2008)
Dr. René Colditz	(noviembre 2007 a la fecha)
M en C. Abigail Uribe	(abril 2007 a la fecha)
M en Geog. José Reyes Díaz	(noviembre 2007 a la fecha)
M en Geog. Carlos Troche	(enero 2008 a la fecha)
Ing. Alejandra Cervera	(febrero 2008 a la fecha)

Visitantes

Dra. Melanie Voguel
Dr. Michael Bock
Dr. Thilo Wermman

Personas que han participado como servicio social en la Coordinación de Percepción Remota:

Edgar Oviedo Navarro
Iván Jiménez Maya
Jesús Abraham Navarro Moreno
Laura Consuelo del Valle Lara
José Luis Cárdenas Contreras
Blanca García Contreras
Rosario Castillo Rendón
Araceli Pérez Bello
Alejandra Cervera Taboada
Margarita Ascensión Merino
Christian Silva Bejarano
Edgar Ricardo Castro Pineda
Jazmín Haydeé González Rivera
José Donaciano Miguel Jiménez

Bibliografía

- Agge, J. (1993) *Fire ecology of Pacific Northwest Forest*. Island Press. Washington D.C.
- Alvarado, E. (2006) "Consideraciones sobre incendios en bosques tropicales y templados de áreas protegidas de México y Brasil" en Flores, J; Rodríguez, D.; Estrada, O.; Sánchez, F. (coord.) *Incendios Forestales, definiendo el problema, ecología y manejo, participación social, fortalecimiento de capacidades, educación y divulgación*. Edit. Grupo Mundi Prensa, CONAFOR, México D.F. pp. 171 - 184.
- Álvarez, R.; Salmerón, O.; Aguirre, R. (2001) "Las imágenes de satélite ayudaron a evaluar los efectos de El Niño/Oscilación del Sur en el Pacífico mexicano, en el periodo 1997-1998" en Escobar, E.; Bonilla, M.; Badón, A.; Caballero, M.; Winckell, A. (comp.) *Los efectos del fenómeno de El Niño en México*. Edit. CONACYT, México, pp. 25 -34.
- Álvarez, R.; Bonifaz, R.; Luneta, R.; García, C.; Gómez, G.; Castro, R.; Bernal, A.; Cabrera, A. (2003) "Multitemporal land-cover classification of México using Landsat MSS imagery" en *International Journal Remote Sensing*. Vol. 24, no. 12, pp. 2501 - 2514.
- Achard, F.; Eva, H.; Glinni, A.; Mayaux, P.; Richards, T.; Stibig, H. (1998) *Identification of deforestation hot spot areas in the humid tropics*. TREES Publication Series B. Research Report num. 4, edit. Joint Research Centre, European Commission.
- Asbjornsen, H. & Gallardo, C. (2004) "Impacto de los incendios de 1998 en el bosque mesófilo de montaña de Los Chimalapas, Oaxaca" en Villers, L; López, J. (editores) *Incendios Forestales en México, métodos de evaluación*. Edit. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la Atmósfera, México D.F., pp. 125-145.
- Calle, A.; Romo, A.; Moclán, C.; Sanz, J. (2003) "Operacionalidad y capacidad del satélite BIRD en la detección de incendios forestales: comparación con otros sensores" en *Revista de Teledetección*. Num. 20, pp 17-27.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED (2001) *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres Naturales en México*. Edit. Secretaría de Gobernación, Sistema Nacional de Protección Civil, CENAPRED. México D.F.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED (2008) *Glosario de riesgos naturales*. Obtenido de <http://www.cenapred.gon.mx> el 23 de febrero de 2008.
- Comisión Nacional Forestal, CONAFOR (2006) *Los Incendios forestales en México 2005*. Edit. Comisión Nacional Forestal. México D.F.

- Comisión Nacional Forestal, CONAFOR (2007) *Programa Nacional de Protección contra Incendios Forestales*. Documento interno del Grupo Intersecretarial para el combate de incendios.
- Comisión Nacional Forestal, CONAFOR (2007) *¿qué es un incendio?*. Obtenido de <http://www.conafor.gob.mx/> el 20 de enero de 2008.
- Comisión Nacional Forestal, CONAFOR (2007) "Incendios 2007" en *Revista electrónica de la CONAFOR*. Obtenido de <http://www.mexicoforestal.gob.mx/nota.php?id=475> el 21 de enero de 2008.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Conabio (1998) *Los incendios en México: un diagnóstico de su efecto en la diversidad biológica*. Informe entregado a la SEMARNAP, sin publicar.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Conabio (2001) *¿Qué es la biodiversidad?*. Obtenido de <http://www.conabio.gob.mx/biodiversidad/LBIO.HTM> en octubre 2001.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Conabio (2002) *Programa de Monitoreo de Ecosistemas mediante técnicas de percepción remota*. Obtenido de http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/cambios_veg/doctos/cambios_vegetacion.html el 20 de enero de 2008.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Conabio (2006) *Documentación del sistema de calidad Percepción Remota*. Documento interno. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Chuvieco, E. (1990) *Fundamentos de teledetección espacial*. Ediciones Rialp, S.A., España.
- Chuvieco, E. (2002) *Teledetección ambiental*. Edit. Ariel Ciencia, España.
- Chuvieco, E.; Opazo, E. Sione, W.; Del Valle, H.; Anaya, J.; Di Bella, C.; Cruz, I.; Manzo, L.; López, G.; Mari, N.; González, F.; Morelli, F.; Setzer, A.; Csiszar, I.; Ander, J.; Bastarrika, A.; Libonati, R. (2008) "Global burned land estimation in latinamerica using MODIS composite data" en *Ecological applications*. Vol. 18, issue 1, pp. 64 – 79.
- De Bats, E.; López, G; Wickel, B; Cruz, I; Jiménez, R. (2006) "Índice de propagación de incendios" en *Biodiversitas*. No. 65, pp. 8 – 11.
- Elvidge, C.; Baugh, E.; Kimberly, K.; Kroehl, W.; Herbert, D.; Ethan. (1997) "Mapping city lights with nighttime data from the DMSP Operational Linescan System" en *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol. 63, no. 6 pp. 727 – 734.
- ERDAS, Inc. (1997) *ERDAS Field Guide*. 4ed. Edit. ERDAS Inc. Atlanta Georgia.

- EROS Data Center (1998) *USGS EDC Global Land Information System (GLIS)*.
Obtenido de [URL:http://edcwww.cr.usgs.gov/glis/glis.html](http://edcwww.cr.usgs.gov/glis/glis.html) en 1998.
- European Space Agency (2008) *Principios de teledetección*. Obtenido de
<http://www.eduspace.esa.int/eduspace/main.asp> el 1 de septiembre de 2008.
- Flasse, P. and Ceccato, P. (1996) "A contextual algorithm for AVHRR fire detection"
en *International Journal Remote Sensing*. Vol. 17, no. 2, pp. 419 - 424
- Fea, M. (1997) "La Percepción Remota" en Mehl, H. & Miles, E. (editores)
*Aplicaciones de la teledetección y de los sistemas de información geográfica
en la gestión de recursos naturales. Parte I: Fundamentos teóricos y
prácticos*. Curso Internacional de capacitación profesional. Fundación
Alemana para el Desarrollo Internacional y Centro Aeroespacial Alemán.
Alemania, pp. 43 -62.
- Galindo, I. (2002) *Presentación: Real-time applications of AVHRR data to natural
and anthropogenic disasters* en Satellite Direct Readout Conference for the
Americas. Diciembre 2002, Miami, Estados Unidos.
- García, A. y Muñoz, J. (2002) *El paisaje en el ámbito de la Geografía*. Edit. Instituto
de Geografía, UNAM. México. D.F.
- Giglio, L.; Desclotres, J.; Justice, C.; Kaufman, Y. (2003) "An enhanced contextual
fire detection algorithm for MODIS" en *Remote Sensing of Environment*. No.
87. pp. 273 - 282.
- González, L. (2008) *Análisis del efecto de El Niño sobre los mega-incendios en
México*. Tesis de Maestría en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de
México, UNAM. México D.F.
- Hardesty, J; Myers, R.L.; Fulks, W. (2005) "Fire, ecosystem and people: a
preliminary assessment of fire as a global conservation issue" en *The George
Wright Forum* 22., pp. 78-87, The Nature Conservancy.
- Harris, R. (1987) *Satellite Remote Sensing an introduction*. Edit. Routledge and
Kegan Poul, London.
- Jiménez, R. (2002) *Detección de puntos de calor mediante técnicas de percepción
remota* en Premios TECNOS 2001. Documento sin publicar. Parte del
documento se encuentra en el siguiente sitio:
[http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/puntos_calor/doctos/metodologia.
html](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/puntos_calor/doctos/metodologia.html)
- Jiménez, R.; Cruz, I.; Schmidt, M.; Ressler, R.; Ressler, S; López, G. (2004) "Detección
temprana de incendios" en *Biodiversitas*. No. 52, pp. 1- 10.
- Justice, C.; Giglio, L.; Boschetti, L.; Roy, D.; Csiszar, I.; Morissette, J.; Kaufman, Y.
(2006) *Algorithm Technical Background Document MODIS FIRE PRODUCTS*.
(MODIS Science Team) Version 2.3, 1 October 2006.

- Kaufman, Y. & Justice, C. (1998) *Algorithm Technical Background Document MODIS FIRE PRODUCTS*. (MODIS Science Team) Version 2.2 Nov.10 1998.
- Lira, J. (2002) *Introducción al tratamiento digital de imágenes*. Edit. Fondo de cultura económica. México.
- Lunetta, R.; Álvarez R.; Edmonds, C.; Lyon J.; Elvidge, C.; Bonifaz R.; García C. (2002) "NALC/Mexico land-cover mapping results: implications for assessing landscape condition" en *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 23, no. 16, pp. 3129 – 3148.
- Magaña, V. (1999) *Los impactos de El Niño en México*. Universidad Nacional Autónoma de México-Secretaría de Gobernación.
- Magaña, V. (2004) *Los impactos de El Niño en México*. UNAM-SEP-CONACYT. México.
- Manzo, L.; Aguirre, R.; Álvarez, R. (2004) "Multitemporal analysis of land surface temperature using NOAA- AVHRR: preliminary relationships between climatic anomalies and forest fire" en *International Journal Remote Sensing*. Vol. 25, no. 20, pp. 4417 – 4423.
- Mas, JF. & Ramírez, I. (1996) "Mejoramiento de las clasificaciones espectrales de cubiertas de suelo por medio de un sistema de información geográfica" en *Investigaciones Geográficas boletín del Instituto de Geografía*. No. especial 4, pp. 111 – 121.
- Mehl, H. & Peinado, O. (1997) "Fundamentos del procesamiento digital de imágenes" en Mehl, H & Miles, E. (editores) *Aplicaciones de la teledetección y de los sistemas de información geográfica en la gestión de recursos naturales. Parte I: Fundamentos teóricos y prácticos*. Curso Internacional de capacitación profesional. Fundación Alemana para el Desarrollo Internacional y Centro Aeroespacial Alemán. Alemania, pp. 63 – 102.
- Mehl, H. & Peinado, O. (1997b) "Introducción a la reflectancia espectral de la vegetación, suelo y agua" en Mehl, H & Miles, E. (editores) *Aplicaciones de la teledetección y de los sistemas de información geográfica en la gestión de recursos naturales. Parte I: Fundamentos teóricos y prácticos*. Curso Internacional de capacitación profesional. Fundación Alemana para el Desarrollo Internacional y Centro Aeroespacial Alemán. Alemania, pp. 103 – 124.
- Myers, R. (2006) *Convivir con el fuego manteniendo los ecosistemas y los medios de subsistencia mediante el manejo integral del fuego*. Documento de la iniciativa global para el manejo del fuego. Edit. The Nature Conservancy. Traducción Eva Vilarrubi. Estados Unidos de América.
- Montero, M.; Polanco, J.; Oropeza, F. (2004) "Implementación de un algoritmo para la detección de fuegos usando imágenes GOES" en Villers, L; López, J. (editores) *Incendios Forestales en México, métodos de evaluación*. Edit.

Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la
Atmósfera. México D.F., pp. 29 – 44.

Navarro, A. (2004) *La elaboración de cartas geográficas*. Tesis de Licenciatura en
Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. México D.F.

National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA (2008) *Página de AVHRR*.
Obtenido de <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html> en enero 2008.

National Aeronautics and Space Administration, NASA (2000) *Landsat 7*. Obtenido
de <http://landsat.gsfc.nasa.gov>, en septiembre 2000.

National Aeronautics and Space Administration, NASA (2007) *Sputnik the fiftieth
anniversary*. Obtenido de <http://history.nasa.gov/sputnik/> en noviembre de 2007.

National Aeronautics and Space Administration, NASA (2008) *Página WEB oficial de
MODIS*. Obtenido de <http://modis.gsfc.nasa.gov/index.php> en enero 2008.

Ocaña, D. & Díaz, P. (1999) *Reporte de la elaboración del mapa de Vegetación
susceptible de incendios*. Documento interno de la Conabio.

Ortiz, I.; Vidal, R.; Gómez, G.; Álvarez, R. (2003) "Evaluación de las plumas de
humo de los incendios forestales de 1998 en México y la utilidad de las
imágenes NOAA-AVHRR" en *Anales de Geografía de la Universidad
Complutense*. Num. 23, pp. 103-114.

Palacio, JL. & Luna, L. (1994) "Clasificación espectral automática vs clasificación
visual: Un ejemplo al sur de la ciudad de México" en *Investigaciones
Geográficas boletín del Instituto de Geografía*. No. 29. pp 25 – 40.

Palacio, JL.; Luna, L.; Macías, L. (1999) "Detección de incendios en México
utilizando imágenes AVHRR (temporada 1998)" en *Investigaciones
Geográficas boletín del Instituto de Geografía*. No. 28, pp. 7 – 14.

Palacio, JL.; Bocco, G; Velásquez, A.; Mass JF.; Takaki, F.; Victoria, A.; Luna, L;
Gómez, G.; López, J.; Palma, M.; Trejo, I.; Peralta, A.; Prado, J.; Rodríguez,
A.; Mayorga, R.; González, M. (2000) "La condición actual de los recursos
forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000" en
Investigaciones Geográficas boletín del Instituto de Geografía. No. 43, pp.
183 - 203.

Pantoja, V. (2007) *Presentación: Ecología del fuego* en la reunión para la
elaboración del marco estratégico del manejo del fuego en Áreas Naturales
Protegidas. Diciembre 2007, El Ocotil, Estado de México.

Prins, E & Menzel, W. (1992) "Geoestacionary satellite detection of biomass burning
in South America" en *International Journal of Remote Sensing*. No. 13, pp.
2782-2799.

- Red latinoamericana de teledetección e incendios forestales, Redlatif (2008) *Página WEB Sección Proyectos – Áreas quemadas en Latinoamérica en el 2004-AQL2004*. Obtenido de <http://www.fuego.org.ar/redlatif/Proyectos.html> en septiembre de 2008.
- Rodríguez, D. (2006) "Ecología del fuego y manejo integral del fuego en las montañas del Valle de México (bosque de coníferas)" en Flores, J; Rodríguez, D.; Estrada, O.; Sánchez, F. (coord.) *Incendios Forestales, definiendo el problema, ecología y manejo, participación social, fortalecimiento de capacidades, educación y divulgación*. Edit. Grupo Mundi Prensa, CONAFOR, México D.F., pp. 41 – 56.
- Sabin, F. (1996) *Remote sensing principles and interpretation*. W.H. Freeman and company. New York.
- Sánchez, A. (1997) "Aspectos relevantes en el uso de ERDAS Imagine" en Mehl, H & Miles, E. (editores) *Aplicaciones de la teledetección y de los sistemas de información geográfica en la gestión de recursos naturales. Parte I: Fundamentos teóricos y prácticos*. Curso Internacional de capacitación profesional. Fundación Alemana para el Desarrollo Internacional y Centro Aeroespacial Alemán. Alemania, pp. 203 – 230.
- Servicio Meteorológico Nacional, SMN (2008a) *Página WEB Sección Datos históricos de ciclones tropicales*. Obtenido de <http://smn.cna.gob.mx/> en mayo 2008.
- Servicio Meteorológico Nacional, SMN (2008b) *Página WEB Sección Monitoreo atmosférico ambiental – Incendios forestales*. Obtenido de <http://smn.cna.gob.mx/> en agosto 2008.
- Servicio Meteorológico Nacional, SMN (2008c) *Página WEB Sección productos, temperatura y precipitación*. Obtenido de <http://smn.cna.gob.mx/> en mayo 2008.
- Schowengerdt, R. (1977) *Remote Sensing. Models and methods for image processing*. 2ed., edit. University of Arizona, United States of America.
- Sosa, V.; Cedeño, O., Rodríguez, E.; Martínez, R.; Reygosa, A. (2000) *Incendios forestales*, fascículo 10, 2º ed. edit. Secretaría de Gobernación – Centro Nacional de Prevención de Desastres y Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.
- Star, L. & Estes, J. (1990) *Geographic information system: an introduction*. Prentice Hall, New Jersey, Estados Unidos.
- The Nature Conservancy (2004) *El fuego, los ecosistemas y la gente: una evaluación preliminar del fuego como un tema global*. Documento de la iniciativa global para el manejo del fuego. Edit. The Nature Conservancy. Traducción Eva Vilarrubi. Estados Unidos de América.

Trejo, I & Hernández, J. (1996) "Identificación de la selva baja en el estado de Morelos, México, mediante imágenes de satélite" en *Investigaciones Geográficas boletín del Instituto de Geografía*. No. especial 5, pp. 11 – 18.

U.S. Geological Survey USGS (1996) *Image processing for North American Landscape Characterization (NALC) Landsat MSS triplicate*. Documento interno.

Vicent, R. (1997) *Fundamentals of geological and environmental remote sensing*. Edit. Prentice-Hall, Inc. Simon & Schuster/A. Viacm Company. United States of America.