

CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA
PROGRAMA DE ENSEÑANZA PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACION
ESCUELA DE POSGRADO

10 DIC 1999

RECIBIDO

MODELO DE LA SUSCEPTIBILIDAD A INCENDIOS FORESTALES
UTILIZANDO IMAGENES AVHRR Y SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA,
EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA MAYA, GUATEMALA

POR

CARLA RAMIREZ ZEA

CATIE

Turrialba, Costa Rica
1999

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
PROGRAMA DE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN
ESCUELA DE POSGRADO**

RECIBIDO
1999

“**MODELO DE LA SUSCEPTIBILIDAD A INCENDIOS FORESTALES UTILIZANDO
IMÁGENES AVHRR Y SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA**”

Tesis sometida a la consideración de la Escuela de Posgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza y como requisito parcial para optar por el grado de:

Magister Scientiae

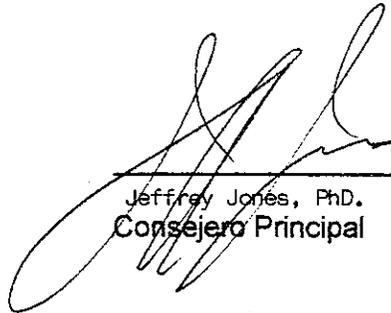
✓ Por
Carla Ramírez Zea

Turrialba, Costa Rica
1999

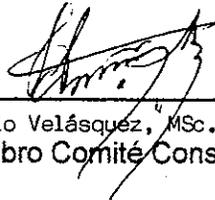
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma, por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

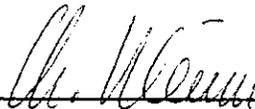
FIRMANTES:



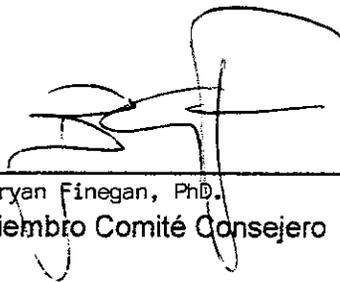
Jeffrey Jones, PhD.
Consejero Principal



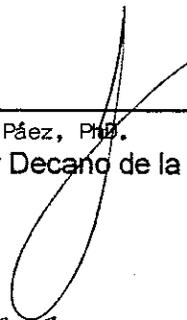
Sergio Velásquez, MSc.
Miembro Comité Consejero



Christoph Kleinn, PhD.
Miembro Comité Consejero



Bryan Finegan, PhD.
Miembro Comité Consejero



Gilberto Páez, PhD.
Director y Decano de la Escuela de Posgrado



Carla Ramírez Zea
Candidato

AGRADECIMIENTOS

A los miembros de mi comité asesor, Jeffrey Jones, Sergio Velásquez, Bryan Finegan y Christoph Kleinn, por su contribución en el desarrollo de esta tesis.

Al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Nicaragua (MARENA) por proporcionar las imágenes AVHRR utilizadas en esta tesis.

Al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) por haberme donado la beca de estudios .

Al Plan de Acción Forestal de Guatemala, por el apoyo económico para realizar el trabajo en Guatemala.

Al Consejo Nacional de Areas Protegidas y en especial a la sede regional de Petén (región VIII) por el apoyo logístico brindado en la fase de campo.

A Sergio Velásquez y Victor Hugo Ramos, por brindarme el conocimiento adquirido en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica.

A Meli, por haber compartido todos los buenos y difíciles momentos en el laboratorio, acompañados de buenos mates.

A Arnold Jacques por la asesoría en imágenes AVHRR, por proporcionarme la información sobre las imágenes producidas en la estación de MARENA y toda la ayuda incondicional.

Al Centro de Monitoreo y Evaluación de CONAP Región VIII, en especial a su personal: Victor Hugo, Erick, Selvin, Marisa, Nery, Rolando, Julián y Alejandro, ya que me brindaron todo el apoyo necesario para el trabajo de campo y por su amistad.

A Fernando Carrera por brindarme todo el apoyo durante la planificación y elaboración del trabajo de tesis en Petén.

A Ogden Rodas, por sus aportes y asesoría en Guatemala.

A Román Carrera, por sus conocimientos sobre la Reserva de la Biosfera Maya.

A Juventino Gálvez, Ricardo Morataya, Reginaldo Reyes, por el apoyo y sus aportes para el trabajo realizado.

A los expertos en incendios forestales que brindaron todo su conocimiento para la evaluación de las variables analizadas: Erick Cuéllar, Reginaldo Reyes, Manuel Manzanero, Ricardo Morataya, Jorge Chan, Vinicio Montero, Walter de la Roca, Juan José Romero, Oscar Salazar, Manuel Segura, René Suárez y Marco Tulio Torres.

A mis compañeros de promoción en especial a Nata, Gio, Naiko, Rosina, Euge, Beto, Elo, Jasmina, Omar, Jorge, Eli y Lu, por su amistad, cariño y apoyo en estos dos años de vivencia juntos.

A Luz Violeta Molina y familia por su hospitalidad en Nicaragua.

A Mario y mi familia por todo su apoyo y cariño.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Hipótesis	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	
2.1 Historia de los incendios forestales en la Reserva de la Biosfera Maya y Petén	4
2.2 Imágenes NOAA-AVHRR y su uso en los estudios de la tierra	5
2.3 Índices de vegetación	6
2.4 Consideraciones para el uso de las composiciones de NDVI con imágenes AVHRR	9
3. MATERIALES Y METODOS	
3.1 Descripción del área de estudio	10
3.2 Recopilación y análisis de información climática	12
3.3 Documentación de las causas a incendios forestales en la RBM	13
3.4 Fase 1. Clasificación de la vegetación según los patrones de cambio por los efectos de la época seca, utilizando imágenes de satélite AVHRR	
3.4.1 Preprocesamiento de las imágenes AVHRR	13
3.4.2 Análisis Multitemporal	14
3.5 Fase 2. Modelo de áreas susceptibles a incendios forestales	
3.5.1 Definiciones	16
3.5.2 Procesamiento de coberturas de los factores de interés	17
3.5.3 Procesamiento de la cobertura de puntos de calor	18
3.5.4 Transformación de factores a variables a partir del análisis de los puntos de calor	19
3.5.4.1 Análisis de la frecuencia de puntos de calor en las clases vegetación	20
3.5.4.2 Análisis de la distancia de puntos de calor a los factores antropogénicos	20

3.5.5	Evaluación Multicriterio	
3.5.5.1	Valoración y jerarquización de variables	21
3.5.5.2	Aplicación de variables en la Evaluación Multicriterio	23
4.	RESULTADOS	
4.1	Análisis climático	24
4.2	Situación actual de la dinámica de los incendios forestales	25
4.3	Fase I. Clasificación de la vegetación según los patrones de cambio por los efectos de la época seca, utilizando imágenes de satélite AVHRR.	
4.3.1	Análisis de cambio de NDVI	27
4.3.1.1	Clase Oeste (O)	28
4.3.1.2	Clase Sierra de Lacandón - Laguna del Tigre (SLT)	33
4.3.1.3	Clase Este: (E)	34
4.4	Fase 2. Modelo de las áreas susceptibles a quemas agrícolas e incendios forestales	
4.4.1	Análisis de puntos de calor respecto a los factores del modelo	35
4.4.1.1	Análisis de la frecuencia de puntos de calor en las clases de vegetación	35
4.4.1.2	Análisis de la distancia de puntos de calor a los factores antropogénicos	40
4.4.2	Evaluación Multicriterio	
4.4.3	Valoración y jerarquización de variables	40
4.4.4	Mapa del modelo de áreas susceptibles incendios forestales	44
5	DISCUSIÓN	
5.1	Fase I. Clasificación de la vegetación según los patrones de cambio por los efectos de la época seca, utilizando imágenes de satélite AVHRR	53
5.2	Fase II. Modelo de las áreas susceptibles a incendios forestales	
5.2.1	Consideraciones metodológicas	60
5.2.2	Áreas susceptibles a incendios y manejo de la RBM	63

5.3 Mapa de clases de vegetación según cambios por la época seca y mapa de áreas susceptibles a incendios forestales.	65
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
8. BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXOS	80

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Características de los satélites NOAA-AVHRR	6
Cuadro 2. Características de las bandas espectrales que puede captar el sensor AVHRR	7
Cuadro 3. Ejemplo de la matriz de valoración por pares de variables para la Evaluación Multicriterio	22
Cuadro 4. Porcentaje de las causas de los incendios forestales en la Reserva de la Biosfera Maya para 1999	26
Cuadro 5. Área de las clases de vegetación por categoría de manejo de la Reserva de la Biosfera Maya	30
Cuadro 6. Estadística descriptiva de la diferencia normalizada para las clases de vegetación	30
Cuadro 7. Matriz de los resultados de la valoración por pares de variables para la Evaluación Multicriterio	42
Cuadro 8. Área en km ² de las clases de susceptibilidad a incendios según cada categoría de manejo	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la Reserva de la Biosfera Maya (RBM) incluye frontera agrícola, poblados y vías de acceso	11
Figura 2. Escala para la valoración de las variables para el Evaluación Multicriterio	22
Figura 3. Comportamiento climático de la estación meteorológica de Flores, Petén	24
Figura 4. Comportamiento climático quincenal de la precipitación y temperatura de la estación meteorológica de Flores, Petén	25
Figura 5. Mapa de clases de vegetación según sus cambios por los efectos de la época seca de la Reserva de la Biosfera Maya	29
Figura 6. Histogramas de la diferencia normalizada de NDVI por pares de meses de la época seca de 1999	31
Figura 7. Histogramas del comportamiento espectral expresado en NDVI, de las clases de vegetación susceptible en los meses de estudio	32
Figura 8. Porcentajes de puntos de calor por clases de vegetación	36
Figura 9. Porcentaje de puntos de calor por subclases de vegetación	37
Figura 10. Porcentaje de puntos de calor por clase de vegetación por mes	38
Figura 11. Porcentaje de puntos de calor de cada subclase de vegetación	39
Figura 12. Análisis de distancia de los puntos de calor a la frontera agrícola, poblados y vías de acceso	41

Figura 13. Mapa de áreas susceptibles a incendios en la Reserva de la Biosfera Maya, Guatemala	44
Figura 14. Análisis de susceptibilidad del Parque Nacional Sierra de Lacandón (PNSL)	48
Figura 15. Análisis de susceptibilidad del Parque Nacional Laguna del Tigre (PNLT)	49
Figura 16. Análisis de susceptibilidad de la Zona de Usos Múltiples	50
Figura 17. Análisis de susceptibilidad del Parque Nacional Tikal y Biotopo Zotz	51
Figura 18. Mapa de áreas susceptibles a incendio del Parque Nacional Mirador, Parque Nacional Río Azul y Biotopo dos Lagunas	52
Figura 19. Mapa de vegetación de Centroamérica, Comisión Centroamericana de Ambiente y desarrollo	55
Figura 20. Tipos de vegetación del Parque Nacional Laguna del Tigre	56
Figura 21. Vegetación centroamericana, esquemática, según Gómez (1992)	59
Figura 22. Mapa de la zonificación del Parque Nacional Sierra de Lacandón, según el plan de manejo de 1997. CONAP	61
Figura 23. Mapa de la zonificación del Parque Nacional Laguna del Tigre	64
Figura 24. Análisis del mapa de susceptibilidad a incendios y la clase Oeste de vegetación en la RBM	66

Figura 25. Análisis del mapa de susceptibilidad a incendios y la clase SLT de vegetación en la RBM

69

Figura 26. Análisis del mapa de susceptibilidad a incendios y la clase Este de vegetación en la RBM

70

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Algoritmo para eliminación de nubes en las imágenes AVHRR	81
Anexo 2. Algoritmo para discriminación de puntos de calor	82
Anexo 3. Definiciones y hoja de Evaluación Multicriterio para los expertos en incendios forestales	83
Anexo 4. Listado de expertos en incendios forestales, entrevistados para la Evaluación Multicriterio	86
Anexo 5. Resultados de la valoración para la Evaluación Multicriterio	87
Anexo 6. Descripción de los tipos de vegetación del Parque Nacional Laguna del Tigre	88

RESUMEN

Los bosques tropicales se ven constantemente amenazados por los incendios forestales que se originan principalmente en las quemas agrícolas. En Guatemala, una de las áreas de bosque protegido más afectadas por los incendios forestales es la Reserva de la Biosfera Maya (RBM) ya que es un área de mucha inmigración y actividad humana. Es así que para contribuir con los planes de prevención y control de incendios forestales del área, en el presente trabajo se realizó un análisis geográfico para determinar cuales son las áreas más amenazadas dentro de la reserva.

En primer lugar, se realizó una clasificación de la vegetación de acuerdo a sus patrones de cambio por efectos de la época seca de 1999. Para ello se utilizaron imágenes AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) y se obtuvieron composiciones de 15 días/mes del valor máximo por pixel del índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Los meses evaluados fueron de febrero a marzo de 1999.

Con esta información se realizaron dos clasificaciones no supervisadas, una basada en la diferencia de NDVI por pares de meses, y la otra basada en los valores netos de NDVI por mes. Estas dos clasificaciones se combinaron y se obtuvo el mapa de clases de vegetación según sus patrones de cambios por la época seca. Cada clase de vegetación obtenida se caracterizó de acuerdo a los tipos de bosque que representa y además se analizó de acuerdo a la incidencia de incendios forestales y quemas agrícolas de 1998 y 1999. Este análisis se hizo a través de los puntos de calor de 1 x 1 km detectados a través del sensor AVHRR. Las clases con cambios más drásticos por la sequía se presentaron al Oeste de la reserva y corresponde a las áreas agrícolas, humedales y pastizales naturales. Las clases de cambios moderados por la sequía corresponden a las áreas de bosque, diferenciados según el tiempo en que sufrieron los cambios.

Posteriormente se realizó el mapa de zonas susceptibles a incendios forestales. Para ello se analizó el factor vegetación y tres factores antropogénicos, frontera agrícola, poblados y vías de acceso. Con estos tres factores se realizó un análisis de la distancia de los puntos de calor a cada uno de ellos, y se obtuvo un modelo que sirvió para la transformación de los factores a variables. El factor de vegetación fue transformado según el porcentaje de pixeles de calor según área que cubre cada clase. Las nuevas variables fueron analizadas en conjunto a través de una Evaluación Multicriterio, donde se determinó un peso según su importancia por su capacidad de producir incendios forestales. Para otorgar estos valores se utilizó la metodología Delphi, donde se realizó una consulta a expertos en incendios en el área de estudio. En la Evaluación Multicriterio cada variable se multiplicó por el peso correspondiente y luego se sumaron todas en forma lineal. El resultado fue un mapa que muestra tres clases de susceptibilidad, las cuales indican mayor efecto en aquellas zonas donde se encuentran presentes las tres variables antropogénicas. La variable con mayor valoración fue la frontera agrícola, seguido de los poblados y vías de acceso. La vegetación juega un papel menos drástico aunque no deja de ser importante ya que puede determinar una rápida propagación según sus condiciones por la sequía. Las áreas más susceptibles son las que se encuentran en las áreas habitadas dentro de la reserva, el borde con la zona de amortiguamiento y las zonas fronterizas con México al Oeste.

Palabras claves: incendios forestales, quemas agrícolas, imágenes AVHRR, Sistemas de Información Geográfica, Evaluación Multicriterio, Reserva de la Biosfera Maya, Guatemala.

SUMMARY

Tropical forests are constantly threatened by fires. In Guatemala, the “*Reserva de la Biósfera Maya*” (RBM) is one of the protected areas most affected by them. This is a zone with high immigration rates, where human activity is the main cause for such fires. The present study, based on three human and one vegetation variables, tried to identify which areas of the reserve are the most susceptible to fire so it would help on the development of prevention plans and control areas.

As a first step, based on the change patterns of the vegetation, during the 1999 dry season, a vegetation classification was made. For that, AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) images were used to obtain fifteen days/month maximum NDVI (*Normalised Difference Vegetation Index*) compositions. The evaluated months were February – March 1999.

Two non supervised classifications were made, based on these information: one, based on differences of NDVI between months pairs, and another one, based on the clear NDVI value of each month. These two classifications were combined to obtain the map of dry season change classes vegetation. Each vegetation class was described based on the forest type that it represents and on the 1998-1999 fire incidence obtained by the 1 x 1 km heat pixels identifying by the AVHRR sensor. The major change classes obtained were at the West of the RBM, and corresponded to agricultural, natural wetland and swamp areas. The intermediate dry change classes were those with forest cover, with differences related to the time of occurrence of that changes.

Then, based on three human factors: agricultural border, access roads and towns, a heat pixel distance to the interest factor analysis was made. A model to explain that behaviour was obtained and each factor was transformed to its own model to become a final variable. The vegetation factor values were modified too, based on the percentage of heat pixel per class area.

Based on their importance as fire-causing factor, a weight value was given to each transformed variable. The weight value was established using the Delphi method with fire experts of the study area. The Multicriterial Evaluation was made using the transformed variables modified by their weights and adding them linearly.

The resulting map shows three kinds of susceptibilities with the mayor one in the zones where the three anthropogenic variables are present. The variable with the most fire-causing weight was the agricultural border, followed by the towns and the access roads. The vegetation was the variable with less weight, but is still important because it determines the rapid propagation of fire. The areas most susceptible for fires in the RBM are those that are in the most densely populations zones, in the edge of the buffer zone and the Mexican frontier line in the West.

Key Words: Forest fires, agricultural burns, AVHRR images, Geographic Information Systems, Multicriterial Evaluation, Reserva de la Biósfera Maya, Guatemala.

1. INTRODUCCION

Los incendios forestales son uno de los desastres periódicos que afectan más a Centroamérica, además constituyen una amenaza constante para la reducción de los bosques (FAO 1998). En los trópicos los incendios forestales son causados principalmente por las prácticas agrícolas en las zonas rurales de los países, tal es el caso de Centroamérica donde las actividades agropecuarias son la base fundamental de la economía de las familias que viven en estas zonas. Estas prácticas pueden ser más amenazadoras cuando ocurren en épocas de sequía severa, principalmente durante los años afectados por el fenómeno de El Niño, como sucedió en Indonesia durante la sequía de 1982 a 1983 y también en el período 1997 y 1998 en México, Centroamérica, Indonesia y Malasia (FAO 1998).

En 1998 fueron afectadas 810,592 ha. de bosques en Guatemala, es decir el 20% de la cobertura boscosa del país. Afortunadamente el 97 % de los incendios forestales fueron rastroseros, es decir que únicamente afectaron sotobosque (Georrecursos 1998). Una de las áreas más afectadas por los incendios forestales ha sido el norte del país, donde se encuentra el área de bosque protegido más grande de Centroamérica, la Reserva de la Biosfera Maya (RBM). Según las estimaciones de 1998, el 33% del bosque se quemó en esta reserva (Stanley 1998). A raíz de las fuertes consecuencias de los incendios en ese año, el gobierno de Guatemala, a través del Instituto Nacional de Bosques (INAB) y el Consejo Nacional de Areas Protegidas (CONAP) coordinaron una Estrategia Nacional de Prevención y Control de Incendios Forestales para 1999.

La detección de zonas susceptibles a incendios forestales es una de las primeras necesidades para poder llevar a cabo los planes estratégicos de prevención y control, ya que permiten determinar las áreas que necesitan mayor o menor vigilancia, y poder hacer una mejor distribución de los recursos, tanto económicos como humanos. Actualmente existen herramientas que facilitan la determinación espacial de áreas que pueden ser afectadas por los incendios forestales, tales como el empleo de imágenes de satélite. Dentro de las imágenes más utilizadas en los últimos años para este tipo de estudio están las del sensor AVHRR (siglas en inglés del Radiómetro Avanzado de Alta Resolución) que se detectan a través de los satélites circumpolares de la NOAA (siglas en inglés de la Administración Nacional de Oceanografía y de la Atmósfera). Este tipo de imágenes proporciona

información con una resolución de aproximadamente 1x1 km. y tiene la ventaja que cubre una amplia extensión territorial y ofrece información diaria, lo que permite la detección de incendios forestales y del estado de las cubiertas vegetales. Otra ventaja que las hace un instrumento viable, es su bajo costo (Kidwell 1995). Esto es posible porque en la actualidad existen instituciones con estaciones de recepción que proporcionan información procesada, tal es el caso del Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales de Nicaragua (MARENA) quien tiene la apertura de proporcionar la información a instituciones a nivel centroamericano. Además también existe la posibilidad de obtener información procesada a través de Internet, lo que es aún más accesible, en este caso se pone como ejemplo la información que procesa el *USGS* (siglas en inglés de Levantamiento Geológico de Estados Unidos). De este tipo de información procesada, la más utilizada para desarrollar trabajos temporales sobre incendios forestales son los puntos de calor y los índices de vegetación. Los puntos de calor se obtienen a partir de la banda térmica del sensor *AVHRR* y pueden representar uno o varios incendios dentro de 1km² o bien una parte de un gran incendio¹. Para cualquiera de las dos formas, un punto de calor nos da la información de la ubicación de los incendios en un área determinada. Por otro lado, la información de los índices de vegetación, se obtiene a partir de la combinación matemática de la banda infrarroja cercana y la banda roja, y a partir de ellos, es posible determinar el estado de la vegetación a través del tiempo. El índice que se utiliza con más frecuencia es el *NDVI* (siglas en inglés del Índice de la Diferencia Normalizada de la Vegetación) (Chuvieco 1990).

Basado en las necesidades anteriormente expuestas y por medio del uso de la información de imágenes de satélite *AVHRR*, en el siguiente estudio se elaboró un mapa de áreas susceptibles a incendios en la RBM, obtenido a través de un modelo cartográfico del comportamiento de los incendios forestales con respecto a la distancia a los factores de origen antropogénico y la frecuencia en las clases de vegetación que existen en el área, según los cambios que sufre por los efectos de la época seca. Es importante destacar el concepto de modelo cartográfico, el cual consiste en una serie de procedimientos para la manipulación de la información geográfica, es decir de los mapas o coberturas en formato digital.

¹ Jacques A. 1999. Comunicación electrónica. Pre-procesamiento de los datos *AVHRR* de la Estación de MARENA, Nicaragua. Environmental Sciences Department, NRI..

1.1 Objetivos:

1.1.1 General:

Obtener, a través de un modelo cartográfico, un mapa que muestre las áreas susceptibles a incendios forestales en la Reserva de la Biosfera Maya, mediante el análisis de la vegetación con imágenes *AVHRR* y tres factores antropogénicos.

1.1.2 Específicos:

Clasificar la vegetación de acuerdo a los patrones de cambio por efecto de la época seca, utilizando imágenes *AVHRR*.

Determinar la frecuencia de las quemas agrícolas e incendios forestales, en cada una de las clases y subclases de vegetación encontradas, para la elaboración del modelo de susceptibilidad.

Determinar el comportamiento de los incendios forestales, con respecto a la distancia de tres factores antropogénicos: frontera agrícola, vías de acceso y poblados, el cual servirá para el modelo de susceptibilidad.

Determinar la importancia relativa de las variables, mediante jerarquización y valoración, para obtener el modelo final de susceptibilidad.

Desarrollar el modelo por medio de una Evaluación Multicriterio de las variables analizadas para elaborar el mapa de áreas susceptibles a incendios forestales.

1.2 Hipótesis:

Es posible determinar cambios de la vegetación debidos a los efectos de la época seca, utilizando imágenes de satélite *AVHRR*.

Las áreas susceptibles a incendios forestales en la Reserva de la Biosfera Maya pueden determinarse a través del análisis de la ocurrencia de incendios con respecto a las clases de vegetación y tres factores antropogénicos.

2. REVISION DE LITERATURA:

2.1 Historia de los incendios forestales en Petén y la Reserva de la Biosfera Maya:

La Reserva de la Biosfera Maya se encuentra ubicada en el departamento de Petén, y esta región ha sido afectada por los incendios desde tiempos remotos. Algunos estudios palinológicos realizados en dos lagunas que rodean el Lago Petén-Itzá (en el límite Sur de la Reserva de la Biosfera Maya) proporcionan evidencias de incendios forestales en esta área desde finales del Pleistoceno, como consecuencia de las grandes sequías que existieron en esta época (Duplessy *et al.* 1986, Leyden *et al.* 1993). Estos estudios apoyan la hipótesis de la existencia de sabanas en esta área de Petén desde esta época (Pleistoceno), porque ha sido un área afectada constantemente por incendios forestales (Brenner *et al.* 1990). La razón de esta continuidad, se debe a la aparición de los Mayas desde hace aproximadamente 3,000 años (Delcourt y Delcourt 1991). La civilización Maya, se caracterizó al igual que muchas comunidades rurales de la actualidad, por realizar técnicas agrícolas de "tumba y quema". Esta técnica consiste en la limpieza de los campos destinados a cultivo cortando y botando los árboles y arbustos, seguidamente esta materia orgánica es quemada para poder facilitar la limpieza del campo. (Goldammer 1988). En el estudio realizado por Brenner *et al.* (1990) queda clara la evidencia de quemas agrícolas en estas áreas de sabanas. A través de muestras sedimentarias se obtuvieron rastros de carbón que datan desde hace aproximadamente 300 años, los cuales estaban combinados con polen de pastos y plantas domesticadas por los Mayas tales como *Brosimum*. Otros estudios como el de Islebe *et al.* (en prensa) también evidencian alta deforestación durante la época en que los Mayas habitaron esta región.

En tiempos posteriores a la civilización maya, la actividad agrícola sigue siendo causa directa de los incendios forestales en el área, la cual fue aumentando con la repoblación del área entre la época posterior a la civilización Maya y la actualidad. Las técnicas de tumba y quema siguen siendo las más utilizadas por los campesinos, debido a que minimiza la fuerza de trabajo. Se realizan tanto para la limpieza de campos de cultivos (maíz y frijol principalmente) como para el establecimiento de nuevas áreas cultivables (avance de la frontera agrícola). Las quemas en Petén también tienen la característica de ocurrir debido al establecimiento de nuevas áreas de pastizales para ganado, o para el enriquecimiento de los que ya existen. Por lo tanto, podemos afirmar que la actividad de incendios en el área no

ha cesado. En este siglo existen reportes sobre grandes incendios forestales, por ejemplo Lundell (1937) en su descripción de la vegetación de este departamento, reporta incendios forestales durante la época seca de 1933, muchas áreas de sabana que Lundell (1937) reporta al Sur del Lago Petén-Itzá fueron quemadas hasta tres veces en el año, debido a que los fuegos se extendieron con facilidad. Así mismo, muchas áreas de bosque fueron afectadas debido a la falta de control. La descripción de este escenario fue muy similar al ocurrido en 1998, ya que en ambos casos se reportaron grandes extensiones de humo, a tal grado que los aviones no podían aterrizar en el aeropuerto de Flores (Lundell 1937, Programa Frontera Agrícola 1998).

Existen otros reportes no documentados provenientes de algunas comunicaciones orales con personas de la región, quienes cuentan de grandes incendios forestales en 1945 y 1960 (Manzanero 1999). Por último en 1998 ocurrieron los incendios forestales más severos en los últimos 40 años, los cuales cobraron un gran interés debido a que las pérdidas sociales, económicas y ambientales fueron muy severas para la región.

2.2 Imágenes NOAA-AVHRR y su uso en estudios de la tierra:

Este tipo de imágenes son transmitidas a través del sensor AVHRR (siglas en inglés del Radiómetro Avanzado de Alta Resolución), el cual se encuentra en los satélites de la serie NOAA (siglas en inglés de la Administración Nacional Oceanográfica y de la Atmósfera). Estos satélites inicialmente fueron utilizados por el Servicio Nacional Climatológico de Estados Unidos, para realizar informes climatológicos y de la atmósfera (Jansen 1996). Fueron diseñados para tener una amplia cobertura de 2,700 km/imagen y un ciclo corto de 12 horas (Chuvienco 1990). Esta capacidad ha sido muy bien aprovechada para realizar estudios temporales, los cuales se han diversificado a otros campos, tales como, estudios sobre cambio climático global, estudios oceanográficos y de vegetación (Jansen 1996). Actualmente las aplicaciones de este tipo de imágenes son varias, tales como: mapas de uso de la tierra, asistencia agrícola, producción pesquera, análisis y monitoreo regional de vegetación e incendios forestales (Kidwell 1995).

La resolución de este tipo de imágenes es de 1 x 1 km (Cuadro 1) por lo tanto estas imágenes son muy útiles para estudios regionales y continentales. Para ello, también existen dos formatos de presentación: a) Cobertura de Area Global (GAC por sus siglas en

inglés): para grandes áreas, el cual reduce la resolución a un tamaño de pixel de 4 km y b) Cobertura de Area Local (LAC por sus siglas en inglés): el cual utiliza el pixel original de 1 km. (Chuvieco 1990, Avery y Berlin 1992).

Cuadro 1. Características de los satélites NOAA-AVHRR. Fuente: Ehrlich *et al.* (1994), Kidwell (1995), Downey (1996),

	Atributos	Características
SATÉLITE NOAA	Orbita	Polar cercana
	Altitud	833-870 km
	Período	102 min
	Hora de cruce con el Ecuador	0730 y 1930 1400 y 0200
	Repetición del ciclo	12 horas
	Satélites activos	Lanzamiento
	NOAA-9	12/12/84
	NOAA-10	17/09/86
	NOAA-12	14/05/91
	NOAA-14	30/12/94
Sensor AVHRR	Número de imágenes para cubrir Guatemala	1
	Cobertura por imagen	2,700 km
	Resolución	1 X1 km
	Frecuencia estimada (< 20% nubes) en época de incendios	2 satélites diarios
	Bandas espectrales	5
IMÁGENES	Costo	\$ 20-30

El sensor AVHRR produce imágenes en cinco bandas del espectro electromagnético. El uso de cada banda se ha desarrollado en trabajos específicos (Cuadro 2), lo cual lo ha hecho aún más útil, por ejemplo, los datos de observaciones en el rojo e infrarrojo del espectro son utilizados para estudios de vegetación y recursos de la tierra. Además, este sensor detecta una banda termal, la cual ha sido utilizada para observar diferencias de vegetación y hacer mapas (Ehrlich *et al.* 1994).

Otra característica importante de estas imágenes es su bajo costo, con respecto a otras de resolución más finas (Landsat o Spot), lo cual las hace accesibles a estudios temporales aunque sea a escala más rústica.

Ahora bien, este sensor posee dos desventajas que se deben tomar en cuenta durante el procesamiento de imágenes y posterior análisis: la falta de coeficientes de calibración radiométrica y el ángulo de inclinación que distorsiona radiométricamente las lecturas en los extremos del punto nadir (Ehrlich *et al.* 1994). Estas desventajas se discutirán posteriormente en 2.4.

Cuadro 2. Características de las Bandas espectrales que puede captar el sensor AVHRR. Fuente: Chuvieco (1990), Avery y Berlin (1992), Kidwell (1995), Jansen (1996),

Banda	Longitud de Onda	Región espectral	No Satélite NOAA	Usos
1	0.58-0.68 μm	Rojo	Todos	Nubes diurnas, nieve, hielo y mapeo de vegetación
2	0.725-1.10 μm	Infrarrojo cercano	Todos	Delimitación de interface agua-tierra, nieve, hielo y mapeo de vegetación
3	3.55-3.93 μm	Infrarrojo medio	Todos	Monitoreo de puntos calientes (volcanes, incendios forestales) mapeo de nubes nocturnas
4	10.30-11.30 μm 10.50-11.50 μm	Infrarrojo térmico	9,12,14 10	Mapeo de nubes y temperatura de la superficie
5	11.5-12.5 μm 10.50-11.50 μm	Infrarrojo térmico	9,12,14 10	Temperatura de las nubes y superficie, mapeo de nubes

2.3 Índices de vegetación:

Los índices de vegetación fueron desarrollados a partir de las características espectrales que han encontrado en las cubiertas vegetales. Estas características se relacionan principalmente con la acción de los pigmentos fotosintéticos y el agua que pueden almacenar las células. Las bandas del espectro electromagnético que proporcionan esta información sobre la vegetación sana son el rojo del espectro visible (0.6-0.7 μm) y el infrarrojo cercano (0.7-1.1 μm) (Chuvieco 1990). Para vegetación sana, en la banda roja, se detecta una baja reflectividad por la alta absorción de luz por la clorofila y en la banda infrarroja cercana se distingue por una alta reflectividad debido a la estructura interna de las hojas, lo cual permite discriminar entre grupos de plantas, así como también distinguir alteraciones de la vegetación por estrés (Lillesand y Kiefer 1994). Por lo tanto, mientras mayor sea la diferencia entre estas dos bandas, el estado de la vegetación representa mayor vigor.

A partir de este principio existen varios índices de vegetación que relacionan estas dos bandas. Uno de ellos es el cociente entre las dos bandas, pero su interpretación resulta un poco complicada, también se ha trabajado con diferencia simple entre el infrarrojo cercano menos el rojo (Lillesand y Kiefer 1994), pero el más utilizado es el índice de diferencia normalizada *NDVI* (siglas en inglés del Índice de la Diferencia Normalizada de la Vegetación). Se calcula a partir de la diferencia de los valores de reflectividad en las dos bandas espectrales mencionadas (infrarroja y roja) normalizada por su suma (Che y Price 1992). De esta forma tenemos:

$$NDVI = \frac{IRC - RJ}{IRC + RJ} \quad (1)$$

Donde: *NDVI* = índice de la diferencia normalizada de la vegetación

IRC = Infrarrojo cercano

RJ = Rojo visible

Para el sensor *AVHRR*, la banda roja corresponde al canal 1 y la infrarroja cercana al canal 2.

El *NDVI* varía entre -1 y $+1$. Los valores típicos para vegetación oscilan entre 0.1 y 0.6 , los valores más altos corresponden a una cobertura con mucha actividad fotosintética (vegetación más verde). Por otro lado, las nubes y el agua poseen mayor reflectancia en la banda roja que la banda infrarroja, por lo que tiende a producir valores negativos de *NDVI*. Las rocas y el suelo descubierto tienen valores de reflectancia similares en ambas bandas (-0.1 a 0.1) por lo tanto resultan valores de *NDVI* cercanos a cero (Tucker 1979, Chuvieco 1990).

Uno de los problemas más comunes para la aplicación del *NDVI* con las imágenes *AVHRR* son las nubes y bruma. Esto se debe principalmente a la amplia cobertura geográfica que cubren estas imágenes. Para minimizar estos efectos generalmente se realizan dos procedimientos, el primero es la aplicación de un algoritmo para detectar y quitar las nubes densas (Jaques 1999). El segundo, es realizar una composición de una serie de imágenes de días continuos. Esta es una de las técnicas más utilizadas para obtener una imagen sin nubes y con menos efectos de la bruma. Para realizar estas composiciones es muy frecuente utilizar la selección del valor máximo de la serie de imágenes de días continuos, a esto se le llama Composición del Máximo Valor (*MVC* por sus siglas en inglés) (Moody y Strahler 1994, Martín y Chuvieco 1995). El número de imágenes

para realizar la composición puede variar, según el número de días necesarios para obtener una imagen sin nubes (Moody y Strahler 1994).

2.4 Consideraciones para el uso de las composiciones de *NDVI* con imágenes *AVHRR*:

Las imágenes *AVHRR* son altamente dependientes de los efectos bidireccionales, los cuales pueden aumentar en el uso de las composiciones de *NDVI*, es decir, en el uso de imágenes de diferentes fechas (Cihlar 1994). Estos efectos hay que tomarlos en cuenta para el análisis e interpretación de los datos obtenidos a través de las metodologías mencionadas con anterioridad. Algunos de los factores que provocan estos efectos son las respuestas radiométricas por las características del sensor, la contaminación atmosférica y los efectos de los puntos lejanos al nadir (Cihlar 1994, Lillesand y Kiefer 1994, Moddy y Stralher 1994).

Los cambios de las respuestas radiométricas debidas al sensor, deben ser corregidas mediante el uso de determinados coeficientes de calibración, los cuales pueden ser accesibles desde el sitio *Web* de *NOAA* (Kidwell 1995).

Otros factores son el ancho del campo óptico de observación ($\pm 55.4^\circ$) y el ángulo desde el cenit satelar (hasta de $\pm 68.5^\circ$), debido a que la amplitud del sensor, hace que los efectos atmosféricos tiendan a incrementar los valores de *NDVI* a partir de 0.2 del nadir. El incremento es mayor para humedales y menor para áreas de cultivo (Kidwell, 1991, Cihlar 1994). Por otro lado, los efectos atmosféricos tienden a ser mayores en los pixeles más alejados del nadir, esto significa que al elegir los pixeles con valores mas altos de *NDVI* también estamos eligiendo los pixeles con mayor ángulo del cenit satelar. Por lo tanto, los efectos bidireccionales residuales serán más fuertes en este tipo de imágenes (Cilhar 1994).

Por último, en la composición de imágenes se eligen pixeles de varias fechas, como consecuencia de esto los ángulos cenitales serán diferentes entre pixeles por lo que la geometría de los mismos también será inconsistente. Por lo tanto se deben transformar los datos fuera del nadir de los canales 1 y 2, para obtener medidas equivalentes entre los pixeles (Cihlar 1994, Moody y Strahler 1994).

A pesar de la existencia de los efectos bidireccionales, la metodología descrita ha sido muy utilizada en estudios de vegetación, donde se asumen este tipo de inconsistencias. Es importante que se deba mejorar la técnica, para producir un mejor balance entre la selección de imágenes sin nubes y la pixeles cercanos al nadir (Moody y Strahler 1994).

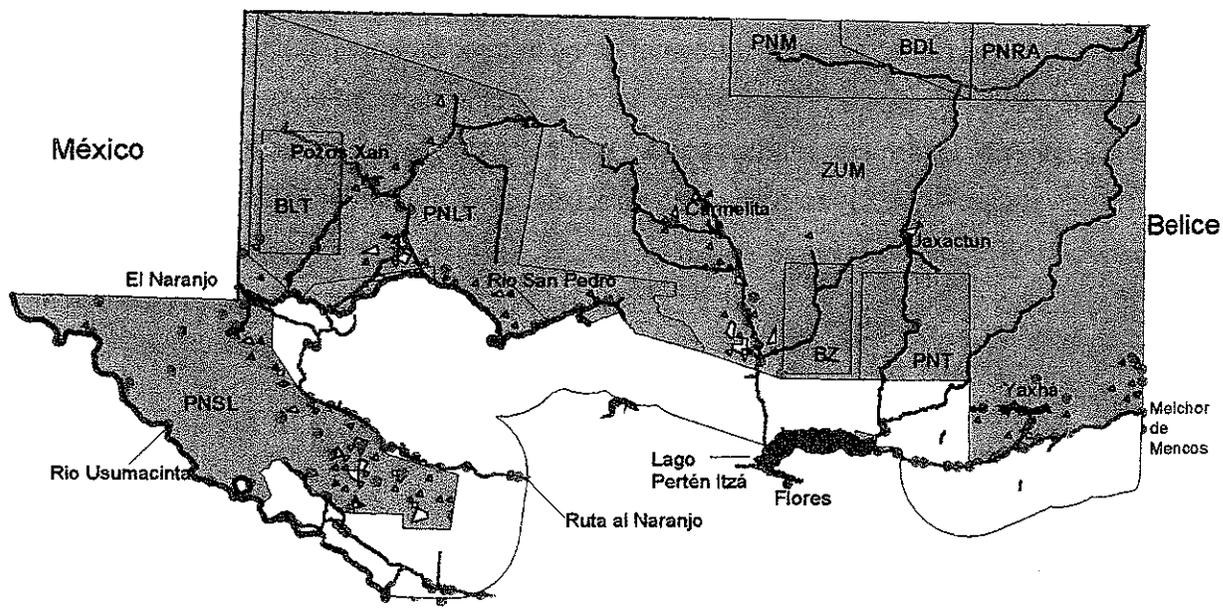
3. MATERIALES Y METODOS:

3.1 Descripción del área de estudio:

La Reserva de la Biosfera Maya (RBM) está ubicada en el departamento de Petén, al norte de la República de Guatemala (Figura 1). Fue declarada como Reserva de la Biosfera en 1990 (Decreto 5-90) y es administrada por el Consejo Nacional de Areas Protegidas (CONAP). La RBM posee 1.4 millones de hectáreas y se compone de una zona núcleo formada por cinco parques nacionales y dos biotopos, una zona de usos múltiples y una zona de amortiguamiento (Barrios 1995).

El clima es tropical cálido y húmedo, con una estación seca de 5 meses, definida de enero a mayo. La temperatura promedio es de 25° C, la precipitación promedio anual oscila entre 1,200 y 1,700 mm. (INSIVUMEH/PNUD 1989). Geológicamente la RBM está situada en la plataforma de Yucatán, tiene elevaciones entre los 0-300msnm. Sus suelos son arcillosos, poco profundos, de fertilidad variable y drenaje lento (CONAP 1992). Los bosques están formados por selvas siempre-verdes y semicaducifolia con diversas asociaciones: bosque alto, bosque bajo y de *Pinus caribaea* (Detlefsen y Carrera 1993). Las características naturales de la RBM determinan una alta diversidad, con más de 3,000 especies de flora, la fauna puede llegar a representar la mitad de las especies del país, especialmente la ornitofauna y herpetofauna (CONAP 1992).

Debido a la inmigración, la población aumentó de 20,000 habitantes en 1960 a cerca de 500,000 en la actualidad, con una tasa de crecimiento anual de 9%. Paralelo a ello el área deforestada aumentó de un 10 a un 40 % en ese mismo lapso (Meyerson 1997, CONAP 1992). La población dentro del área de amortiguamiento y zona de usos múltiples se dedica principalmente a la agricultura: cultivo de maíz, pepitoria, frijol y en algunos casos arroz, ajonjolí, achiote, yuca, tabaco, banano, cítricos, piña y chicle (CARE-AID 1993a). En algunas áreas existe producción ganadera y en otras, extracción forestal comercial. Para muchas



- Poblados
- ∧ Vías de acceso
- ZAM y zonas agrícolas
- Lagos

20 0 20 40 Kilometers



Categorías de manejo

- ZAM = zona de amortiguamiento
- ZUM = zona de usos múltiples
- PNSL = Parque Nacional Sierra de Lacandón
- PNLT = Parque Nacional Laguna del Tigre
- PNM = Paure Nacional Mirador
- PNRA = Parque Nacional Río Azul
- PNT = Parque Nacional Tikal
- BLT = Biotopo Laguna del Tigre
- BZ = Biotopo Zotz
- BDL = Biotopo dos Lagunas

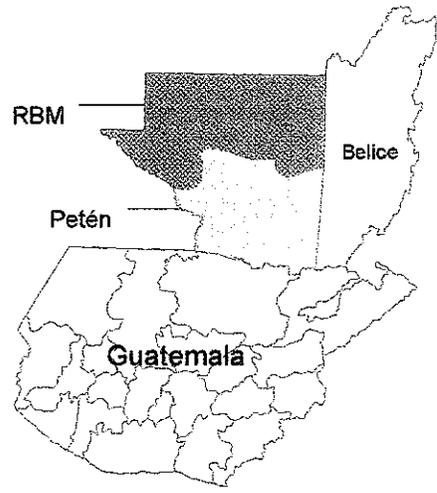


Figura 1. Localización de la Reserva de la Biosfera Maya (RBM) Incluye poblados, vías de acceso y zonas agrícolas

comunidades que viven en la zona de usos múltiples o zona núcleo, las actividades extractivas de las especies no maderables, mencionadas anteriormente, son muy importantes. Es un área bastante conflictiva, debido a que la tenencia de la tierra no está definida con claridad, se han hecho adjudicaciones por diferentes instituciones del Gobierno y también ocurren muchas apropiaciones espontáneas denominadas "agarradas" (CONAP 1992). Otro problema importante en el área, son las concesiones petroleras dentro en el Parque Nacional Laguna del Tigre. Esta petrolera ha ocasionado una mayor inmigración a este parque debido principalmente a la construcción de carreteras (CONAP 1992)

3.2 Recopilación y análisis de información climática:

Para poder tener una referencia del comportamiento climático del área, se recopiló la información climática desde noviembre de 1996 hasta mayo de 1999, de la estación meteorológica de Flores, Petén. Solamente se recopiló información de esta estación debido a que es la única que actualmente está funcionando en el área. Por otro lado, se realizó el análisis en el período de tiempo indicado, con el fin de observar el comportamiento de un año sin efectos por el fenómeno del Niño (1997), el comportamiento un año afectado por del fenómeno del Niño (1998) y el comportamiento de la época seca de 1999.

La información que se recopiló fueron los datos diarios de temperatura, humedad relativa y precipitación. Estos datos se resumieron para obtener los promedios mensuales. Utilizando la temperatura y humedad relativa se calculó la evapotranspiración potencial (ETP), utilizando el método y la fórmula de Hargreaves. Este dato sirve para obtener los meses de sequía y los meses de humedad, por medio de la comparación con la precipitación. Los meses que la precipitación excede la evapotranspiración se dice que hay un superávit de humedad, por lo tanto el mes se considera húmedo y los meses en que la precipitación es menor que la evapotranspiración, el mes es considerado seco. En la Ecuación 2. se describe la fórmula para el cálculo de la ETP (INSIVUMEH/PNUD 1989).

$$ETP = [\sqrt{100 - \%HR * 12.5}] * [(0.075 * RMM)(0.0075)(9 / 5^{\circ} C + 32)] \quad (2)$$

Donde: ETP = Evapotranspiración potencial

HR= Humedad relativa promedio mensual

RMM= Radiación media extraterrestre mm de evap/día, una constante diferente para cada mes.

3.3 Documentación de las principales causas de los incendios forestales en la RBM:

Se recopiló información para determinar y documentar las principales causas que provocan los incendios forestales en el área, para ello se entrevistó a los técnicos y personal de la Comisión Departamental de Emergencias, quienes son los actores directos en el control de los incendios. Además, se obtuvieron datos de las bases de 1998 y 1999 de la Comisión Nacional de Incendios Forestales, donde se tiene un registro de las causas de los incendios forestales de todo el país.

3.4 Primera Fase: Clasificación de la vegetación según los patrones de cambio por los efectos de la época seca, utilizando imágenes de satélite AVHRR.

En esta fase se realizó el proceso para obtener el mapa de la clasificación de vegetación de acuerdo a sus patrones de cambio por la época seca. Este mapa será integrado en la fase 2, para obtener el modelo de susceptibilidad a quemas agrícolas e incendios forestales.

3.4.1 Pre-procesamiento de las imágenes AVHRR:

Para este estudio se utilizaron imágenes compuestas con el Índice de la diferencia normalizada de la vegetación, *NDVI*. Las composiciones fueron de los primeros 15 días de cada mes, de 4 meses de la época seca (febrero a mayo) de 1999.

Las imágenes se obtuvieron de la estación receptora de imágenes AVHRR del Ministerio de Agricultura y Recursos Naturales (MARENA) de Nicaragua. Esta estación proporciona información semi-procesada a las instituciones y laboratorios geográficos del área de Centroamérica desde 1995.

Las imágenes procesadas por MARENA, se obtuvieron del satélite NOAA-14. El procesamiento realizado por MARENA se describe a continuación¹:

- Recepción de la información de los canales de interés (1 y 2 en este caso) y conversión por el sensor a 1024 valores discretos. En esta fase del proceso hay que tomar en cuenta que el sensor se va degradando con el tiempo, pero hasta ahora no existe una

corrección para estos posibles cambios, por lo que esto puede ser una fuente de error en los resultados finales.

- Transformación de los valores crudos a valores de radiancia (corrección radiométrica) Este proceso debe realizarse con determinados coeficientes de calibración actualizados, lamentablemente en MARENA no es posible debido a que el equipo que poseen no permite la actualización, por lo tanto utilizan los coeficientes de 1995.
- Traducción de la radiancia a un factor de reflectancia bidireccional al tope de la atmósfera, esta transformación se realiza con el fin de minimizar los efectos bidireccionales mencionados anteriormente. Los valores para esta transformación tampoco han sido actualizados.
- Se aplicó un algoritmo para discriminar las nubes (anexo 1) y se excluyeron las imágenes donde las nubes cubrían todo el área de estudio.
- Se calculó el *NDVI*, descrito en la Ecuación 1 (ver 2.3) y luego se realizó la composición de imágenes, tomando para cada pixel, el valor máximo de *NDVI* de las imágenes disponibles de los primeros 15 días de cada mes.
- Se aplicó la corrección geométrica, que consiste en la re-proyección de la imagen al sistema latitud-longitud de proyección geográfica.

3.4.2 Análisis multitemporal:

Para observar los cambios fenológicos de la vegetación a partir de los valores espectrales de la biomasa se realizó un análisis multitemporal de las composiciones obtenidas en el paso anterior (ver 3.4.2). Para dicho análisis se calculó la diferencia normalizada de las imágenes compuestas de *NDVI* por pares de los meses de estudio:

- marzo – febrero
- abril – marzo
- mayo – abril

El cálculo de diferencia normalizada de *NDVI* se describe a continuación:

$$DN_{(NDVI)} = \frac{NDVI_2 - NDVI_1}{NDVI_1 + NDVI_2} \quad (3)$$

Donde: DN = diferencia normalizada

Para distinguir las áreas con comportamiento similar a las diferencias de *NDVI* entre los meses de la época seca de 1999, se realizó una clasificación no supervisada de las diferencias normalizadas obtenidas en el paso anterior. Para ello, se compuso una nueva imagen colocando cada una de las diferencias normalizadas como una banda distinta. El algoritmo utilizado para la clasificación no supervisada fue el *ISODATA* (siglas en inglés de la Técnica de Auto-Organización Iterativa de Análisis de Datos) (Jansen 1996), este algoritmo utiliza las distancias mínimas espectrales en una forma secuencial, redefiniendo los criterios para cada clase de forma iterativa, hasta ya no encontrar diferencias significativas en las distancias espectrales (Erdas 1997).

Una misma magnitud de cambio puede suceder a diferentes rangos en la escala espectral de *NDVI*. Debido a ello, también se realizó una clasificación no supervisada utilizando las imágenes compuestas con los valores netos *NDVI* de los cuatro meses estudiados.

Con los dos mapas clasificados se realizó un nuevo mapa a partir de un análisis de tabulación cruzada, el cual consiste en una superposición múltiple que muestra todas las combinaciones posibles de las clases de cada mapa (Eastman 1997). El resultado fue un nuevo mapa que muestra las clases de cambio por diferencia normalizada de *NDVI* y cada una de estas clases con sus respectivas subclases según el comportamiento de los valores netos de *NDVI*.

Todas las imágenes resultantes fueron transformadas a proyección UTM, zona 16 ya que es la utilizada por el Consejo Nacional de Areas Protegidas de Guatemala. Por último, las clases obtenidas fueron analizadas de acuerdo a su comportamiento de cambio y espectral expresado en el *NDVI*. Posteriormente se realizó un análisis de acuerdo a los tipo de

vegetación presentados en distintos estudios anteriores en el área y según la dinámica de los incendios forestales ocurridos en 1998 y 1999.

3.5 Fase 2: Modelo de las áreas susceptibles a quemas agrícolas e incendios forestales

En esta fase se combinan los factores frontera agrícola, poblados, vías de acceso y clases de vegetación para obtener el modelo de susceptibilidad a incendios. Los primeros pasos del procedimiento describen como se obtienen las coberturas geográficas de cada factor, seguidamente como se transforman estas coberturas en las variables que serán aplicadas a la Evaluación Multicriterio, cuya metodología se explica al final del capítulo.

3.5.1 Definiciones:

A continuación se definen los términos que se utilizaron en el presente estudio, lo cual servirá para determinar el contexto sobre el cual nos estamos refiriendo:

- Incendios forestales: son los fuegos o incendios que se producen en el bosque.
- Quemas agrícolas: son los fuegos que se realizan para limpiar las áreas agrícolas o convertir nuevas áreas boscosas en áreas agrícolas.
- Áreas susceptibles a incendios forestales aquellas zonas que tienen mayor incidencia a incendios forestales, debido al efecto de las actividades humanas y el estado de la vegetación durante la época seca de cada año.
- Puntos de calor: son los píxeles calientes detectados por el sensor AVHRR, en el presente estudio deben interpretarse como incendios forestales y las quemas agrícolas que no pueden ser discriminadas, ya que ocurren en áreas agrícolas posteriores al mapa de uso de la tierra utilizado (1997). Estos puntos tienen una resolución espacial de 1x1 km. y poseen todas las consideraciones que se explican en 3.5.4.
- Frontera agrícola: Se consideró frontera agrícola el límite de la zona de amortiguamiento (Figura 1), ya que esta categoría de manejo permite las quemas agrícolas. También se considera frontera agrícola todos los bordes de las áreas

agrícolas que están dentro de las zonas núcleo y de usos múltiples. Estas áreas agrícolas provienen del mapa de cambios de uso de la tierra, elaborado por el Laboratorio de Análisis Geográfico de la Universidad de Maine (1998)

- Vías de acceso: son las carreteras de primer y segundo orden, dos ríos de importancia para tránsito (río San Pedro y río Usumacinta) y la brecha limítrofe entre Guatemala y México. Todos estos se incluyen por su relevancia para permitir el acercamiento humano a las zonas con bosque dentro de la Reserva de la Biosfera Maya.
- Poblados: son todas las comunidades que se localizan dentro de la Reserva de la Biosfera Maya, localizadas con base al punto central del poblado (plaza o escuela) a través de *GPS* (siglas en inglés de Sistema de Posicionamiento Global). También incluyen poblados en forma lineal, debido que esta es una característica particular de algunos poblados, que se extienden a los dos lados de las carreteras.

3.5.2. Procesamiento de las coberturas de los factores de interés:

Los análisis fueron realizados utilizando los siguientes programas: Idrisi for Windows V. 2.0, ArcView V. 3.1 y Erdas Imagine V. 8.1. La información base de las coberturas antropogénicas (frontera agrícola, poblados y vías de acceso) se adquirieron del Centro de Monitoreo y Evaluación del Consejo Nacional de Areas Protegidas en Guatemala. La variable de clases vegetación se desarrolló en este mismo trabajo (ver 3.4).

- Frontera Agrícola: Se utilizó el mapa temático de cambio de uso de la tierra elaborado por el Laboratorio de Análisis de Imágenes de la Universidad de Maine, USA (1998). Este fue elaborado con base en imágenes Landsat TM de 1990, 1995 y 1997, con una resolución de 30x30m. Este se combinó con el mapa de zonificación de la RBM, ya que se consideró como frontera agrícola el límite interno de la zona de amortiguamiento.
- Caminos: esta cobertura se obtuvo de las siguientes fuentes de información:
 - Carreteras y ríos digitalizados por CONAP de las hojas cartográficas de escala 1:50,000 (Instituto Geográfico Nacional).

- Caminos georreferenciados con GPS (realizado por CONAP).
 - La digitalización de caminos que era posible observar a través de la imagen TM (Landsat) de 1997.
 - Finalmente con ayuda de los conocedores del área se quitaron los caminos inexistentes o dudosos.
- Poblados: la cobertura de base fue elaborada por CONAP, por medio de la georreferenciación con GPS. Esta fue modificada debido a que algunos poblados dentro de la reserva se han desarrollado a lo largo de las carreteras, por lo que no pueden ser representados por un punto sino que fueron analizados como un línea, ya que algunos cubrían hasta 4km a lo largo de la carretera.

Todas las coberturas se proyectaron a UTM, zona 16 y transformadas a formato raster con una resolución 1.074 x 1.074 km, la cual corresponde a la resolución de la cobertura de clases de vegetación por cambios a la sequía, obtenida anteriormente.

3.5.3. Procesamiento de la cobertura de puntos de calor:

Para el análisis de los incendios forestales se utilizaron los puntos de calor detectados por el sensor AVHRR de 1998 y 1999 y procesados por MARENA. Como fue definido anteriormente, los puntos de calor son pixeles calientes de 1x1 km. El procesamiento que realiza MARENA para la identificación de estos puntos, se basa en un algoritmo contextual, descrito en el anexo 2 (Flasse y Ceccato 1996).

Para la interpretación de los puntos de calor, es importante tomar en cuenta algunas consideraciones¹ (Flasse *et al.* 1996):

- el punto de calor indica que existe por lo menos un incendio en 1 km².

El punto de calor puede ser solamente una parte de un gran incendio de varios kilómetros.

- Debido a que el canal 3, es sensible a la emitancia del dosel arbóreo mas que al suelo que lo sostiene (Chuvienco 1990), muchos puntos de calor rastros dentro del bosque posiblemente no fueron detectados.

- Puede existir un porcentaje de puntos no detectados por la presencia de las nubes o humo denso (en caso de 1998).
- Si aparecen nuevos incendios después de la hora que pasa el satélite, estos no son detectados.
- No es posible captar los puntos de calor estrictamente diarios, debido a que la órbita de NOAA no pasa algunas veces por el área de estudio.
- Pueden existir algunos puntos de calor falsos que el algoritmo utilizado no haya discriminado.
- Algunos incendios son quemas agrícolas, ya que únicamente se pudieron discriminar aquellas quemas agrícolas que se encontraban dentro de la zona de amortiguamiento (ZAM) y las zonas agrícolas dentro de la reserva determinadas en el mapa de uso de la tierra (Laboratorio de Análisis de Imágenes de Maine 1998). Por lo tanto para este estudio en particular son interpretadas como incendios

3.5.4. Transformación de factores a variables a partir del análisis de los puntos de calor

A continuación se explican los procedimientos para obtener las variables a utilizar en la Evaluación Multicriterio, las cuales provienen de la transformación de los factores a partir del análisis de los puntos de calor. Las variables a obtener son las siguientes:

- distancia de puntos de calora a frontera agrícola (km)
- distancia de puntos de calora a poblados (km)
- distancia de puntos de calora a vías de acceso (km)
- frecuencia de puntos de calor en las clases de vegetación (%)

3.5.4.1 Análisis de la frecuencia de puntos de calor en las clases de vegetación:

Para el análisis se utilizaron los puntos de calor de 1998 y 1999. Se obtuvieron las frecuencias de puntos de calor para cada clase de vegetación (cobertura obtenida en la fase I). Esta variable se expresó en porcentaje respecto al área que ocupa cada clase y subclase de vegetación. Este porcentaje es el valor asignado a la cobertura del "factor" vegetación para obtener la cobertura de la "variable" vegetación.

Adicionalmente se realizó un análisis de la frecuencia mensual de los puntos de calor para cada clase de vegetación, para observar la dinámica de los puntos de calor de forma más detallada.

3.5.4.2 Análisis de la distancia de puntos de calor a los factores antropogénicos

El procedimiento de análisis de distancia de puntos de calor se describe a continuación:

- Todas las coberturas fueron transformadas a una capa tipo binario, donde cada variable (camino, poblado y frontera agrícola) tenía valor de 1 y el fondo tenía valor de 0.
- Se aplicó el módulo de distancia, siendo el resultado una cobertura, donde los valores de los pixeles corresponden a las distancias cada 1.074 km. (tamaño de 1 pixel) desde de el factor de interés (0 km.) hasta el límite del área de estudio.
- Se transformaron los puntos de calor a una cobertura binaria, donde 1 son los puntos de calor y 0 el fondo.
- Utilizando el módulo *overlay*, se multiplicó la cobertura de distancia de cada factor por la cobertura binaria de puntos de calor. El resultado es cada punto de calor con el valor de distancia de cada uno de los factores.
- Se analizaron los datos de distancia por frecuencia de pixeles, y se obtuvo el modelo matemático que más se ajustaba a la curva de datos.

- Por último se transforma la cobertura de distancia de cada "factor" según el modelo correspondiente, para obtener finalmente una cobertura cada "variable", donde los valores no son unidades métricas (de distancia), sino que corresponde a la probable frecuencia de ocurrencia de puntos de calor según el modelo establecido.

3.5.5. Evaluación Multicriterio

Hasta ahora únicamente se obtuvieron las coberturas de los factores transformadas en variables para poder aplicarlas a la Evaluación Multicriterio. Esta Evaluación permitirá obtener el modelo final de susceptibilidad de incendios, a través de la suma jerarquizada de las variables. A continuación se detalla el procedimiento:

3.5.5.1 Valoración y jerarquización de variables:

Las Evaluaciones Multicriterio consisten en el análisis de los factores que afectan a uno o varios objetivos. En nuestro caso, sólo se tiene un objetivo: "las áreas con susceptibilidad a incendios forestales".

Los criterios de decisión de cada variable se obtuvieron empleando un proceso de jerarquización analítico, propuesto por Saatii (citado por Eastman 1997). Esta consiste en valorar cada una de las variables, analizadas por pares. Para realizar esta valoración se construye una matriz y se otorgan los pesos según la escala de Saatii. Un ejemplo explicativo se muestra en Figura 2 y Cuadro 3. Con esta valoración se mide la importancia relativa de las variables sobre la capacidad para provocar un incendio forestal. Con los valores obtenidos, se calculó el peso de cada variable a partir del módulo *Weight* de Idrisi V.2.0, éste se calcula a partir del eigenvector principal de la matriz de comparación por pares (Eastman 1997). Una vez realizada la evaluación de los pesos, se analizó la congruencia de los mismos, a través de un índice de consistencia, que se calcula al aplicar el módulo *Weight* (Eastman 1997). Si los valores son inconsistentes, la matriz debe ser evaluada nuevamente.

Cuadro 3. Ejemplo de la matriz de valoración por pares de variables para la Evaluación multicriterio. Se realiza con base en la escala de la figura. La variable de la fila tiene más peso cuando el valor es positivo y la variable de la columna tiene más peso cuando el valor es negativo.

	Vías de acceso	Frontera agrícola	poblados	Vegetación
Vías de acceso	0			
Frontera agrícola	5	0		
Poblados	3.5	-3	0	
Vegetación	-4	-8	-5.5	0

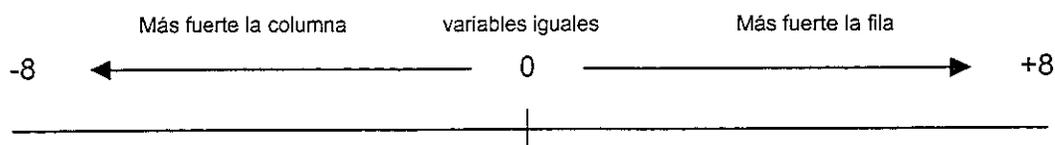


Figura 2. Escala para la valoración de las variables para la Evaluación Multicriterio. Los valores van de 0 a 8 si la variable que más pesa es la de la fila y de 0 a -8 si la variable que más pesa es la de la columna.

Para obtener mejores resultados de la Evaluación Multicriterio se utilizó la metodología "Delphi" (Schuster *et al.* 1995). Para ello se obtuvo la opinión de 12 expertos en incendios forestales. El número de expertos se eligió con base en que esta metodología puede desarrollarse con un mínimo de 8 expertos (Schuster *et al.* 1995), además que para el país son pocas las personas capacitadas en incendios forestales.

Este método permitió organizar la opinión de los expertos ya que consiste en una serie de evaluaciones donde cada persona que se entrevista debe evaluar y emitir un juicio, posteriormente se analiza esta evaluación y se elabora un resumen que se entrega nuevamente a cada persona antes de realizar una nueva evaluación. Este resumen debe permitir que las opiniones de los expertos tiendan a un consenso de valores y juicios. En el caso de este estudio se realizaron tres evaluaciones, ya que se consideró que fue suficiente para el consenso, porque que una evaluación más hubiera influido mucho en las siguientes respuestas.

Para la evaluación inicial se elaboró un documento con las definiciones de las variables a evaluar, una boleta con la matriz para la evaluación por pares y un espacio para dar el juicio de la evaluación (Anexo 3). Después de obtener un consenso en la jerarquización de variables, en la última evaluación se aplicó el índice de consistencia a las valoraciones de cada experto, para obtener congruencia en sus resultados. Finalmente, se analizaron los resultados de los 12 expertos para obtener el valor a utilizar en el análisis final de las variables. El valor de la evaluación que se utilizó fue la moda, debido a que era la mejor medida de tendencia central para evitar los extremos.

3.5.5.2 Aplicación final de la Evaluación Multicriterio:

Después de obtener el peso de las variables, se aplicó el análisis final de las variables utilizando el módulo *MCE* en Idrisi V.2.0. El método empleado fue el de "combinación lineal ponderada", donde se multiplica la cobertura de cada variable por el peso obtenido anteriormente y luego se suma los resultados. Con esta metodología, a mayor peso del factor mayor la influencia tendrá en el mapa final (Eastman 1997). Después de realizado este proceso, el resultado es el mapa final donde se obtienen las áreas con mayor susceptibilidad de acuerdo la combinación jerarquizada y valorada de las variables.

4. RESULTADOS

4.1 Análisis climático:

El análisis climático que se presenta es únicamente de la estación meteorológica de Flores, debido a que en la RBM es la única con funcionamiento normal. Sin embargo se realizó el presente análisis, para determinar de alguna forma el comportamiento del clima y poder relacionarlo posteriormente con la dinámica de la vegetación en el área. En la Figura 3 se puede observar el comportamiento de la precipitación (PPT), temperatura (T) y evapotranspiración potencial (ETP). Los meses secos son aquellos donde la precipitación está por debajo de la evapotranspiración potencial, y los meses lluviosos son lo contrario, donde la precipitación supera la evapotranspiración.

La época seca de 1997, inició realmente desde diciembre de 1996 y se extendió a mayo de 1997. La época lluviosa tuvo un período de junio a noviembre, pero resalta la canícula en el mes de agosto. Para el año 1998, que fue afectado por el fenómeno del Niño, se muestra con claridad la sequía que existió en este año, hubo déficit de humedad desde diciembre de 1997 hasta septiembre de 1998. El único mes de ese año con superávit de humedad fue octubre. Por último, la época seca de 1999, dio inicio desde noviembre del año 1998 y continuó hasta mayo, mes cuando culminó el presente estudio.

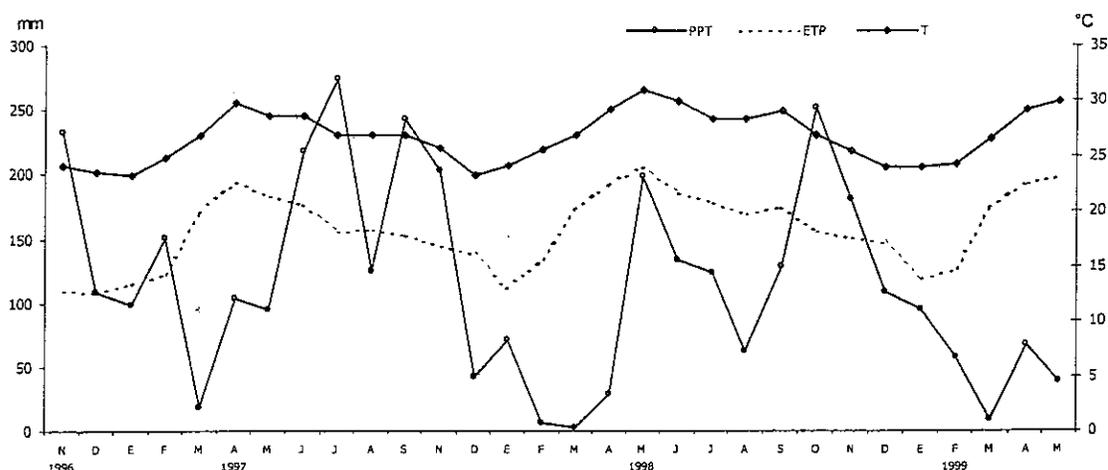


Figura 3. Comportamiento climático de la estación meteorológica de Flores, Petén (Lat. 16°54'53" Lon. 89°51'59"). PPT = precipitación, ETP = evapotranspiración potencial, T = temperatura. De noviembre de 1997 a mayo de 1999.

Por otro lado, en la Figura 4 se muestra el comportamiento quincenal de precipitación y temperatura para la misma estación de Flores para el período de enero a mayo de 1999, en esta figura se puede observar los picos de lluvia en la segunda quincena de febrero y abril, así como también las quincenas con menor precipitación entre la primera de marzo a la primera de abril. Mayo también muestra baja precipitación. En cuanto a la temperatura se ve una ligera tendencia a aumentar de enero a mayo.

Esta información se utilizará para discutir el comportamiento de los cambios de *NDVI*, los cuales involucran la primera quincena de cada mes (ver 4.3.1)

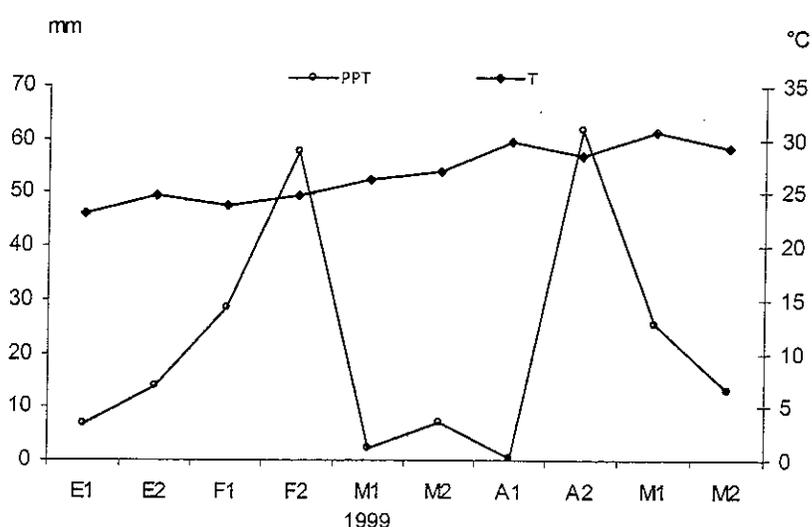


Figura 4. Comportamiento climático quincenal de la precipitación (PPT) y temperatura (T) de la Estación meteorológica de Flores, Petén, Guatemala.

4.2 Situación actual de las causas de los incendios forestales en la RBM:

La siguiente descripción de las causas principales de incendios forestales en la RBM, se basa en los datos recopilados de los incendios de 1999 (Cuadro 4) y en la información de los incendios de 1998, recopilada de la base de datos de la Comisión Nacional de Incendios.

Cuadro 4. Porcentaje de las causas de los incendios forestales en la Reserva de la Biosfera Maya para 1999.

Causas de incendios	porcentaje
Quemas agrícolas	67
Cazadores	11
Incendiaros	11
Colmeneros	3
Xateros	3
desconocidos	5

La causa principal de incendios forestales son las quemadas agrícolas. En 1999 67% de incendios forestales en la RBM fueron provocados por esta causa. Esta actividad tuvo tal magnitud en 1998 que fue causa de incendios forestales incluso en comunidades donde no se dedican exclusivamente a la agricultura. Por ejemplo en la zona de usos múltiples en San Miguel La Palotada se dedican a la extracción forestal, sin embargo la mayoría de los incendios han sido provocados por quemadas que provienen del sur del área de concesión forestal de esta comunidad. Pero, a pesar de que las quemadas agrícolas son la causa principal de incendios en el área, en 1999 disminuyó la amenaza, debido a que esta actividad tuvo un programa preventivo por parte de CONAP e INAB.

Otra actividad con alta incidencia de incendios forestales es la cacería, provocando en 1999 11% de los incendios (Cuadro 3). En 1998 en el Parque Nacional Laguna del Tigre (Figura 1) cuatro de los seis incendios que existieron fueron causados por cazadores. La razón de esta causa de incendios en el parque es la existencia de sabanas inundables, las cuales son preferidas para la cacería de venados (*Odocoileus virginianus* o *Mazama americana*) porque es hábitat preferido de estos mamíferos y además arde con facilidad. Otra característica importante en esta área es que los cazadores no solo provienen de las comunidades que existen adentro del parque, sino que también vienen de la frontera con México. Además del venado, la cacería con fuego también es frecuente con el tepezcuintle (*Agouti paca*). Este animal vive en madrigueras y los cazadores hacen fogatas a la entrada de ellas para obligarlos a salir. Este causa es menos frecuente, aunque por el uso del fuego, se convierte en una amenaza para los bosques.

Otra causa son los incendiarios, 11% de los incendios de 1999 fueron provocados premeditadamente por alguna persona. Estos incendios ocurren cerca de las comunidades y los provocan principalmente por disputas o venganzas. Por ejemplo, en 1998 las comunidades que poseen concesiones forestales, como Carmelita y San Miguel la Palotada tuvieron casos de incendios provocados por personas ajenas a la Cooperativa de la concesión, y provocaron incendios debido a que no están de acuerdo con el proceso.

Con menor incidencia, otra causa es la actividad de extracción de miel de abeja y de xate dentro de los bosque. Este año cada una de estas actividades provocó el 3% de los incendios (Cuadro 4). Para la extracción de miel de abeja, los "colmeneros" utilizan el fuego para ahuyentar a las abejas y obtener el producto. En el caso de los "xateros" los incendios ocurren por descuidos en los campamentos, que se ubican dentro del bosque.

Por último también existen casos, aunque en menor frecuencia de invasión por mexicanos, quienes, entran a quemar áreas que sirven posteriormente para la extracción ilegal de madera.

4.3 Fase I. Clasificación de la vegetación según los patrones de cambio por los efectos de la época seca, utilizando imágenes de satélite AVHRR

4.3.1 Análisis de cambio de *NDVI*:

Los valores promedio de *NDVI* para toda el área de los cuatro meses estudiados, oscilaron entre 0.12 hasta 0.64. En la Figura 5 se puede observar el mapa de clase de vegetación por cambios a los efectos de la época seca. Este mapa muestra 3 clases de cambio por la sequía, representadas por tres colores diferentes: amarillo, café y verde. Cada una de estas clases posee 3 subclases obtenidas según el rango de valores de *NDVI* en la escala espectral (ver 3.4.2), estas subclases están representadas en el mapa por tres tonalidades diferentes dentro de cada clase. A continuación se describe cada clase tomando en cuenta su localización geográfica, área que cubre por categoría de manejo (Cuadro 4) el tipo cambio por la sequía (Cuadro 5 y Figura 6), y el comportamiento de cada subclase (Figura 7). Los nombres de las clases obedecen a la ubicación geográfica, debido a que esto facilitará a los usuarios del mapa en la región de estudio.

4.3.1.1 Clase Oeste (O):

Esta clase posee un cambio intenso por la sequía y posee valores de *NDVI* más bajos respecto a las otras clases.

Localización (Figuras 1 y 5, Cuadro 4): Se localiza a lo largo de la carretera que va de Flores a El Naranjo, en una franja ancha tanto hacia el norte como el sur de la ruta. Cubre 1013.5 km² del Parque Nacional Sierra de Lacandón (50.12%), 1783.83 km² (38%) de la zona de amortiguamiento que le bordea (norte). Además se distribuye hacia el Noroeste de la reserva, cubriendo 1350.15 km² (39.8%) del Parque Nacional Laguna del Tigre.

Comportamiento de Cambio (Cuadro 5 y Figura 6): El comportamiento de cambio entre febrero y marzo es ligeramente negativo, pero muy cercano a cero ($x=-0.0115$). El valor negativo indica que en promedio marzo fue más seco que febrero, Entre marzo y abril ocurrió el cambio más drástico de secamiento ($x=-0.1468$), donde abril fue más seco que marzo. Luego de abril a mayo el cambio es positivo, lo cual quiere decir que mayo fue más húmedo por efecto de las primeras lluvias, y hay que observar que el cambio entre estos dos meses es más alto que los cambios entre los meses anteriores ($x=0.199$).

Comportamiento espectral del *NDVI* mensual (Figura 7): Para este análisis, llamaremos a las subclases O-1, O-2 y O-3. En general esta clase muestra el valor mínimo de *NDVI* en abril ($x=0.3510$) y el máximo en mayo ($x=0.5188$). En febrero y marzo las diferencias espectrales entre las subclases no se destacan ya que las curvas de *NDVI* casi se sobreponen. En el mes de abril, ya se observa una diferenciación clara, donde la subclase O-1 tiene valores más bajos de *NDVI*. Las otras dos subclases se diferencian menos, pero la subclase O-2 posee valores ligeramente menores a la subclase O-3. En mayo también hay diferenciación de comportamiento, la subclase O-1 aumentó considerablemente en los valores de *NDVI*. La subclase O-2 también tuvo el mismo comportamiento, pero más moderado. Pero, la subclase O-3 tendió a una disminución de los valores de *NDVI*.

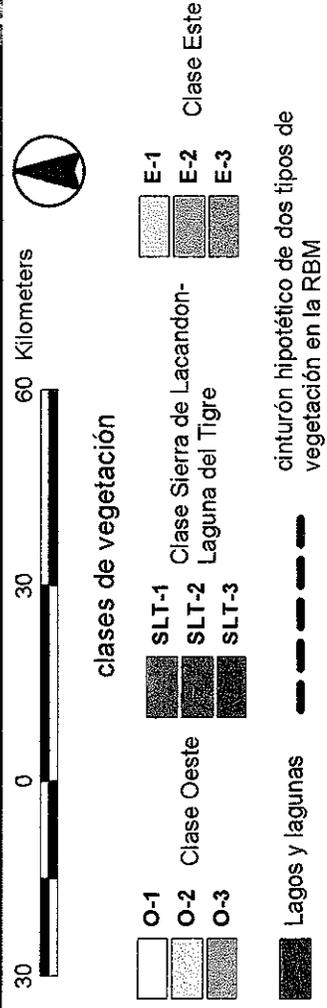


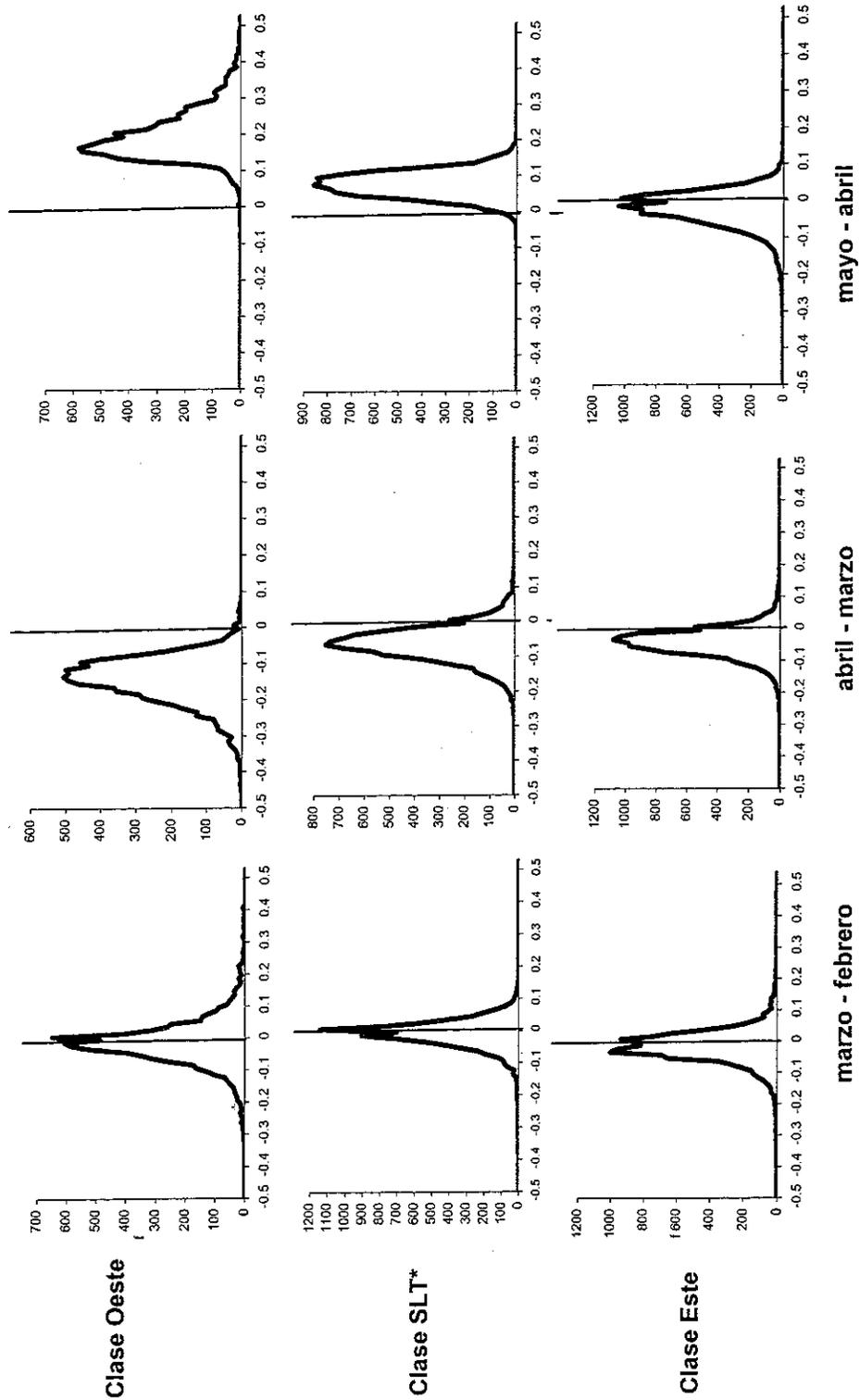
Figura 5. Mapa de las clases de vegetación según sus cambios por los efectos de la época seca de la Reserva de la Biosfera Maya.

Cuadro 5. Area en km² de las clases de vegetación según cada categoría de manejo de la RBM

Categoría de manejo	Area en Km ²						total
	clase Oeste	clase SLT	clase Este	agricultura	total	total	
Parque Nacional Laguna del Tigre/Biotopo	1350.15	1770.31	258	13.51	3391.97		
Parque Nacional Sierra de Lacandón	1013.5	947.2	52.82	8.59	2022.11		
Zona de Usos Múltiples	391.89	1196.59	6796.22	28.24	8412.94		
Parque Nacional Tikal	0	2.45	556.52	0	558.97		
Biotopo Zotz	0	6.14	355.04	0	361.18		
Parque Nacional Mirador	0	81.08	453.32	0	534.4		
Biotopo Dos Laguna	0	90.91	222.36	0	313.27		
Parque Nacional Río Azul	0	144.97	479.13	0	624.1		
Zona de amortiguamiento	1783.83	1617.97	1307	0	4708.8		
Total Reserva de la Biosfera Maya	1405.39	4239.65	9173.41	50.34	16736.17		

Cuadro 6. Estadística descriptiva de la diferencia normalizada para las clases de vegetación

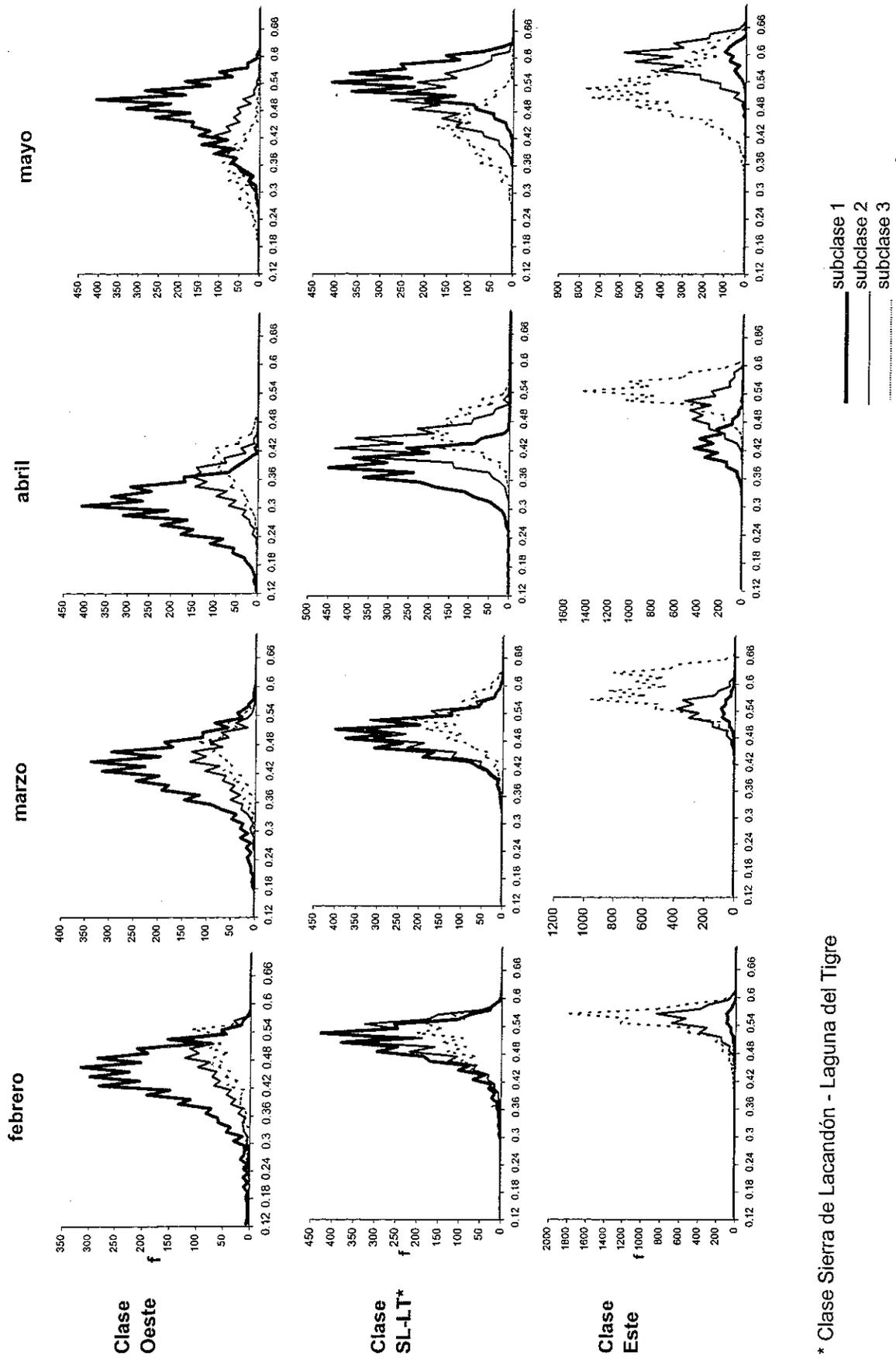
clase	marzo-febrero		abril-marzo		mayo-abril	
	Oeste	SLT	Oeste	SLT	Oeste	SLT
media	-0.0115	-0.0099	0.0247	-0.0429	0.199	-0.0253
desviación estándar	0.0823	0.0468	0.0639	0.051	0.0692	0.0628
mínimo	-0.33	-0.31	-0.28	-0.28	-0.05	-0.14
máximo	0.41	0.19	0.51	0.29	0.49	0.48



Diferencia normalizada entre los meses de estudio (febrero a mayo 1999) clase de vegetación

* Clase Sierra de Lacandón - Laguna del Tigre

Figura 6. Histogramas de la diferencia normalizada de NDVI por pares de meses de la época seca de 1999, para cada clase de vegetación según los cambios que sufre por efectos de la época seca.



* Clase Sierra de Lacandón - Laguna del Tigre

Figura 7. Histogramas del comportamiento espectral expresado en NDVI, de las clases de vegetación en los meses de la época seca.

Tipos de vegetación: La subclase O-1, corresponde a las áreas agrícolas y ganaderas² (Obs. pers), O-2 y O-3, corresponde a pastizales inundables, bosque pantanoso (Méndez et al. 1998).

4.3.1.2. Clase Sierra de Lacandón - Laguna del Tigre (SLT):

Esta clase tuvo cambios a la sequía moderados, en rangos de *NDVI* medios respecto a las otras clases.

Localización (Figuras 1 y 5, Cuadro 4): Esta clase cubre un área de 947.2 km² (47%) del Parque Nacional Sierra de Lacandón y 1770.31 km² (52%) del Parque Nacional Laguna del Tigre (27%). Sin embargo es el grupo más disperso sobre la zona de amortiguamiento (ZAM) cubriendo 1617.97 km².

Comportamiento de cambio (Cuadro 5 y Figura 6): Entre febrero y marzo, el cambio fue negativo pero pequeño ($x=-0.0411$). Entre abril y marzo también ocurre un cambio negativo ligeramente mayor ($x=-0.0632$). Hasta aquí existe una tendencia de secamiento desde de febrero a abril. Pero entre de abril a mayo el cambio ya es positivo, aunque muy cercano de cero ($x=0.0772$), es decir que la vegetación tendió a humedecerse.

Comportamiento espectral del *NDVI* mensual (Figura 7): En general esta clase presenta valores de *NDVI* un poco más altos que la clase Oeste. Las medias de los *NDVI* oscilan entre 0.4579 y 0.5319 siendo la menor abril y la mayor mayo. En cuanto a las subclases de *NDVI*, estas tampoco se diferencian sino hasta la época más seca, ya que las curvas espectrales de febrero y marzo se traslapan casi por completo. En el mes de abril la subclase SLT-1 tiene una tendencia a secarse más que la subclase SLT-2, y ésta tendió a secarse más que la subclase SLT-3. En el mes de mayo el comportamiento también se diferencia, donde la subclase SLT-1 pasó a tener los valores más altos de *NDVI* por lo que sufrió el mayor cambio positivo. La subclase SLT-2 también tendió a ser positiva pero en menor grado que la anterior. Por último la subclase SLT-3 pasó a ser la clase con valores más bajos, aunque respecto al mes anterior también aumento ligeramente.

Carrera R. 1999. Comunicación Personal. Tipos de coberturas en la Reserva de la Biosfera Maya. Ex – Director de la Reserva de la Biosfera Maya. CONAP Región VIII, Guatemala.

Tipos de vegetación: La subclase SLT-1 corresponde a las áreas de intervención humana, la subclase SLT-2 puede corresponder a áreas de sabana inundable (Méndez *et al.* 1998) y la subclase SLT-3, pueden ser áreas de bosque de transición en el Parque Nacional Laguna del Tigre y bosque alto en el Parque Nacional Sierra de Lacandón².

4.3.1.3 Clase Este: (E)

Esta clase tuvo cambios debidos a la sequía moderados en rangos de *NDVI* más altos, respecto a las otras clases.

Localización (Figuras 1 y 5, Cuadro 4): Esta clase esta muy bien definida y cubre la mayor parte de la Reserva. Ocupa la mayor parte de la Zona de Usos Múltiples (ZUM) con 6796.22 km² (81%), El Parque Nacional Tikal (PNT) con 556.52 km² (99%), Biotopo el Zotz (BT) con 355.04 km² (98%), El Parque Nacional Mirador (PNM) con 453.32 km² (85%) el Biotopo dos Lagunas (BDL) con 222.36 km² (71%) y el Parque Nacional Río Azul (PNRA) con 479.13 km² (78%) También se combina con otras clases en la clase de amortiguamiento. En total ocupa 9173.41 km² (54.81%) del área de la RBM.

Comportamiento de cambio (Cuadro 5 y Figura 6): Entre febrero y marzo el promedio de cambio fue positivo y muy cercano a cero ($x=0.0247$), es decir marzo fue ligeramente más húmedo que febrero. Entre marzo y abril el cambio fue ligeramente negativo ($x=-0.0429$) y de abril a mayo sigue siendo negativo pero ligeramente menor respecto al mes anterior ($x=-0.0253$).

Comportamiento espectral del *NDVI* mensual (Figura 7): Los promedios de *NDVI* mensuales de esta clase son los más altos de toda la reserva. Oscilan entre 0.4996 y 0.5680 siendo el menor promedio el de mayo y el mayor el de marzo respectivamente. En el mes de febrero las curvas se sobreponen casi por completo, pero se diferenciaron en marzo, donde la curva de la subclase E-3 tendió a moverse a la derecha, es decir que la vegetación ganó humedad. En abril la diferencia entre subclases se distingue claramente, las tres subclases tendieron a disminuir respecto al mes anterior, pero se observa que la subclase E-1 presentó los valores más bajos de *NDVI*, seguido de la subclase E-2 y E-3. En mayo las subclases E-1 y E-2 tendieron a aumentar los valores de *NDVI* y nuevamente se sobreponen

las curvas. Sin embargo, la subclase E-3 tendió a disminuir ligeramente, es decir que la diferencia negativa que se observa en la Figura 6, se debe únicamente a esta subclase, lo cual ocurre porque es la subclase con mayor número de píxeles.

Tipo de vegetación: las subclases E-1 y E-2 corresponde a las zonas más degradadas, camino hacia Carmelita, E-2 posiblemente corresponde a áreas de bosque pantanoso². Por último E-3 corresponde al bosque alto.

4.4 Fase 2: Modelo de las áreas susceptibles a incendios forestales

4.4.1 Análisis de puntos de calor respecto a los factores del modelo

4.4.1.1 Análisis de la frecuencia de puntos de calor en las clases de vegetación

Como se mencionó anteriormente en la metodología (ver 3.5.5.1), esta fase se realizó a través de los puntos de calor de 1998 y 1999 provenientes de imágenes *AVHRR*.

En 1998, ocurrieron en el área de estudio 4,568 puntos de calor y en 1999 2,946. Los cuales ocurrieron más en la zona de amortiguamiento (ZAM) y las zonas agrícolas dentro de la reserva. En la Figura 8 se puede observar que el porcentaje de puntos de calor respecto al área en estas zonas fue de 29% y 21% respectivamente para 1998 y 1999.

Para las clases de vegetación obtenidas, la mayor incidencia de puntos de calor ocurrió en la clase Oeste, donde el porcentaje fue de 11% y 6% respectivamente para 1998 y 1999. La clase SLT fue la segunda más afectada con 8% y 3%. Por último la clase Este presentó la menor incidencia con 7% y 2% respectivamente para los dos años de estudio.

Ahora bien, el análisis de las subclases se puede observar en la Figura 9. A continuación se describe el comportamiento de ellas dentro de cada clase:

Clase Oeste: En la Figura 9a. se observa que la clase con mayor porcentaje de puntos de calor es la O-1 con 28 y 13% respectivamente para 1998 y 1999, seguido de la O-2, con 25 y 8% y por último la O-3 con 20 y 3%. respectivamente para los dos años mencionados

Clase SLT: el comportamiento de esta clase se observa en la Figura 9b. donde se observa la misma tendencia que la clase anterior, la clase SLT-1 con 31 y 5% respectivamente para 1998 y 1999, seguido de SLT-2 con 23 y 5% y por último la SLT-3 con 5% y 1% respectivamente para los dos años mencionados.

Clase Este: en esta clase existe la misma tendencia entre subclases para 1998 (Figura 9c) donde la subclase E-1 posee el mayor porcentaje(20%), seguido de la clase E-2 (3%) y la clase E-3 (3 %). Para 1999, la tendencia no fue igual, ya que la subclase E-2 fue la que mayor incidencia tuvo con 17%

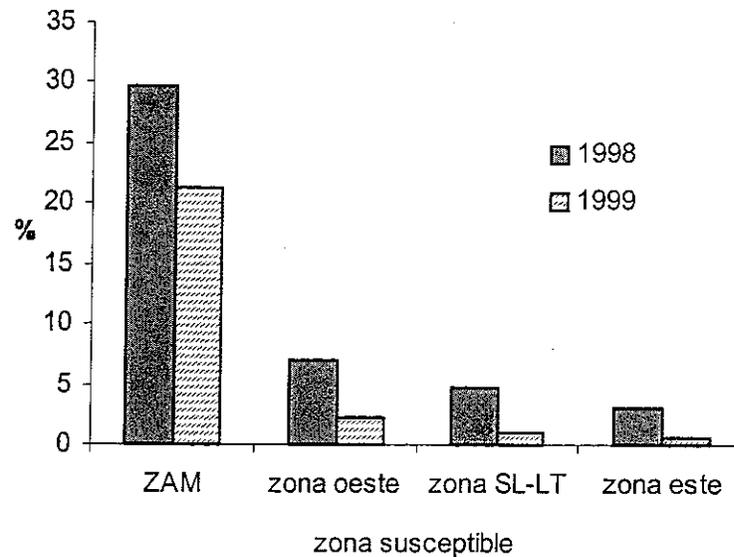


Figura 8. Porcentaje de puntos de calor respecto al área de cada clase de vegetación

Figura 9a.

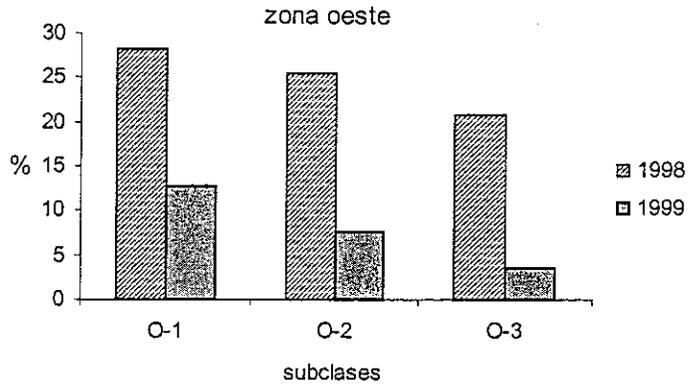


Figura 9b.



Figura 9c.

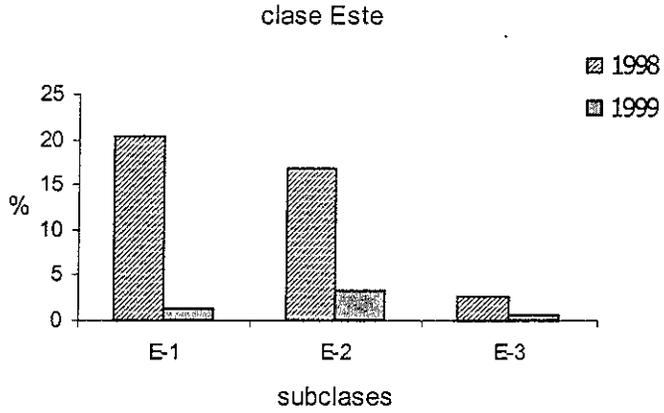


Figura 9. Porcentaje de puntos de calor respecto al área de cada subclase de vegetación para 1998 y 1999.

A continuación se describe el análisis del comportamiento mensual de los puntos de calor entre y dentro de cada clase. El análisis por clases puede observarse en la Figura 10, donde se muestra el porcentaje de puntos de calor en relación al área de cada clase de vegetación por mes. Para las clases Oeste y SLT en los dos años evaluados, el mes de abril fue el que presentó más puntos de calor, seguidamente mayo, marzo y febrero. Para la clase Este, en 1998, la mayor cantidad de puntos de calor ocurrieron en mayo y en 1999 fue en abril, aunque muy similar al número ocurrido en mayo.

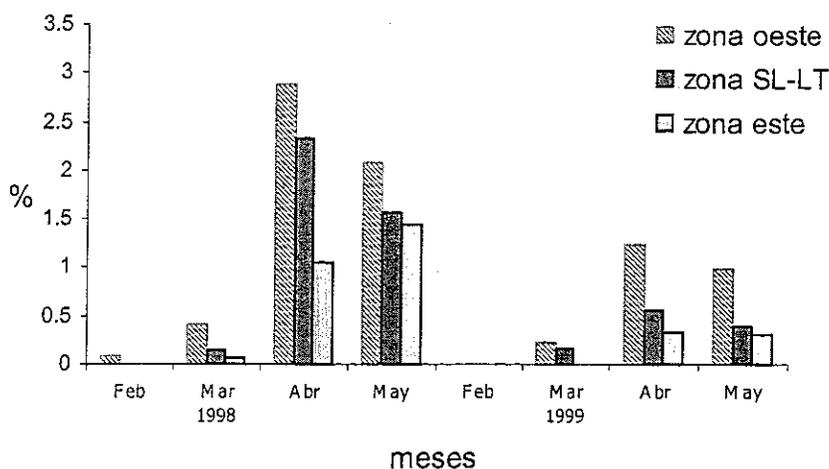


Figura 10. Porcentaje de puntos de calor según el área de cada clase de vegetación por mes.

Ahora bien el análisis por subclases se puede observar en la Figura 11. Para 1998, abril fue el mes que mayor porcentaje de puntos de calor presentó excepto para las subclases SLT-3, E-2 y E-3, las que presentaron mayor porcentaje de puntos de calor en el mes de mayo. La ocurrencia de puntos calientes en marzo es bastante baja y se presentó sobre todo en las subclases O-1 y O-2 y SLT-1. Para 1999, la incidencia de puntos de calor fue más pareja en abril y mayo, pero abril continuó siendo el mes con más puntos, a excepción de la clase E-2, donde mayo superó. El mes de febrero de 1999 no presentó puntos de calor.

Figura 11a.

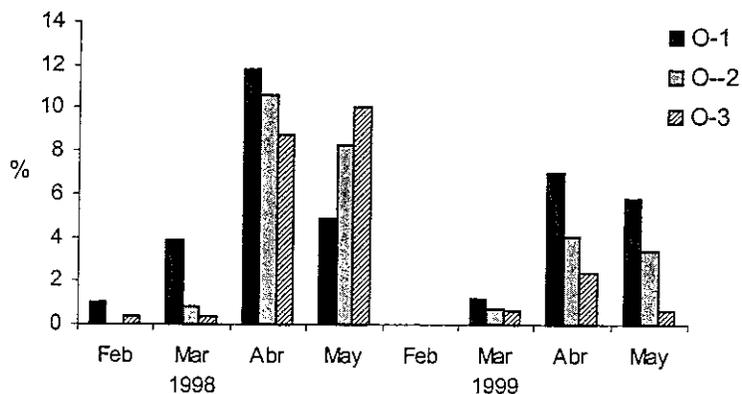


Figura 11b.

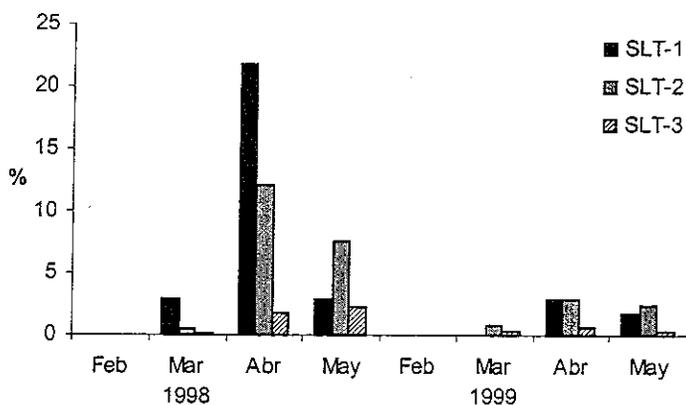


Figura 11c.

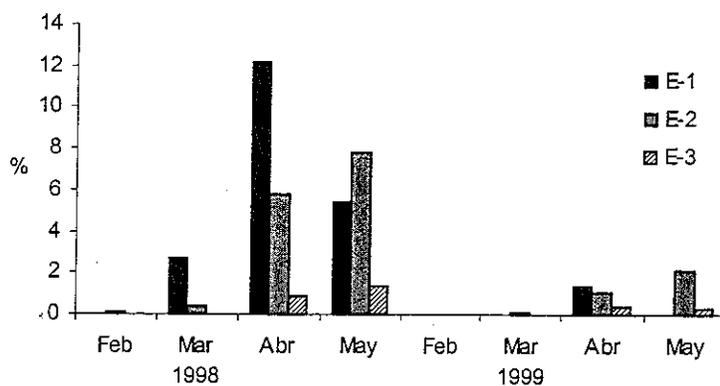


Figura 11. Porcentaje de puntos de calor respecto al área de cada subclase de vegetación, por mes para 1998 y 1999.

4.4.1.2 Análisis de la distancia de puntos de calor a los factores antropogénicos

En la Figura 12. se pueden observar las gráficas de los análisis de frecuencia de puntos de calor según la distancia a frontera agrícola, caminos y poblados. Para el caso frontera agrícola y poblados, el modelo que más se ajusta a la curva de datos fue exponencial. Para el caso de vías de acceso, la mejor curva fue de un modelo cuadrático.

Para frontera agrícola, el R^2 fue bastante alto (0.93), encontramos una incidencia de 30% de puntos de calor en el primer kilómetro de la frontera agrícola, la cual disminuyó al 13% en el kilómetro 2. Para poblados el R^2 fue de 0.88, la curva exponencial se ajusta menos en los primeros dos kilómetros, donde la incidencia de puntos fue 6 y 8% respectivamente y en el kilómetro 3 aumenta al 13% y se mantiene similar hasta kilómetro 5, en seguida el comportamiento fue exponencial. La razón de este comportamiento se debe a que los poblados están representadas por el punto central del mismo, y muchos de ellos tienen un radio mayor a 1km, pero la tendencia en general es exponencial. En cuanto a vías de acceso, el R^2 obtenido fue de 0.9138 con un ajuste al modelo cuadrático. Sin embargo, en la gráfica podemos observar que la tendencia sigue un aumento de puntos de calor, mientras más cerca de los caminos. El 25% de los puntos ocurrieron en el primer kilómetro y luego bajó a 12% en el kilómetro 2.

4.4.2 Evaluación Multicriterio

4.4.2.1 Valoración y jerarquización de variables

Para realizar esta valoración se entrevistaron a los 12 expertos que se listan en el anexo 2. Los resultados de cada una de las entrevistas para la valoración, realizado con base en la metodología Delphi, se muestran en el anexo 3. En estas gráficas se puede observar el grado de evolución de las respuestas de los expertos.

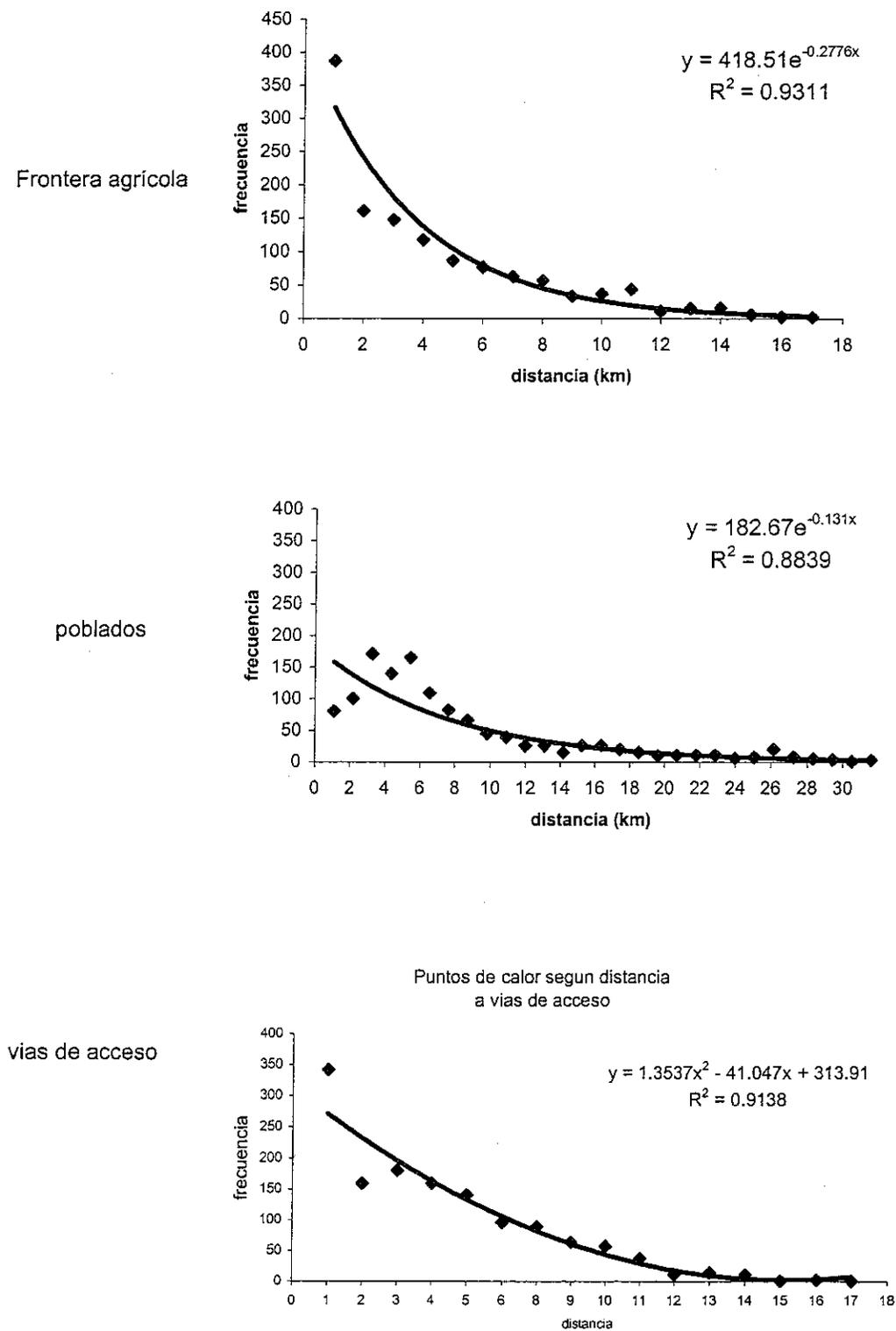
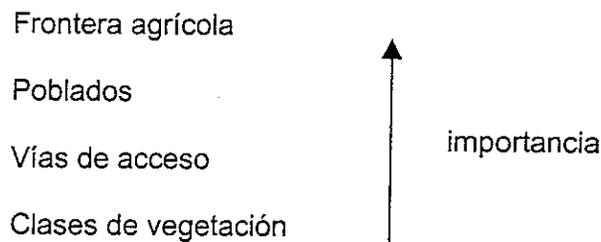


Figura 12. Análisis de distancia de los puntos de calor a frontera agrícola, poblados y vías de acceso.

La jerarquización de las variables según las evaluaciones quedaron de la siguiente manera:



En el Cuadro 7, se muestra la matriz resultante de las evaluaciones, para la cual se utilizó la moda de las valoraciones de los expertos. Debe leerse primero la columna y después la fila. El índice de consistencia de los datos es de 0.04, la cual se encuentra debajo del mínimo aceptado (0.1) para obtener una buena valoración.

Cuadro 7 . matriz de los resultados de la evaluación por pares de variables. También se muestra el peso calculado para cada variable según el método del eigenvector principal

	Frontera agrícola	Poblados	Vías de Acceso	Vegetación	Peso
Frontera Agrícola	0				0.5505
Poblados	-2.5	0			0.2853
Vías de acceso	-5	-3	0		0.1214
Vegetación	-9	-7	4	0	0.0427

Las valoraciones presentadas se basan en los siguientes juicios de los evaluadores entrevistados:

- Frontera Agrícola: La mayoría de los incendios forestales tienen su origen en las quemadas agrícolas, las cuales se realizan por ahorro de mano de obra y así bajar los costos de producción. Las quemadas agrícolas son peligrosas porque si no se realizan correctamente, se puede propagar el fuego con facilidad provocando un incendio más severo, o si se extiende a las áreas de bosque se convierte en un incendio forestal

- Poblados: Los poblados poseen más actividad humana y aunque no existan accesos importantes siempre hay más riesgo a que ocurran incendios forestales. Esto se debe a que son los pobladores los que se desplazan a cualquier parte de los bosques, existiendo o no vías de acceso. Hay más uso de fuego en los poblados que en los caminos. Además existen fuentes de incendios forestales por conflictos entre pobladores, y muchas veces incendian sus propios terrenos, los cuales generalmente están cerca de los poblados.
- Vías de acceso: En los caminos también existe mucha actividad humana, que puede provocar incendios, pero se consideran de menor proporción que las dos variables anteriores. Aún así, con la existencia de vías de acceso existe una alta probabilidad de ocurrencia debido a la facilidad para extraer los productos del bosque como xate o chicle
- Clases de vegetación por cambios a la sequía: Por sí misma la biomasa es la que se puede quemar, si la biomasa está más susceptible, una chispa puede extenderse con facilidad y perder el control. Aun así, tiene menos importancia porque en sitios alejados a poblados, caminos y frontera agrícola no han existido muchos incendios forestales dentro de la RBM.

5.4.3 Mapa del modelo de susceptibilidad a incendios forestales:

En la Figura 13 se muestra el mapa final de áreas susceptibles a incendios forestales. En dicho mapa se pueden observar tres clases de susceptibilidad basados en la distancia de los puntos de calor a las variables antropogénicas y la frecuencia de puntos de calor a las clases de vegetación por cambios a la sequía. Se eligieron tres clases debido a que eran suficientes para presentar una buena explicación de las áreas. Sin embargo estas tres clases se obtuvieron de una primera clasificación de 8 clases, que fue el número que permitió la observación visual del efecto de los caminos cuando se encontraban solos.

Las áreas de susceptibilidad alta fueron aquellas donde los píxeles tenían el máximo valor de todas las variables medidas. Las áreas de menor susceptibilidad fueron aquellas

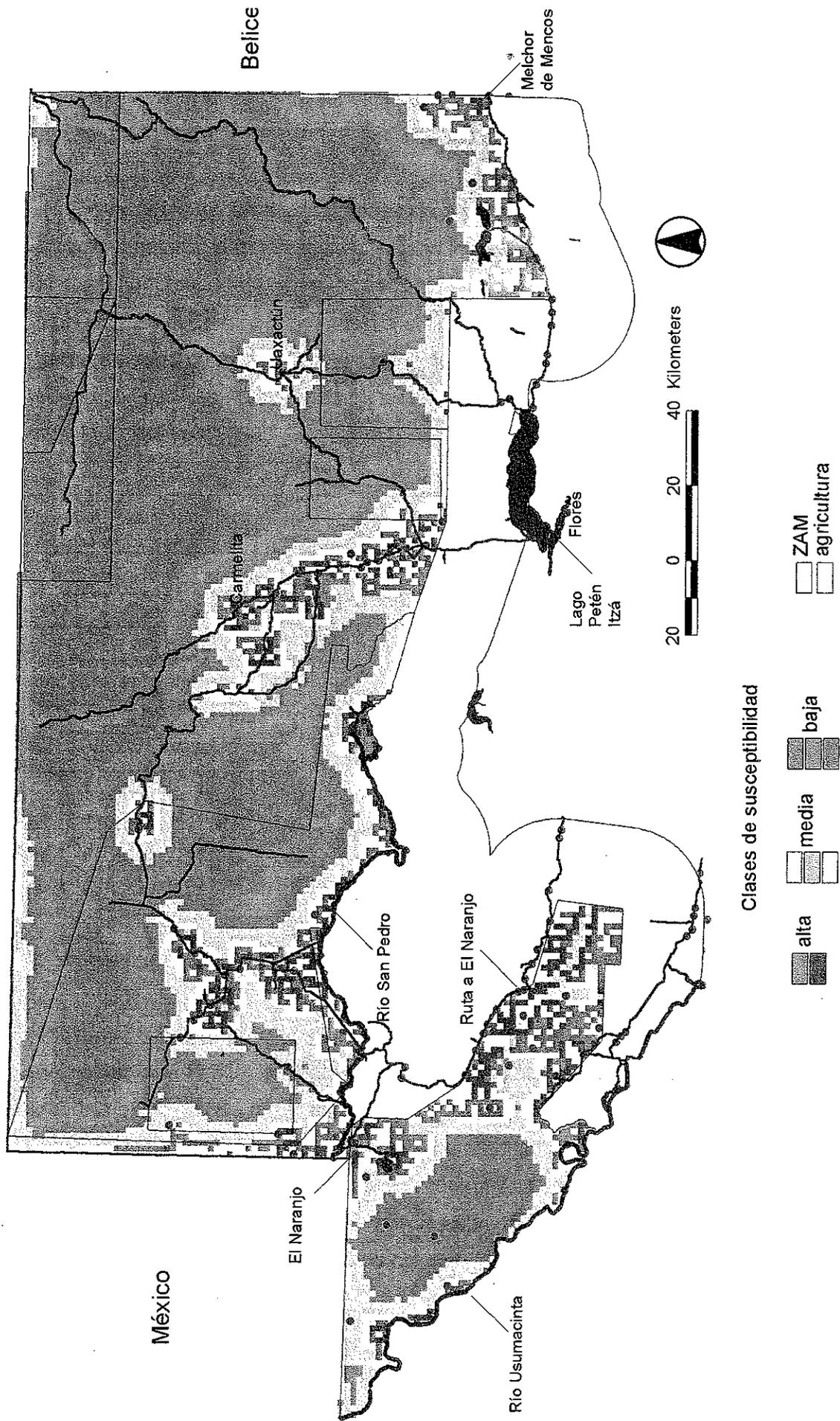


Figura 13. Mapa de susceptibilidad a incendios forestales de la Reserva de la Biosfera Myaya, Guatemala.

que únicamente podían estar influenciadas por la vegetación, es decir aquellas áreas alejadas de la frontera agrícola, caminos y poblados. Estos valores se obtuvieron sobre todo al Este de la RBM.

En términos generales, las áreas más afectadas fueron las que bordearon la zona de amortiguamiento, la mayor susceptibilidad inicia a partir de esta zona y va disminuyendo hacia el norte de la reserva, a excepción de los sitios que poseen una alta influencia humana. En el Cuadro 8, se muestra el área en km² de cada clase de susceptibilidad para cada categoría de manejo. En total para la RBM 2040.56 km² caen dentro de la clase de susceptibilidad alta (13%), 3151.18 km² es de susceptibilidad media (19%) y 11027.26 de susceptibilidad baja (68%).

Cuadro 8. Area en km² de las clases de susceptibilidad a incendios según cada categoría de manejo de la RBM

Categoría de manejo	Area en Km ²			total
	susceptibilidad alta	susceptibilidad media	susceptibilidad baja	
Parque Nacional Laguna del Tigre/Biotopo	551.61	1019.68	1820.67	3391.96
Parque Nacional Sierra de Lacandón	619.17	694.12	708.86	2022.15
Zona de Usos Múltiples	820.65	1164.65	6427.66	8412.96
Parque Nacional Tikal	27.02	143.74	388.21	558.97
Biotopo Zotz	19.65	81.08	260.45	361.18
Parque Nacional Mirador	0	0	534.41	534.41
Biotopo Dos Laguna	0	0	313.28	313.28
Parque Nacional Río Azul	2.46	47.91	573.72	624.09
Total Reserva de la Biosfera Maya	2040.56	3151.18	11027.26	16219

A continuación describiremos las áreas susceptibles según las categorías de manejo de la Reserva:

Parque Nacional Sierra de Lacandón (PNLSL): Este es el parque con mayor susceptibilidad. El 31% del Parque está clasificado con susceptibilidad alta (619.17 km²) y está distribuido en una franja a lado de la zona de amortiguamiento. El 34% es de susceptibilidad media (694.12 km²) y 35% de susceptibilidad baja (708.86 km²) (Figura 14a). Esta última clase está ubicada en el área central y es de bosque alto. Otro dato importante es que el 9% del área está ocupado por áreas agrícolas. En cuanto al número de incendios, en el parque existieron 244 puntos de calor en 1998 y 135 en 1999. (Figura 14b).

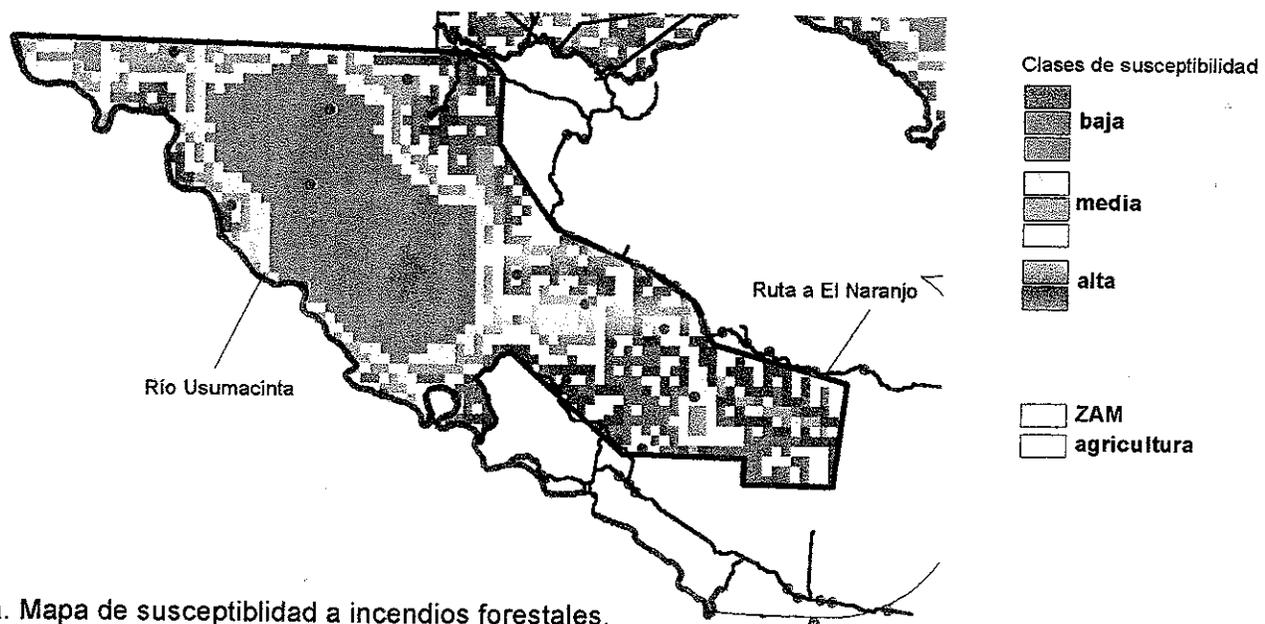
Parque Nacional Laguna del Tigre: Es el segundo parque con mayor susceptibilidad, posee un área agrícola más reducida (2%) que la del PNSL. El área con susceptibilidad alta ocupa el 16% del parque (551.61 km²), se localiza por todo el borde de la zona de amortiguamiento y el camino que lleva a los pozos Xan. El área de susceptibilidad media ocupa un 30% (1019.68 km²) y el área de susceptibilidad baja es de 56% (1820.67 km²) (Figura 15a) Sobre el número de puntos de calor, cabe destacar que este Parque fue altamente afectado por los incendios de 1998, donde se registraron 530 puntos de calor y 112 para 1999, los cuales además de distribuirse en la zonas mencionadas anteriormente, algunos ocurrieron dentro del Biotopo Laguna del Tigre (Figura 15b).

Zona de Usos Múltiples (ZUM): es la zona que ocupa la mayor área de la reserva (Figura 1). En términos generales es un área de baja susceptibilidad, ya que el 6% (820.65 km²) del área se clasificó dentro de la susceptibilidad alta, el 14% (1164.65 km²) fue clasificada como susceptibilidad media y 76% (6427.66 km²) del área se clasificó dentro de la categoría baja (Figura 16a). En el área ocurrieron 221 y 71 puntos de calor respectivamente para 1998 y 1999 (Figura 16b).

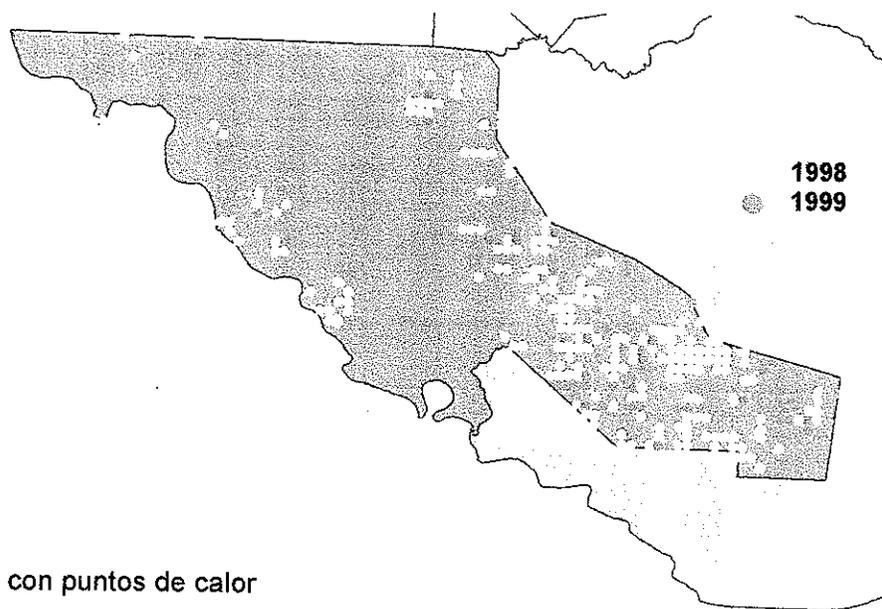
Parque Nacional Tikal: Este es uno de los parques nacionales más protegidos por su importancia turística y arqueológica. El 1% (27.02 km²) del parque se clasificó como de susceptibilidad alta y esta área se localiza solo en el borde sur, 25% de susceptibilidad media (143.74 km²) y 74 % del área es de susceptibilidad baja (388.21 km²) (Figura 17a). Este parque fue afectado por 11 puntos de calor en 1998 y en 1999 no hubo ninguno (Figura 17b.)

Biotopo Zotz: Es otra zona núcleo de la reserva, cuya amenaza mayor proviene del Suroeste, ya que muy cerca de sus límites se ubican tres comunidades. Este biotopo posee 2% (19.65 km²) del área con susceptibilidad alta, 21% (81 km²) de susceptibilidad media y el 76% (260.45 km²) de susceptibilidad baja, (Figura 17a). La susceptibilidad va disminuyendo del suroeste hacia el noreste. Por otro lado, este biotopo tuvo 6 puntos de calor en 1998 y 3 en 1999 (Figura 17b).

Parque Nacional Mirador, Parque Nacional Río Azul y Biotopo dos Lagunas: Se describen juntos, debido a que poseen características similares, tanto como de manejo como de susceptibilidad (Figura 18a) Estas zonas núcleo no tienen influencia fronteriza porque colindan al Norte con otra la Reserva de la Biosfera de Calakmul, en México. La única que presenta influencia es el PNRA. Para el PNM y BDL, la susceptibilidad es completamente baja (100%). El PNRA tiene un área de influencia por la frontera con México, por lo que tiene un 5% de susceptibilidad media y 95% alta. Además tiene menos del 1% de zona agrícola (1ha.) En cuanto a los puntos de calor solo el PNM tuvo uno en 1999.



a. Mapa de susceptibilidad a incendios forestales.



b. Mapa con puntos de calor

8 0 8 16 Kilometers

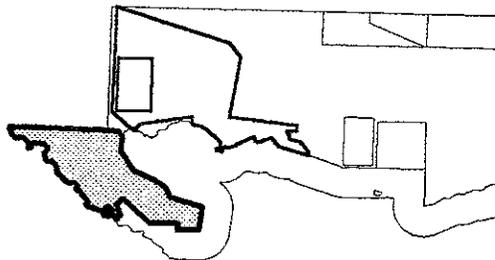
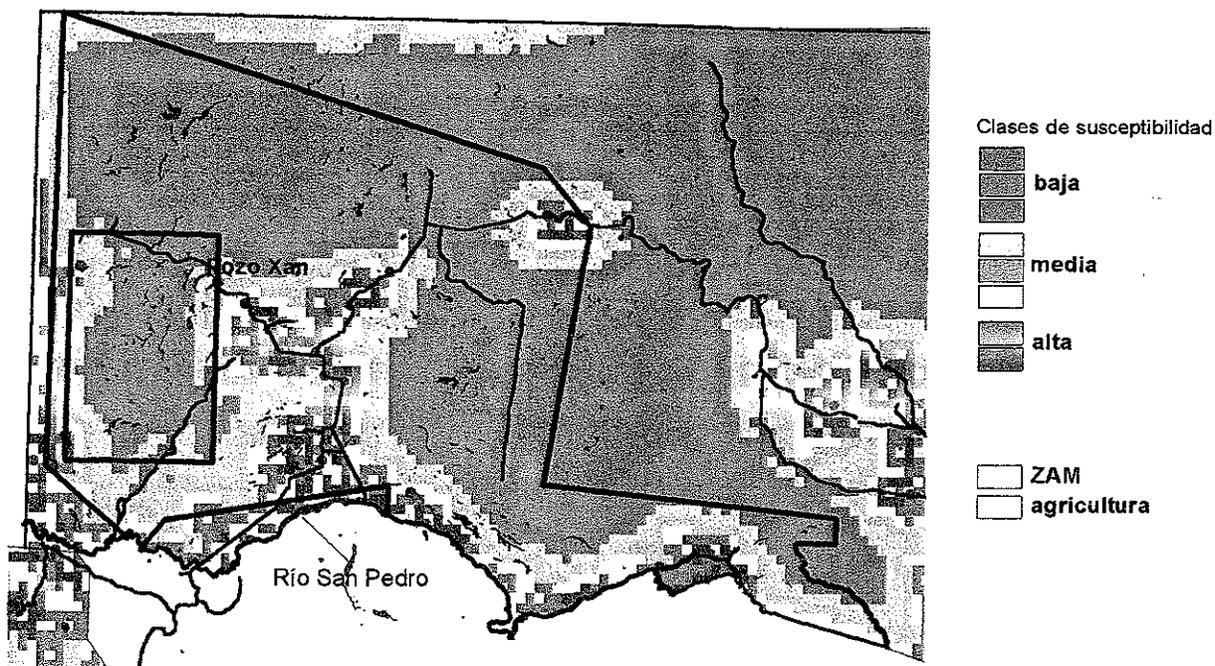
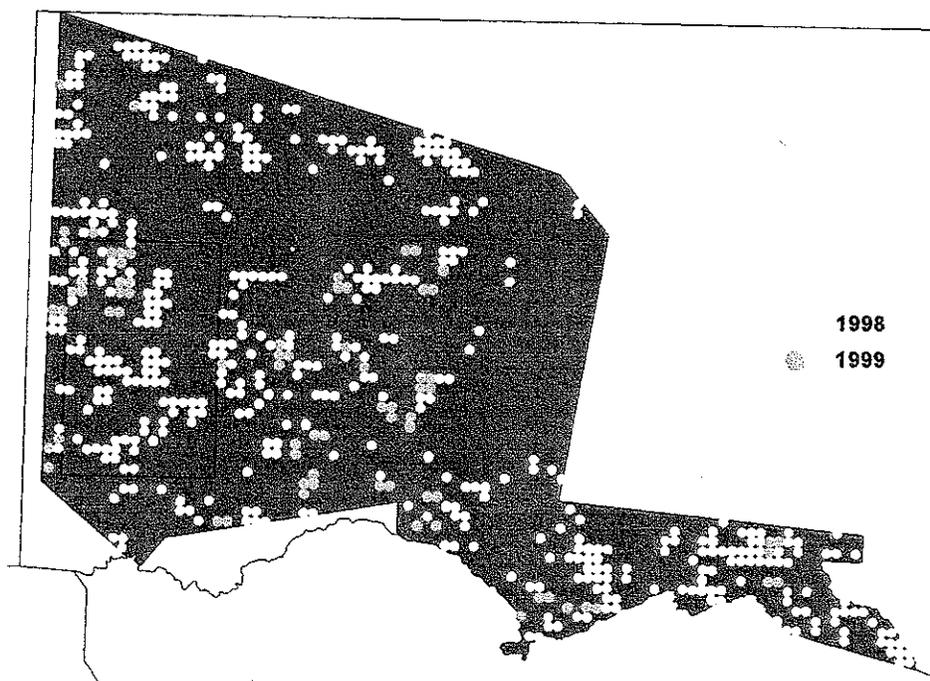


Figura 14. Análisis de Susceptibilidad del Parque Nacional Sierra de Lacandón (PNSL)



a. Mapa de susceptibilidad a incendios forestales.



b. Mapa con puntos de calor

8 0 8 Kilometers

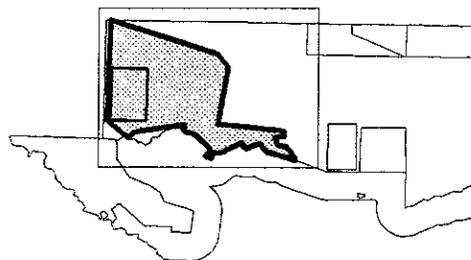
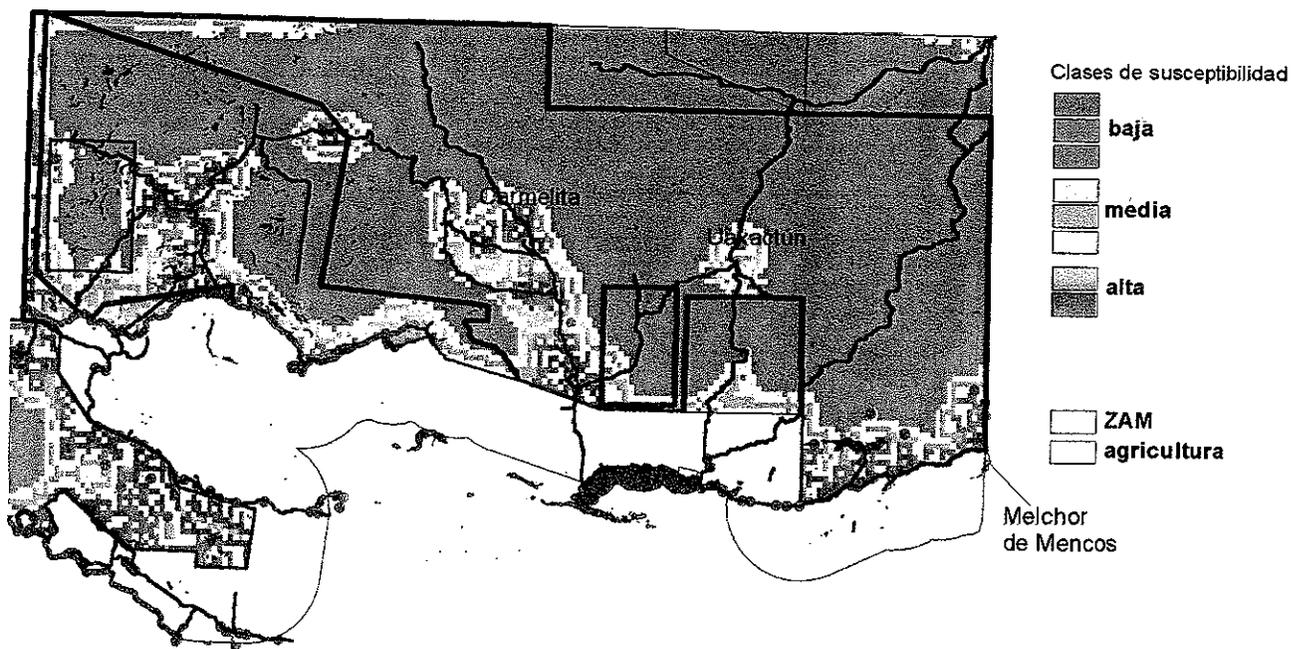
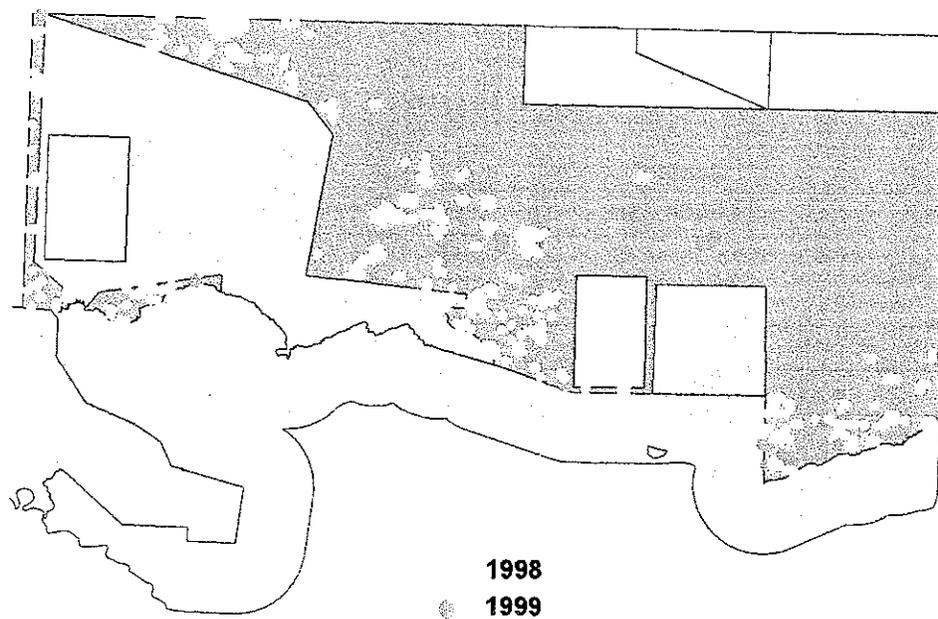


Figura 15. Análisis de Susceptibilidad del Parque Nacional Laguna del Tigre (PNLT)



a. Mapa de susceptibilidad a incendios forestales



b. Mapa con puntos de calor

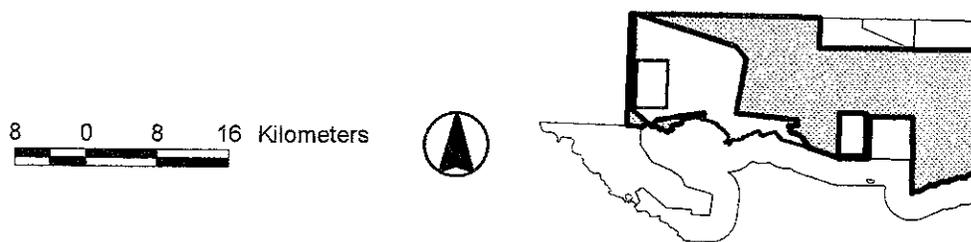
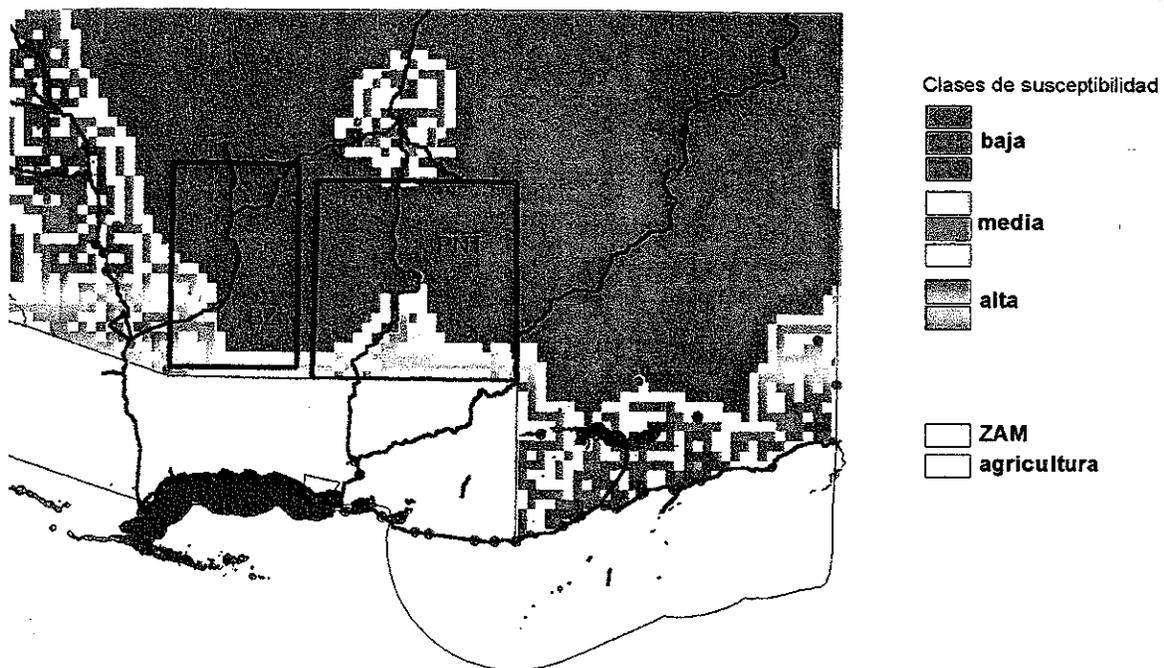
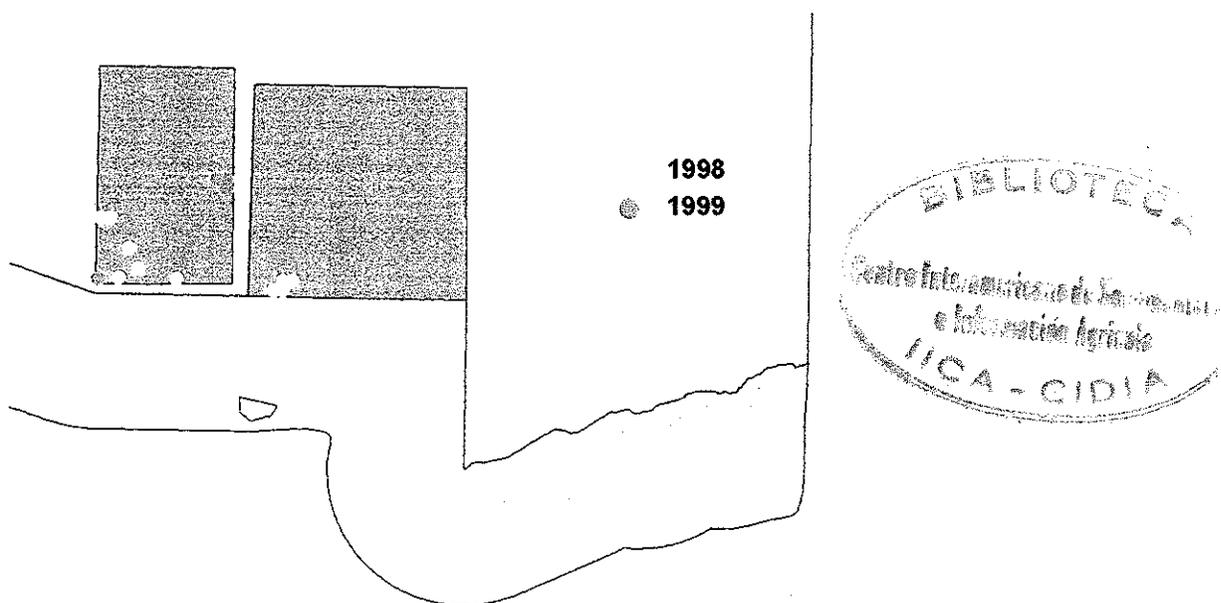


Figura 16. Análisis de Susceptibilidad de la Zona de Usos Múltiples



a. Mapa de susceptibilidad a incendios forestales



b. Mapa con puntos de calor

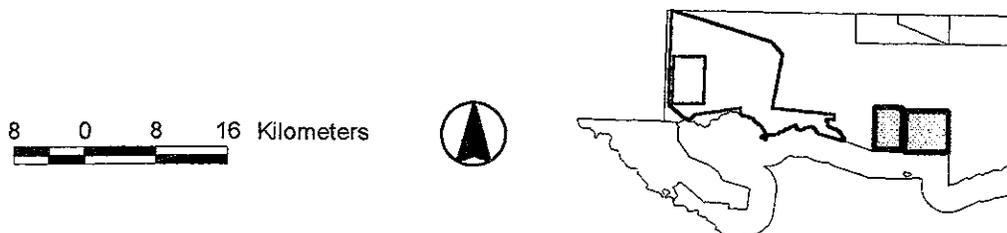
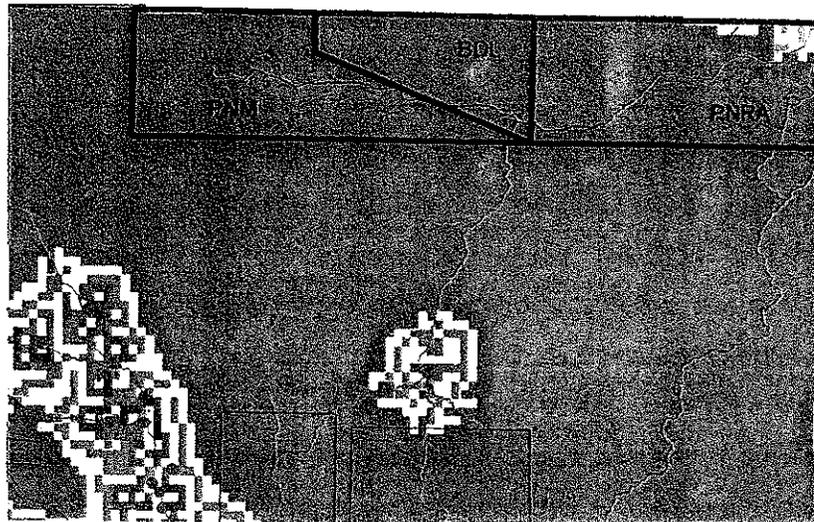


Figura 17. Análisis de Susceptibilidad del Parque Nacional Tikal (PNT) y Biotopo El Zotz (BZ)



Clases de susceptibilidad



8 0 8 16 Kilometers

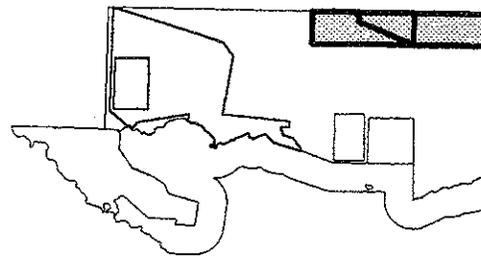


Figura 18. Mapa de susceptibilidad a incendios forestales y del Parque Nacional Mirador (PNM), Biotopo dos Laguna (BDL) y Parque Nacional Río Azul (PNRA)

5. DISCUSIÓN

5.1 Fase I. Clasificación de la vegetación según los patrones de cambio por los efectos de la época seca, utilizando imágenes de satélite AVHRR

Los valores de *NDVI* obtenidos en este estudio se encuentran dentro del rango de *NDVI* mundial para un bosque latifoliado según el estudio de De Fries y Townshend (1994). Sin embargo, son un poco mayores a los obtenidos por Grégorie en el Oeste de Africa (Guinea, Senegal y Malí), los cuales oscilaron entre -0.05 y 0.25 para la época seca. Esto puede ser por consecuencia de la diferencia de cobertura vegetal y a las condiciones climáticas por la situación geográfica de ambos países. Según el estudio de Goward *et al.* (1994) estos valores resultan un poco menores a los promedios anuales de la cuenca del Río Amazonas (entre 0.6 y 0.7), además según este estudio los valores obtenidos son menores a los promedios de *NDVI* del verano de las zonas agrícolas y pastos en Mongolia. Existen muchas razones que causan este tipo de diferencias, la primera se puede deber al tipo de sensor utilizado, ya que el mismo estudio de Goward *et al.* (1994) demuestra las diferencias según la plataforma NOAA utilizada, por ejemplo para la misma cobertura los valores promedio de *NDVI* variaron 0.6 a 0.8, utilizando el sensor NOAA-7 y NOAA-11 respectivamente. Además, los datos proporcionados en el trabajo mencionado son el resultado del promedio de 8 años (1983 a 1991) y en el presente caso es el dato de un año particular. Por otro lado, hay que tomar en cuenta que los datos obtenidos son respuesta de muchas correcciones y transformaciones particulares, tal y como se mencionó en la metodología, por lo tanto, esta puede ser otra razón de las variaciones con los datos citados en la literatura.

El comportamiento de precipitación y humedad relativa mensual de 1999 (Figura 3) no coincide con los cambios de *NDVI*, ya que el mes de abril aparentemente es un mes donde aumenta la precipitación y los valores de *NDVI* disminuyen en forma general. Sin embargo esto obedece a los días en que ocurrió la lluvia, ya que el análisis quincenal presenta datos mejor relacionados. En la Figura 4, podemos observar que la lluvia ocurre en la segunda quincena de abril (18, 19 y 28 de abril), por lo que es posterior a la fecha de los datos de *NDVI*, que son de la primera quincena. Esto también explica que marzo tenga valores mayores de *NDVI* que abril, ya que la precipitación que ocurrió en la primera quincena de marzo fue mayor que la de la primera quincena de abril. Además, se puede observar que en

el mes de abril la temperatura va en ascenso, por lo que la vegetación puede tender a una mayor respuesta de secamiento. Las respuestas de *NDVI* y precipitación en el mes de mayo son similares. A pesar de las tendencias que se observan en el análisis anterior, hay que tomar en cuenta que son generalizados, ya que únicamente son tendencias provenientes de una sola estación meteorológica.

Ahora se discutirá cada una de las clases de vegetación obtenidas con respecto a los patrones encontrados y los tipos de vegetación que es posible encontrar de acuerdo a varios estudios anteriores realizados en el área.

Clase Oeste: Esta clase es la que posee un cambio intenso de *NDVI*, pero analizaremos el comportamiento de cada subclase ya que estas determinan una clasificación de la vegetación más fina. La subclase O-1 en general posee los valores más bajos de *NDVI* y es la que sufre cambios más drásticos. Es decir que tiende a secarse más pero también es más sensible a los efectos de la precipitación, lo cual puede observarse en la Figura 6 donde el cambio positivo entre abril y mayo es muy notorio. Esta subclase es particular de una de las áreas más degradadas de la RBM. Se localiza a ambos lados de la carretera a El Naranjo, frontera con México (Figura 5), siendo esta zona una de las más pobladas del área. El mapa de vegetación de Centroamérica realizado por la Universidad de Boston para la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD, sf) muestra esta clase de cobertura, pero más angosta (Figura 19). Esto se debe a que los datos para la realización de este mapa son de 1992 y 1993, donde la frontera agrícola era lógicamente menor. Como podemos ver en la misma Figura 5, esta subclase se localiza dentro del Parque Nacional Sierra de Lacandón (PNSL). El plan maestro de este parque describe esta área como de recuperación o de uso especial (CONAP 1997). Esto es evidencia que la subclase corresponde a áreas degradadas. La subclase O-2 corresponde a una zona de varios tipos de vegetación en el Parque Nacional Laguna del Tigre (PNLT). Esto puede observarse en el mapa de vegetación de este parque (Figura 20) presentado por Méndez *et al.* (1998). Con base en esta información puede determinarse que esta subclase pertenece a vegetación de pantano bajo, área de impacto humano, bosque de transición y sabana inundable (los cuales se describen en el Anexo 6). Cabe mencionar que la clasificación de Méndez *et al.* (1998) fue realizada de forma gruesa, a través de un análisis visual de la imagen TM (1995 y 1997), consultas a conocedores del área y visitas a algunos lugares. Aún así, estos tipos de

CENTRAL AMERICA Vegetation/Land Cover

Original source:
AVHRR imagery
Project: CCAD/USAID/PROARCA/CAPAS
The Nature Conservancy/
International Resource Group/
Boston University

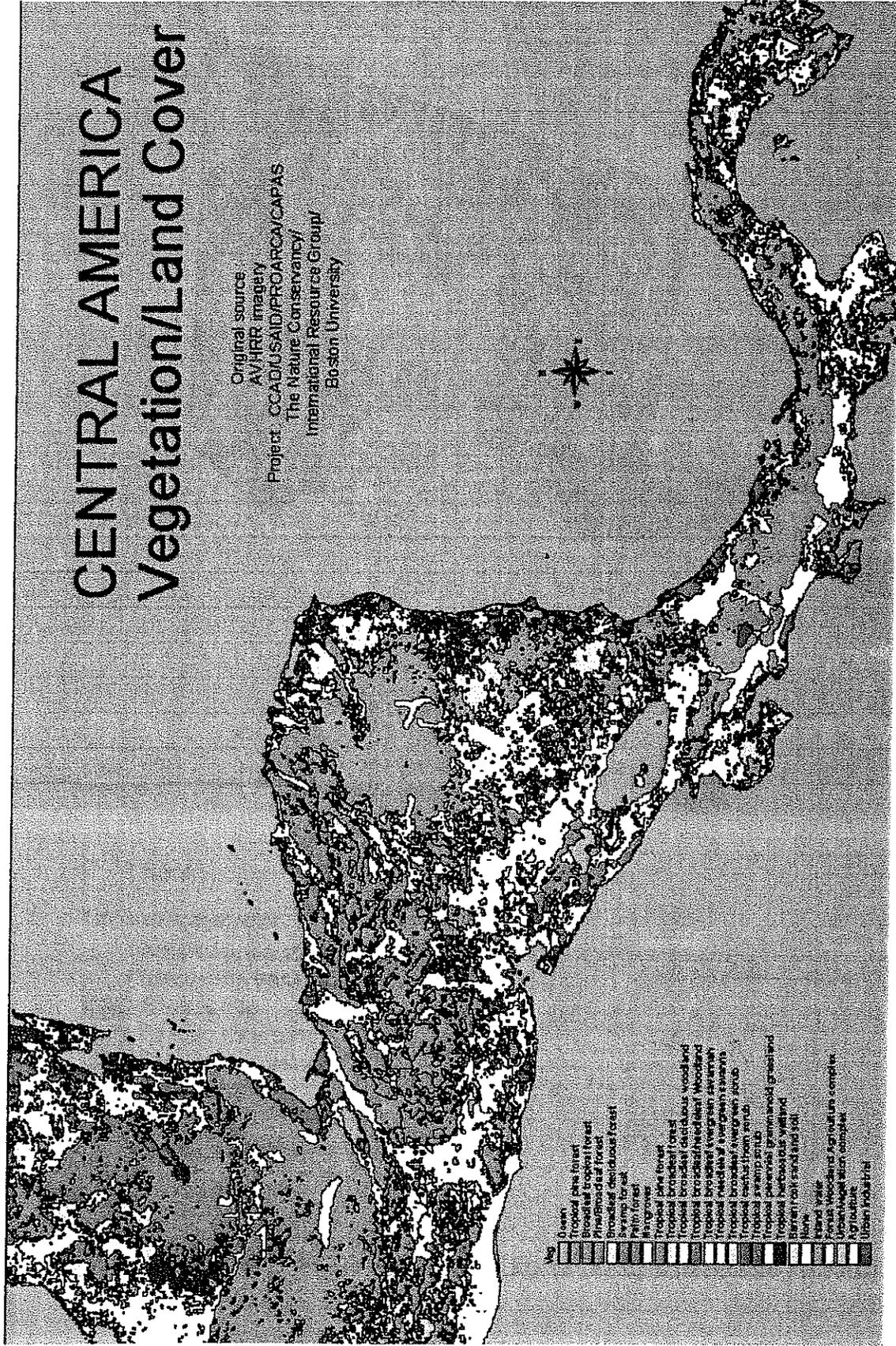


Figura 19. Mapa de Vegetación de Centromérica (CCAD.s) basado en datos AVHRR de 1992 y 1993

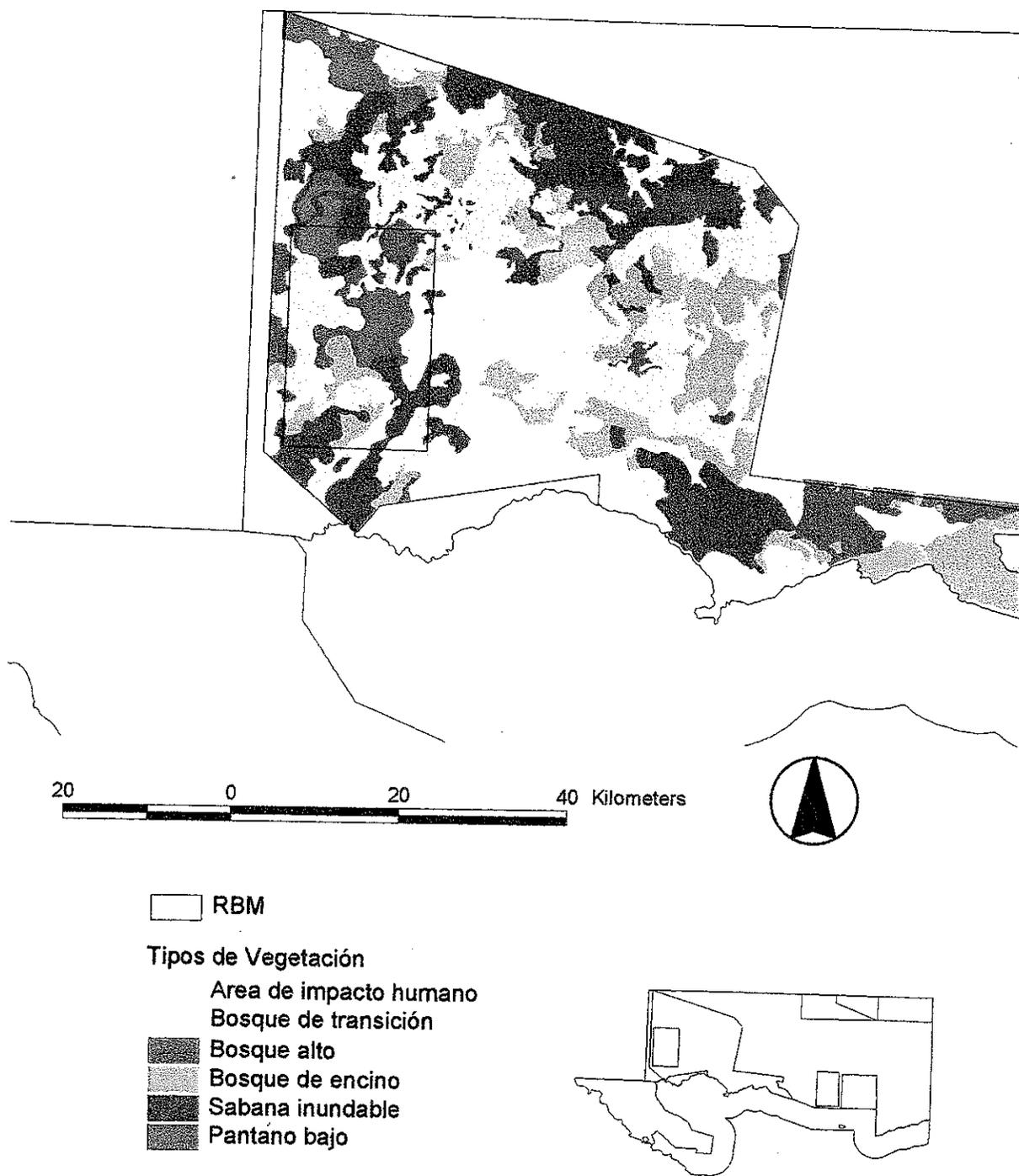


Figura 20. Tipos de vegetación del Parque Nacional Laguna del Tigre (Méndez et al. 1998)

vegetación pueden responder al comportamiento de *NDVI* de esta subclase, ya que son zonas abiertas o semiabiertas, que al igual que la subclase O-1 tienden a secarse mucho, pero responder rápidamente a las primeras lluvias. Sobre estas dos subclases (O-1 y O-2) también cabe mencionar que su comportamiento de cambio hacia valores más altos de *NDVI* entre abril y mayo, puede deberse a un comportamiento de mucho rebrote como respuesta de las quemadas de abril.

La última subclase, es difícil de interpretar, pero también puede tratarse de áreas con bosque inundable². El mapa de la CCAD (Figura 19) muestra para esta área, humedales con pastizales y pantanos.

Clase SLT: Esta clase presenta cambios moderados respecto a la clase Oeste. La subclase SLT-1 es propia de la zona de amortiguamiento y de algunas zonas al sur del PNLT. Según la clasificación de vegetación de Méndez *et al.* (1998), puede coincidir con zonas de impacto humano o pantano bajo (Figura 20). Por esta razón y por sus valores bajos de *NDVI* puede considerarse como la subclase más degradada de esta clase. La subclase SLT-2 tiene su mayor distribución en la zona de amortiguamiento y algunas áreas en el PNLT (Figura 20) que pueden coincidir con áreas de sabana inundable (Méndez *et al.* 1998). Esta subclase también se observa ligeramente al borde interior de las áreas más degradadas del PNSL, por lo que podría tratarse de una zona de transición entre áreas agrícolas y bosque. Es curioso observar que en el Biotopo Zotz, existe un pixel con esta subclase, el cual puede tratarse de un pastizal que se quemó este año (obs.pers.) Por último la subclase SLT-3 se localiza en los bosques de la Sierra de Lacandón y en áreas de bosque de transición del PNLT, por lo que pueden considerarse áreas con poca intervención humana.

Clase Este: Esta clase es de cambio moderado con valores de *NDVI* altos. Es la clase que ocupa mayor área en la reserva (Figura 5). La subclase E-1 también representa las zonas más degradadas dentro de la reserva, ya que se localizan en áreas que indican intervención humana, como la zona de amortiguamiento o fuera de la RBM. Los pixeles que se encuentran dentro de la reserva, son zonas cercanas a carreteras y poblados o en caso del esquinero noreste de Parque Nacional Tikal (PNT), puede tratarse de vegetación baja inundable². La subclase E-2, también se localiza en zonas de bajos como los que se observan en PNT y en el Biotopo el Zotz. En el caso del camino que dirige hacia Carmelita, al centro de la RBM, se debe a que es área de impacto humano². La subclase E-3, es la

que más área ocupa dentro de la RBM, afortunadamente. Esta área corresponde en su mayoría a la Zona de Usos Múltiples (ZUM) y es la menos intervenida por el humano y en general posee los valores más altos de *NDVI*, lo que muestra claramente que se trata de bosque alto con poca tendencia a sufrir cambios drásticos de *NDVI*.

A continuación se analizarán los patrones generales de comportamiento de vegetación observado para toda la RBM. Se puede observar, un comportamiento de *NDVI* similar del Noroeste hacia el Sureste (clases Oeste y SLT) y otro comportamiento de la zona centro-norte hacia el Este (Figura 5). Esta tendencia puede demostrarse de alguna forma con las áreas boscosas del PNSL y de PNLT, subclase SLT-3, las cuales son bosques altos comparativamente similares a los de la subclase E-3 (ZUM), sin embargo, a pesar de ser bosques altos, el comportamiento de cambio de *NDVI* resulta distinto. Otra forma de demostrar esta tendencia es a través de las zonas agrícolas de cada clase (O-1, SLT-1 E-1 y E-2), las cuales a pesar de representar el mismo tipo de cobertura, pertenecen a clases de vegetación distintas según los cambios de *NDVI*. Los comentarios anteriores se pueden apoyar a través de trabajos de vegetación que indican en forma aproximada la diferencia de dos tipos de bosque a lo largo del cinturón hipotético que se muestra en la Figura 5, donde encontramos a la derecha la clase Este y a la izquierda las clases Oeste y SLT. Estos trabajos están basados en realaciones geomorfológicas, climáticas y fisiográficas del área y divide la RBM aproximadamente como se indicó anteriormente. La clase Este está ubicada dentro de la región fisiográfica Plataforma de Yucatán, y posee deposiciones del terciario (Lundell 1937). Por otro lado las clases Oeste y SLT se encuentran ubicadas en la región fisiográfica Tierras bajas del Sur de Petén, y se ha determinado que algunas partes al sur del lago Petén-Itzá tienen formaciones del Cretácico (Lundell 1937). El mapa presentado por Gómez (1992) también muestra una distribución diferencial (Figura 21) donde las clases Oeste y SLT entran dentro del corredor de elementos de las tierras altas de México. La clase Este está clasificada dentro de la vegetación de Yucatán y Petén. Por otro lado Miranda (1978), describe la clase Este como una selva alta subperennifolia, y las clases Oeste y SLT, están clasificadas como selva alta siempre verde y un bosque transicional entre este y la selva alta subperennifolia.

Ahora se discutirá a cerca del análisis de incendios por clase de vegetación, deonde se obtuvo una tendencia en todas las clases (Figura 9), donde las más afectadas fueron las subclases 1, seguidas de las subclases 2 y por último las menos afectadas fueron las

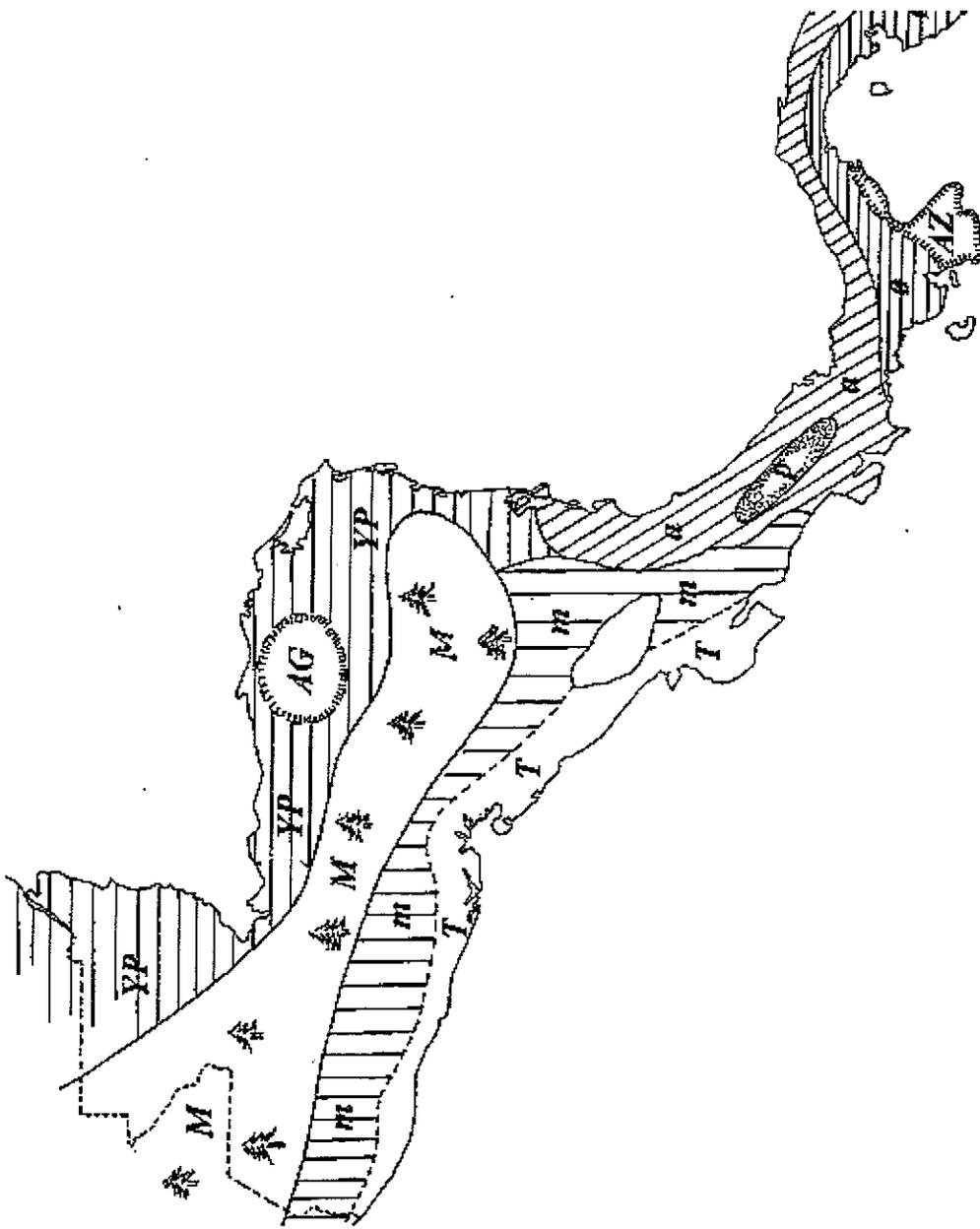


Figura 21. Vegetación centroamericana, esquemática, según Gómez (1992) T = Vegetación xérica y subárida de Tehuantepec M = elementos de México Central m = elementos mexicanos de elevaciones medias YP = vegetación yUcatepetenence φ = vegetación mixta del Pacífico Sudamericano y Amazonas, ρ = páramos con afinidad Sudamericana, AG = valle de Aguan (Honduras) con afinidades al subárido del Pacífico, AZ = Azuero de afinidad con llanos venezolanos y sabanas colombianas.

subclases 3. Este comportamiento es directamente proporcional al gradiente que se obtuvo en los comportamientos de *NDVI*.

Por otro lado las subclases con mayor porcentaje de incendios dentro de la RBM se localizan en el PNSL y el PNLT, por lo que merecen especial atención. Sobre todo para la subclase O-1 del PNSL que constituye toda la Zona de Recuperación (Figura 22), donde debido a su alta degradación tiende a tener más susceptibilidad a cambios climáticos, además que es un área con alta incidencia de puntos de calor por ser área de frontera agrícola. Para el PNLT, hay que tomar en especial atención las subclases O-2, ya que ha sido un área con ocurrencia alta de incendios en 1998, y se ubican en la Zona Intangible. En la clase Este, en general la susceptibilidad es menor, pero la subclase E-2 merece atención ya que ha tenido una mayor ocurrencia de puntos de calor. Para esta clase también se debe tomar en cuenta que para los dos años analizados, presentó una mayor incidencia de incendios en mayo que en abril.

5.2 Fase II. Modelo de las áreas susceptibles a incendios forestales

5.2.1 Consideraciones metodológicas:

Es importante tener presente algunas consideraciones en la metodología empleada para poder dar una mejor explicación al modelo obtenido.

Sobre las variables antropogénicas utilizadas (frontera agrícola, caminos y poblados), debe tenerse presente que existe determinada correlación entre las mismas, debido a la propia dinámica de las actividades humanas dentro de la RBM. Por ejemplo, es evidente que la existencia de caminos ha contribuido al establecimiento de asentamientos humanos, y la existencia de éstos son causa directa de la apertura del bosque por las siembras agrícolas. Esto puede llegar a interpretarse como una redundancia en el modelo, sin embargo a pesar que si existe esta determinada correlación, no es posible descartar vías de acceso ni poblados porque la existencia de estas variables también permiten que existan otros factores que pueden provocar incendios en el área. Además estas variables no coexisten completamente en toda el área por lo que también, se podría estar dejando áreas sin evaluar. Ahora bien, para minimizar una probable sobreestimación, la aplicación de la evaluación multicriterio fue desarrollada de tal forma que las variables se interpretaran

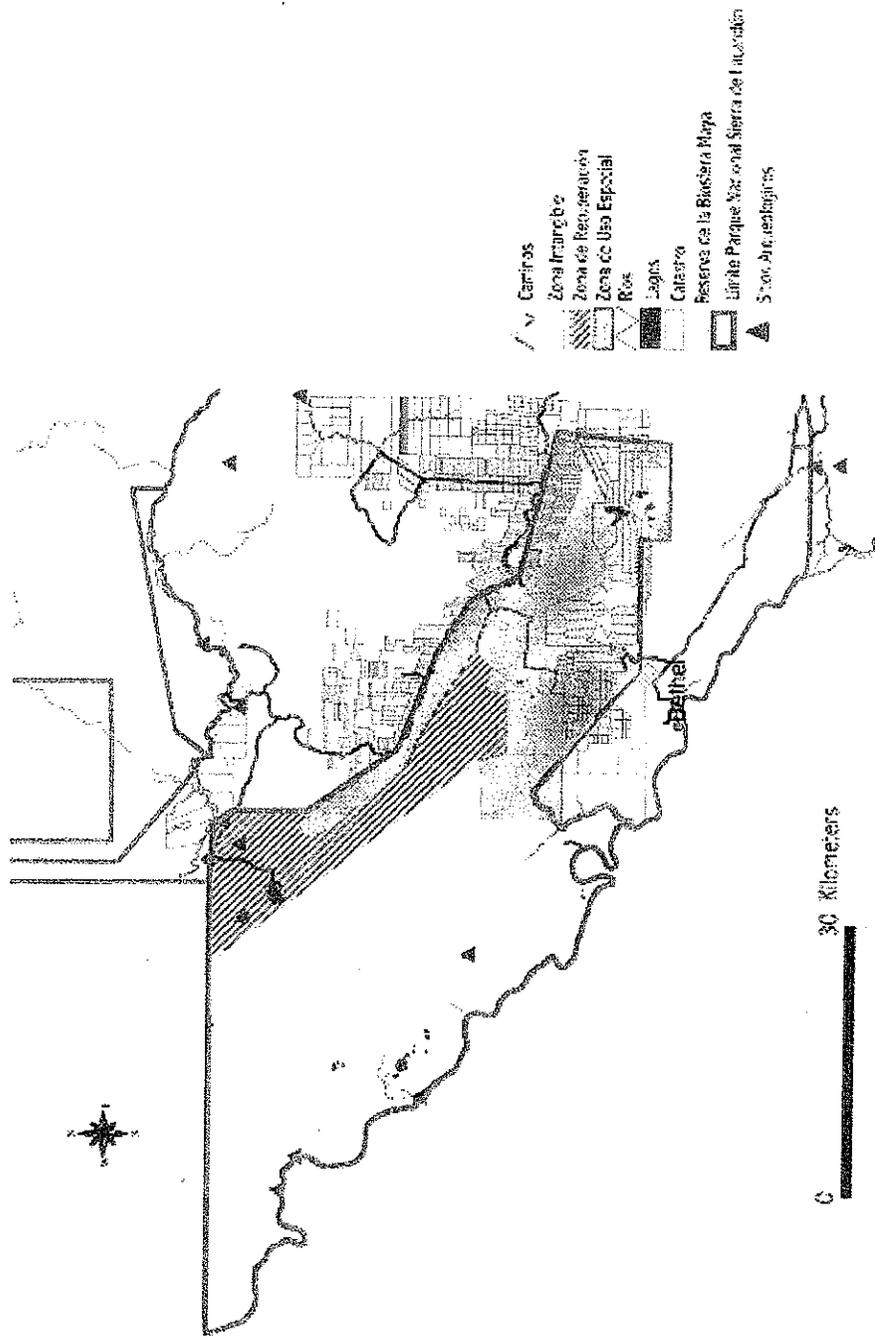


Figura 22. Mapa de la zonificación del Parque Nacional Sierra de Lacandón, según el plan de manejo de 1997. CONAP

independientemente (Anexo 1). De tal forma que la variable frontera agrícola fue la única interpretada como causante de incendios forestales a partir de quemas agrícolas. Vías de acceso y poblados fueron analizadas como variables que pueden ser foco de incendios por otras causas, tales como accidentes, cazadores, xateros, colmeneros, venganzas, etc.

Otro aspecto importante a discutir es el efecto sobre la frecuencia de puntos de calor por la densidad de píxeles que involucra cada variable en el área de estudio. Por ejemplo, los caminos pueden tener mayor número de píxeles en el área de estudio que frontera agrícola, por lo tanto puede ser posible que el modelo de distancia de puntos de calor a vías de acceso se esté sobreestimando respecto al de frontera agrícola. Sin embargo, debido a que cada uno de los modelos posee un peso, de acuerdo a su importancia este efecto puede reducirse.

A respecto de la MCE es interesante observar que esta metodología generalmente se utiliza para localizar zonas aptas para alguna situación en particular, por ejemplo, las mejores áreas para uso residencial o para la construcción de una fábrica (Barredo 1996), sin embargo en este caso hemos utilizado la metodología para obtener las mejores áreas para que ocurran incendios forestales. Por otro lado es una metodología que combina la experiencia de expertos en el análisis de las variables con información cuantificable, esto resultó sumamente beneficioso, sobre todo por las limitantes de información para el área de estudio. Otras metodologías, utilizan únicamente información de medición cuantitativa de las variables (Chuvieco y Salas 1996, Burgan *et al.* 1999). En el caso de Chuvieco y Salas (1996), se calcularon pesos de las variables antropogénicas únicamente a través de datos de incendios forestales, pero en nuestro caso, esta información tenía las limitaciones antes mencionadas y la MCE resultó muy beneficiosa, y además en términos prácticos económica y rápida. En este estudio también se analizaron variables topográficas y climáticas para obtener las zonas de riesgo, lo cual es recomendable para poder afinar los resultados presentados, ya que en esta ocasión estas variables fueron excluidas por falta de información. En el estudio de Burgan *et al.* (1999), no se tomaron en cuenta variables antropogénicas, ya que está dirigido a climas mediterráneos donde la ocurrencia de incendios naturales es mucho mayor. Sin embargo, es interesante observar que ellos utilizan un índice de verdor (*Greenness index*) basado en *NDVI*, este lo relacionan con datos de campo sobre 10 días de secamiento de la materia muerta disponible e información de materia viva disponible, para poder determinar un índice potencial de incendios (*Fire*

Potencial Index, FPI). Esta combinación de datos auxiliares de campo y el índice de vegetación es muy importante y debería tratar de realizarse para la RBM, ya que el mapa de vegetación aquí presentado solo se basa en información remota.

5.2.2 Areas susceptibles a incendios y manejo de la RBM:

El mapa obtenido no solamente refleja susceptibilidad a incendios forestales, sino que también refleja que son las áreas más afectadas por la influencia de la actividad humana.

Este mapa tiene mucha congruencia con la actual zonificación del Parque Nacional Sierra de Lacandón (PNSL) y el Parque Nacional Laguna del Tigre (PNLT) que son los dos más susceptibles. Como se observa en la Figura 22 la zona de recuperación del PNSL y de uso especial, concuerdan con las áreas más susceptibles de este parque. Además, a pesar que esta zonificación entró en vigor en 1998 (CONAP 1997), los puntos de calor de los años estudiados ocurrieron específicamente en estas dos zonas (Figura 14b).

El PNLT que también incluye el Biotopo Laguna del Tigre, es otra zona muy susceptible a los incendios forestales, como se mencionó anteriormente. El mapa presentado, también concuerda con la zonificación del Plan Maestro del área (CONAP 1999). En la Figura 23, podemos observar la zonificación de este parque, donde es interesante ver que las áreas de susceptibilidad a incendios forestales alta o media, están justamente ubicadas en las zonas de manejo que involucran la presencia humana. Tal es el caso de la zona de uso especial y la zona de transición. Por otro lado las áreas de susceptibilidad baja están ubicadas en las zonas intangibles y de recuperación. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que en caso de años extremos como 1998, puede convertirse en áreas más susceptibles, ya que fueron áreas de alta incidencia de puntos calientes (Figura 15b). Un área de especial interés para el parque, debe ser el borde del río San Pedro que se ubica en la zona intangible, ya que según el modelo obtenido todo el borde es de susceptibilidad alta.

Por último un punto importante a discutir que el área del Biotopo Laguna del Tigre, por su ubicación resulta ser muy susceptible, ya que por un lado puede verse afectado por las zonas de alta susceptibilidad del borde fronterizo con México (Oeste) y por la zona susceptible de la carretera que lleva al pozo Xan.

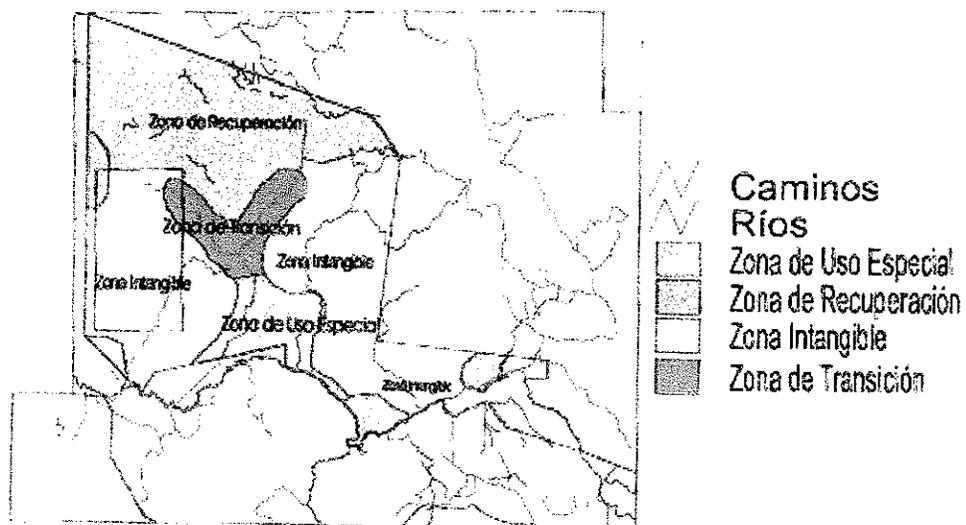


Figura 23. Mapa de la zonificación del Parque Nacional Laguna del Tigre

La zona de Usos Múltiples es en general poco susceptible a incendios a excepción de las áreas que bordean la ZAM, el camino a Carmelita y el área de influencia de Uaxactún (Figura 16a.) El área que bordea el camino que va hacia Carmelita es la más susceptible de esta zona, ya que la frontera agrícola continúa por toda la carretera y ahí están concentrados la mayoría de poblados (Figura 1). Otra área de susceptibilidad alta es la carretera a Melchor de Mencos (frontera con Belice) que bordea esta zona al Este. En ella existen muchas comunidades por lo que la frontera agrícola sobrepasa los límites de la zona de amortiguamiento.

La comunidad de Uaxactún, es un área muy especial por su ubicación, ya que se encuentra bastante aislada, sin embargo posee algunas áreas agrícolas y una carretera de segundo orden, con estas condiciones y con el modelo establecido, se calculó que el área de susceptibilidad alta y media alrededor de un poblado como Uaxactún, puede tener un radio de aproximadamente 12 km. Otro punto a destacar de la zona de usos múltiples, son los caminos que no se encuentran poblados y que no poseen frontera agrícola. El área alrededor de estos caminos fueron clasificados dentro de la clase baja (Figura 16a) pero de alguna forma representan susceptibilidad por el tránsito que poseen.

5.3 Mapa de clases de vegetación y mapa de susceptibilidad a incendios forestales:

Según los resultados de las valoraciones por pares de variables presentadas por los expertos en incendios forestales del área de estudio, la vegetación tiene el menor peso en la probabilidad de que ocurran incendios forestales en el área. Esta valoración se confirma con los datos de causas de incendios presentados en 1998 y 1999. Sin embargo, no se debe dejar a un lado la hipótesis de que la disponibilidad de la vegetación aumenta la susceptibilidad no solo para iniciar un incendio, si no para que se facilite su extensión. Es por esta razón que se analizará los dos mapas obtenidos. En la Figura 24 se puede observar la sobreposición de los puntos de calor de 1998 y 1999 sobre el mapa de la clase de vegetación Oeste (O) y el mapa de susceptibilidad a incendios forestales. Es evidente que existe una relación entre la influencia humana y las clases de vegetación susceptible, ya que la susceptibilidad de la vegetación a cambios por la época seca está influenciada por el tipo de cobertura vegetal que se analiza. Por ejemplo, la franja al norte del PNSL, es de las áreas más influenciadas por la actividad humana en la zona de amortiguamiento, y a la vez posee el tipo de vegetación que presenta valores bajos de NDVI y cambios más drásticos

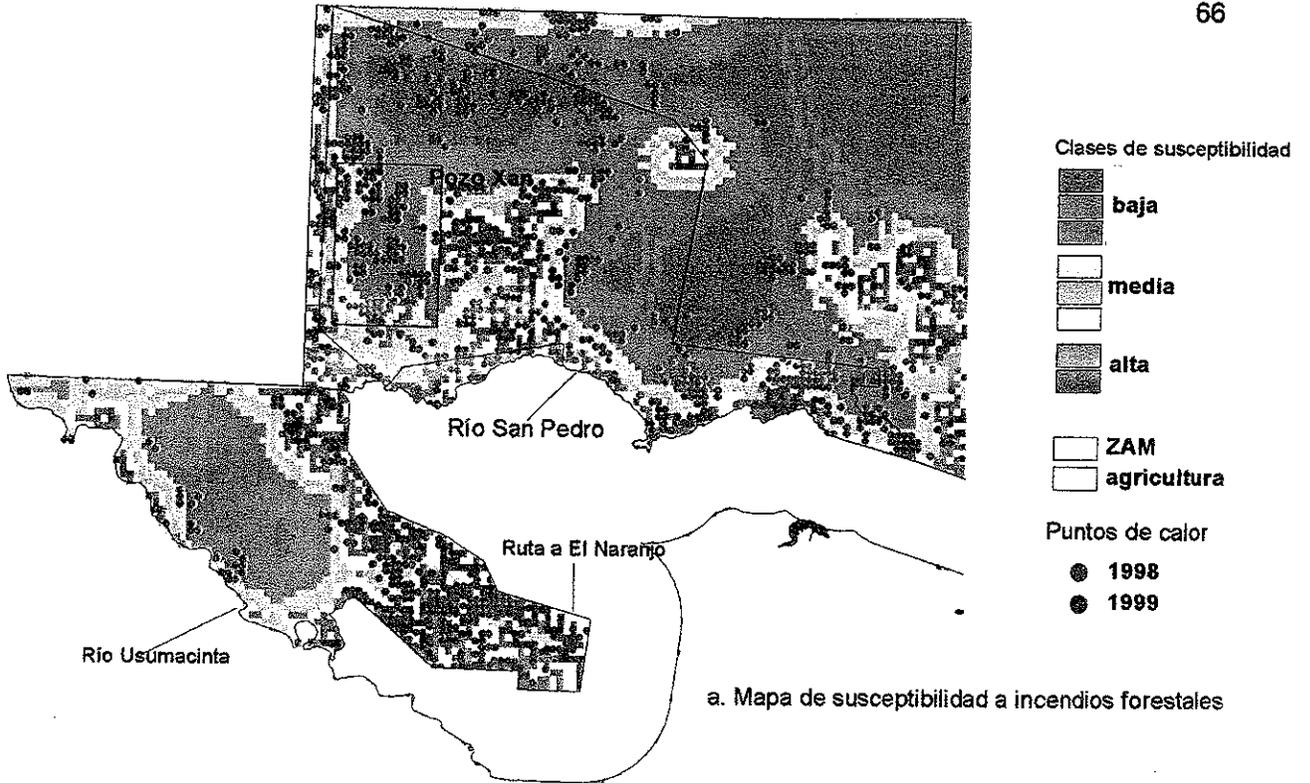


Figura 24. Análisis del mapa de susceptibilidad a incendios forestales y clase Oeste de vegetación, de la Reserva de la Biosfera Maya

por la época seca (subclase O-1). Además en ambos mapas es el área que más incendios forestales presenta.

La siguiente subclase de vegetación, O-2, está presente en zonas de menor actividad humana que el anterior, como se ocurre en la parte central del Biotopo Laguna del Tigre y en la zona norte del PNLT, estas zonas poseen valores medios de NDVI, pero continúan los cambios drásticos. Como se mencionó anteriormente en estas áreas predominan los humedales, por lo tanto son zonas que en épocas muy secas pueden estar susceptibles a una fácil propagación de incendios. Esta puede ser la razón por la cual en 1998, un año de mucha sequía, esta área fue seriamente afectada por los incendios forestales. Un comportamiento similar se observa al Norte del parque y en la Zona de Usos Múltiples que colinda con México. Según informaciones orales los incendios de 1998 que aparecen en esta área se iniciaron del otro lado de la frontera.

La subclase O-3 es la que menor área cubre, está ubicada en zonas de susceptibilidad media o baja y además en algunos casos no posee puntos de calor, como se observa al Sur del PNSL y en algunas áreas dentro del Biotopo Laguna del Tigre.

Siguiendo con la clase Sierra de Lacandón y Laguna del Tigre (SLT) encontramos las siguientes asociaciones entre los mapas (Figura 25). Al igual que la clase anterior las primeras dos subclases de vegetación se ubican en clases de susceptibilidad a incendio similares. SLT-1 en la clase alta y la SLT-2 combina zonas medias y altas. En cambio, la zona SLT-3 se ubica principalmente en áreas con la menor susceptibilidad a incendios. Sin embargo estas áreas no dejan de ser susceptibles ya que se encuentran rodeadas completamente de clases de mayor susceptibilidad, como especialmente sucede en el PNSL.

Por último la clase Este (E), las asociaciones se pueden observar en la Figura 26, vemos claramente que las diferencias en los valores de NDVI de esta clase se debe principalmente a tipos de uso de la tierra. La clase E-1 y E-2 está presente precisamente en el área de influencia del camino a Carmelita, el cual está rodeado de poblados y zonas agrícolas. Es interesante observar que el área con vegetación de clase E-2 que se ubica al Este de Carmelita, está clasificado como área de susceptibilidad baja de incendios, sin embargo en 1998, esta área si fue afectada, esto lo explica la clase de vegetación a la cual

pertenece. Es decir, que es notorio que la clase E-2 de vegetación es susceptible a incendios en años con sequía severa, como la de 1998.

Pero por otro lado, estas dos clases también están presentes en dos áreas más al Este, donde la susceptibilidad de incendios es menor, esto puede deberse a que poseen muy poca influencia humana en el área.

La clase E-3, es la menos susceptible desde cualquier punto de vista, ya que pertenece a la clase baja susceptible a incendios, y por otro lado posee los valores mas bajos de NDVI y cambios menos drásticos a la sequía.

No obstante a que existe una alta correlación a los valores y cambios de NDVI y la influencia de las actividades agrícolas, hay que tomar en cuenta que la vegetación de la RBM posee un gradiente de susceptibilidad a cambios por la época seca que va aumentando de Noreste a Suroeste.

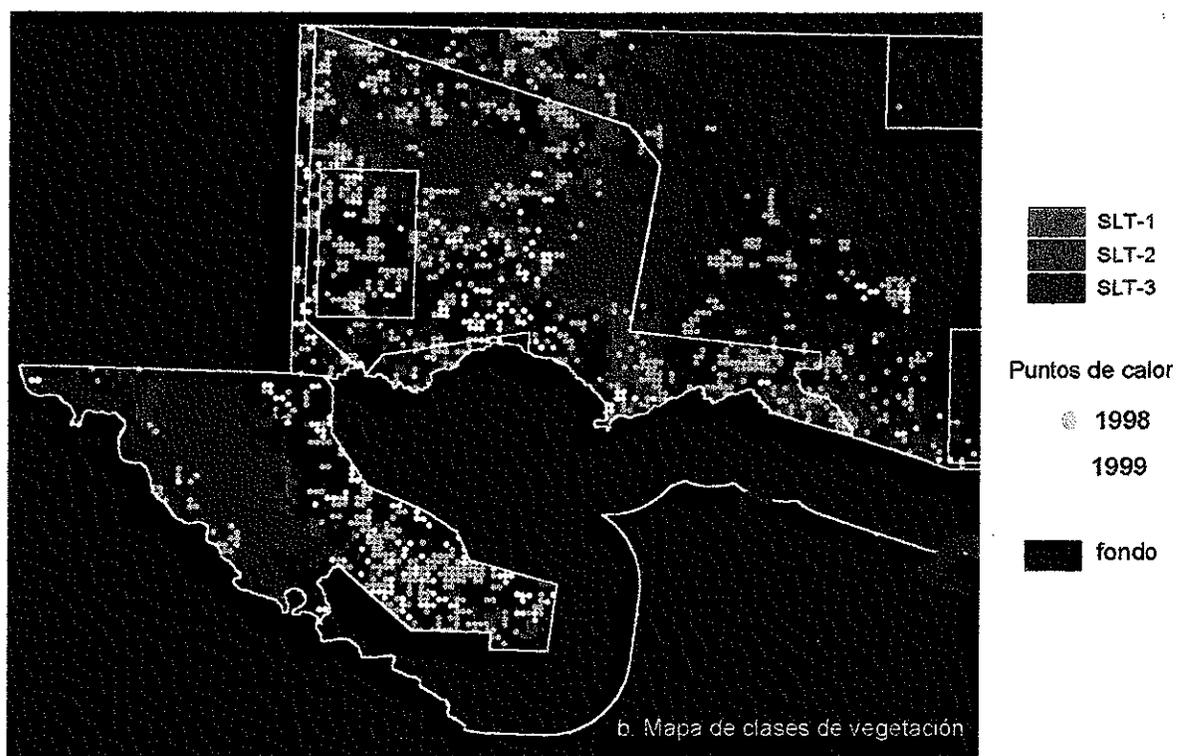
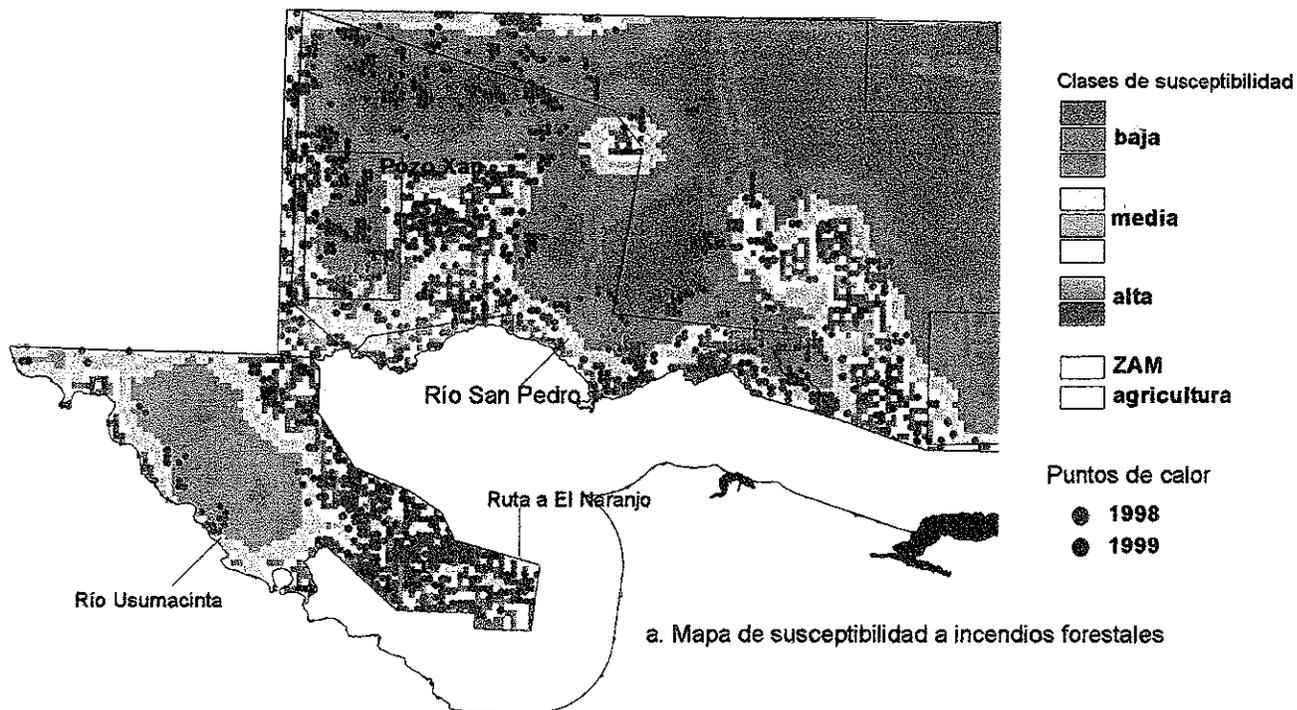
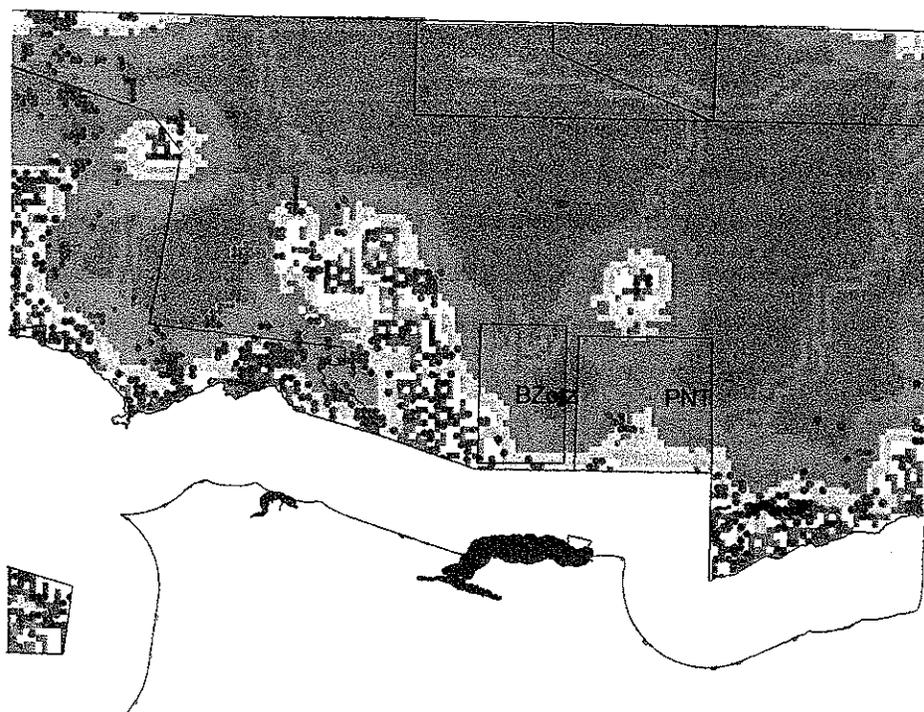


Figura 25. Análisis del mapa de susceptibilidad a incendios y clase SLT de vegetación de la Reserva de la Biosfera Maya



Clases de susceptibilidad

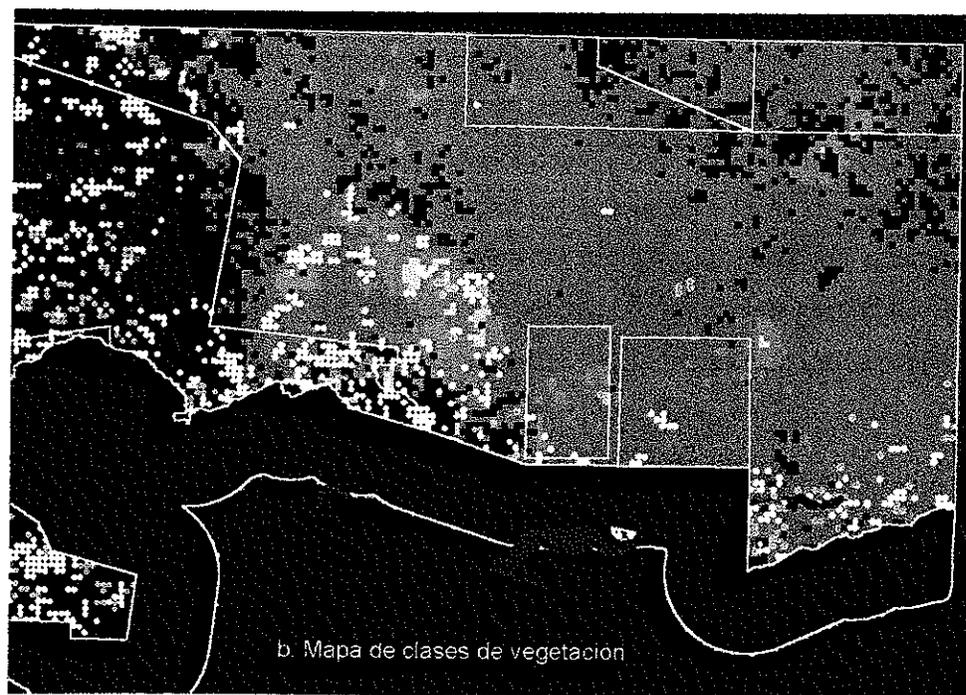
- baja
- media
- alta

- ZAM
- agricultura

Puntos de calor

- 1998
- 1999

a. Mapa de susceptibilidad a incendios forestales



Clases de vegetación

- E-1
- E-2
- E-3

Puntos de calor

- 1998
- 1999

fondo

b. Mapa de clases de vegetación



Figura 26. Análisis del mapa de susceptibilidad a incendios forestales y clase Este de vegetación, de la Reserva de la Biosfera Maya

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

Los valores de *NDVI* obtenidos en este estudio se encuentran dentro del rango de algunos promedios mundiales de *NDVI* para áreas de bosque latifoliado, sin embargo pueden existir diferencias por las particularidades debidas a los efectos no corregidos del sensor, a las condiciones atmosféricas y efectos por puntos fuera del nadir, así como también al número de imágenes utilizadas para realizar la composición de *NDVI* y condiciones particulares de los años estudiados entre otras causas de menor importancia.

Es posible diferenciar clases de vegetación según cambios por los efectos de la época seca utilizando imágenes *AVHRR* y el índice de vegetación *NDVI*.

Los cambios de *NDVI*, además de responder a cambios climáticos, pueden ser capaces de discriminar algunos tipos de cobertura vegetal, por ejemplo, áreas agrícolas, áreas de humedales y áreas de bosque.

Existe una tendencia de susceptibilidad de las clases de vegetación obtenidas de acuerdo a los patrones de comportamiento durante la época seca y la ocurrencia de puntos de calor de 1998 y 1999, en orden de importancia: clase Oeste, clase SLT y clase Este.

Las áreas de manejo más susceptibles de acuerdo al análisis efectuado son el Parque Nacional Sierra de Lacandón y el Parque Nacional Laguna del Tigre, los cuales se encuentran ubicados en las zonas con tipos de vegetación de cambios climáticos más drásticos y además en áreas de mucha actividad humana. Las áreas menos susceptibles son la Zona de Usos múltiples, el Parque Nacional Tikal, Biotopo Zotz y los Parques Nacionales del Noreste.

Existe una tendencia de comportamiento exponencial entre la distancia de los puntos de calor detectados por el sensor *AVHRR* a las áreas de frontera agrícola, vías de acceso y poblados de la Reserva de la Biosfera Maya. Esto significa que el número de puntos de calor son bastante altos mientras más cercanos a las variables medidas y van disminuyendo exponencialmente mientras se alejan.

Según la Evaluación Multicriterio, el orden de importancia de las variables analizadas son: frontera agrícola, poblados, vías acceso y vegetación. Sin embargo, esta última variable puede cobrar importancia en años más secos, como los afectados por el fenómeno del Niño.

Los incendios forestales dentro de la RBM son provocados por las actividades humanas, sobre todo por las técnicas agrícolas utilizadas históricamente en el área. Esto concuerda con la jerarquización de la frontera agrícola como la variable con mayor capacidad de provocar un incendio forestal. Además se comprobó con el análisis de puntos de calor, donde esta variable obtuvo la mayor densidad de puntos en el primer kilómetro de distancia.

Según el análisis realizado, las zonas de mayor susceptibilidad a incendios forestales se encuentran ubicadas alrededor de las áreas que han sido invadidas por la existencia de las vías de acceso dentro de la RBM, como consecuencia de ello la frontera agrícola ha avanzado en estas áreas y por lo tanto la susceptibilidad a incendios forestales también. Este comportamiento se observa en la ruta que lleva a los pozos petroleros dentro del PNLT y el camino que lleva hacia Carmelita.

Las zonas fronterizas del Oeste y Noroeste de la RBM constituyen focos de susceptibilidad, debido a que del otro lado de la frontera mexicana estas zonas son agrícolas y constituyen una constante amenaza. Por otro lado donde existen áreas de conservación del lado mexicano (Reserva de Biosfera Calakmul), disminuye notablemente la susceptibilidad dentro de la reserva.

El Parque Nacional Sierra de Lacandón es una de las áreas núcleo de la reserva con mayor susceptibilidad, debido a que está rodeado en la zona norte de una de las áreas más degradadas de la reserva. Además por su forma y ubicación geográfica posee focos de susceptibilidad a todo alrededor del área menos susceptible.

El Parque Nacional Laguna del Tigre es otra área de alta susceptibilidad, ya que posee áreas de influencia humana en todo el borde sur (Río San Pedro) y el borde Oeste (frontera con México), también posee focos humanos dentro del Parque, a lo largo del camino que conduce a la concesión petrolera. Por otro lado, las áreas que no poseen influencia humana, poseen vegetación con alta susceptibilidad a cambios por la sequía, tal es el caso de los

humedales dentro del Biotopo Laguna del Tigre y los pastizales inundables del norte del Parque.

El Biotopo Zotz y el Parque Nacional Tikal tienen comportamiento similar de susceptibilidad, por un lado están afectados por el borde sur donde inmediatamente se encuentra la zona de amortiguamiento. El Biotopo tiene un área susceptible al Suroeste y Tikal al norte, ambos por efecto de comunidades vecinas.

La Zona de Usos Múltiples es el área con menos susceptibilidad, en parte por su gran extensión, pero también por su ubicación geográfica. Posee un foco de susceptibilidad en el camino que lleva a Carmelita, y otro en el borde con la zona de amortiguamiento en la carretera que lleva a Belice.

Las zonas núcleo del norte (Biotopo Dos Lagunas, Parque Nacional Mirador y Parque Nacional Río Azul) son áreas de susceptibilidad baja, ya que se encuentran alejados de la influencia humana, a excepción del PNRA que se encuentra ligeramente influenciado por la frontera con México y Belice.

El mapa de susceptibilidad a incendios forestales aquí presentado, determina también zonas de influencia humana, lo cual queda demostrado según la zonificación de los parques más susceptibles.

La clasificación de vegetación que se realizó queda sujeta a verificación, ya que se basa únicamente en datos de 1999, cuyos resultados pueden obedecer a condiciones climáticas particulares de este año. Es así, que para poder establecer un mejor patrón de comportamiento de las variables es indispensable analizar y verificar con un estudio de varios años. Además puede realizarse el mismo estudio aplicado a todo el país o a nivel Centroamericano.

Las tendencias obtenidas del análisis entre la precipitación y el *NDVI* quedan en forma de hipótesis, debido a que únicamente se realizó con datos de una estación meteorológica. Pero a partir de aquí, se recomienda estudiar la relación entre la precipitación y el tiempo de respuesta de la vegetación. Esto debe realizarse con datos de campo, donde se obtengan muestras de las plantas predominantes del área que se estudie y se relacionen con datos de

precipitación precisos y la información proveniente de las imágenes de satélite. Una propuesta puede ser la presentada por Burgan *et al.* (1999) sobre modelos de combustibles y potencialidad a incendios. Esta recomendación se podría realizar si se cumple con el proyecto de establecimiento de estaciones meteorológicas dentro del área, el cual ya esta encaminado.

Es importante realizar la verificación de la información que se presenta, para poder establecer si los cambios detectados de la diferencia de *NDVI* expresan realmente cambios fisiológicos en la planta, este tipo de estudios existen para otras regiones, pero sería interesante realizar una comparación entre los cambios o valores de *NDVI* y datos de campo que determinen secamiento de la vegetación y su disponibilidad para arder.

Se recomienda a la Estación receptora de MARENA, la actualización de los coeficientes de correcciones geométricas y radiométricas para poder proporcionar mejores datos a los usuarios.

Debido a que no se tiene certeza de la confiabilidad de los puntos de calor y los incendios o quemas agrícolas que representan, es indispensable que con base en información de campo se pueda obtener esta información. Para ello es fundamental obtener los datos de la ubicación exacta de los incendios o quemas, además es necesario tener información sobre el área que ocupa el incendio. Los datos proporcionados por la Comisión Nacional de Incendios, sobre los incendios de este año, no fueron suficientes debido a que en la mayoría de los casos la precisión de las coordenadas eran bajas, ya que no se utilizó GPS, si no que se aproximaron las localizaciones en las hojas cartográficas. Además los datos de extensión del incendio también fueron muy aproximados.

El análisis presentado en este trabajo representa el comportamiento de la vegetación del año 1999 y el comportamiento de los incendios forestales y quemas agrícolas de 1998 y 1999, es así que se recomienda la validación del mismo con el análisis de los incendios de años siguientes. De esta forma se va obteniendo un mapa actualizado. Además este análisis puede mejorarse con información climática, topografía, vientos, humedad de la vegetación muerta y vegetación viva, calendarios de quemas, entre otras.

Sería interesante establecer estrategias de manejo en las áreas fronterizas de la reserva, debido a que son áreas que poseen alta susceptibilidad al avance de la frontera agrícola y por ende a la ocurrencia de incendios forestales. Además deben existir estrategias trinacionales con la zona Este de la reserva, ya que es la zona de la RBM con mayores probabilidades de conservación.

Las estrategias preventivas de los parques nacionales deben seguir con la capacitación de las comunidades en el manejo del fuego, sobre todo en las áreas que aquí se muestran como más susceptibles. Además deben establecerse zonas de vigilancia en estas áreas porque es donde se pueden iniciar los focos y producirse grandes incendios.

7. BIBLIOGRAFIA

- Avery, F. y Berlin, G.L. 1992. *Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation*. 5ª ed. USA: Prentice Hall. 285p.
- Barredo, J.I. 1996. *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. España: Ed. Ra-ma. 260p.
- Barrios, R. (Ed.) 50 áreas protegidas de Guatemala. Guatemala: The Nature Conservancy – Universidad de San Carlos de Guatemala. 130p.
- Brenner, M.; Lehden, B.; Binford, M.W. 1990. Recent sedimentary histories of shallow places in the Guatemalan savannas. *Journal of Paleolimnology* 4:239-252.
- Burgan, R.E.; Klaver, R.W. y Klaver, J.M. 1999. Fuel Models and Fire Potential from Satellite and Surface Observations. (En línea). Consultado el: 16 de julio de 1999. Disponible: <http://www.esri.com/base/common/userconf/proc97>
- Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo. Sf. Mapa de vegetación de Centroamérica. Proyecto de CCAD/USAID/PROARCA/CAPAS/TNC/IRG/Boston University. Resolución de 1x1 km.
- CONAP. 1992. Plan Maestro de la Reserva de la Biosfera Maya. 25p.
- CONAP. 1997 Plan Maestro Parque Nacional Sierra de Lacandón. Guatemala.
- _____. 1999. Plan Maestro 1999-2003 Parque Nacional Laguna del Tigre. Guatemala.
- Che, N. y Price, J.C. 1992. Survey of radiometric calibration results and methods for visible and near infrared channels of NOAA-7,-9 and -11 AVHRR. *Remote Sensing of Environment* 25:19-27.
- Chuvienco, E. 1990. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. España: Rialp. 452p.
- _____ y Salas, J. 1996. Mapping the spatial distribution of forest fire danger using GIS. *Int. Journal of Geographical Information Systems* 10 (3): 333-345.
- Cihlar, J.; Manak, D. y Voisin, N. 1994. AVHRR Bidirectional Reflectance Effects and Compositing. *Remote Sensing Environment* 48: 77-88.
- Congreso de la República de Guatemala. 1990. Decreto 5-90 Declaratoria de la Reserva de la Biosfera Maya.
- Defletsen, G. y Carrera, F. 1997. Las concesiones comunitarias como alternativa para el desarrollo y la conservación. *Bosques, Arboles y Comunidades Rurales* 29:30-34.
- Delcourt, H.R. y Delcourt, P.A., 1991. *Quaternary Ecology: A paleoecological perspective*. Londres:Chapman & Hall. 242p.

- De Fries, R.S. y Townshend, J.R. 1994. *NDVI-derived land cover classifications at a global scale*. Int. Journal of Remote Sensing: 15(17): 3567-3586.
- Duplessy, J.C; Arnold, M.; Maurice, P.; Bard, E.; Duprat, J. y Moyes, J., 1986. Direct dating of the oxygen-isotope record of the last glaciation by ^{14}C accelerator mass spectrometry. Nature 320:350-352.
- Erdas. 1997. Erdas Field Guide. USA: Erdas inc. Fourth Edition. 656 p.
- Ehrlich, D.; Estes, E. y Singh, A. 1994. Applications of NOAA-AVHRR 1km data for environmental monitoring. Int. Journal of Remote Sensing 15(1): 145-161.
- Eastman, J.R. 1997. Idrisi for Windows: User's Guide Version 2.0 Usa: Clark University. sp.
- Flasse, S.P. y Ceccato, P. 1996. A contextual algorithm for AVHRR fire detection. Int. Journal of Remote Sensing 17(2): 419-424.
- _____; Ceccato, P.; Downey, I. y Navarro, P. Principios y aplicaciones para la detección de incendios. En: Memoria del taller del Proyecto de Monitoreos de Recursos Terrestres (Incendios) en Nicaragua. (Nicaragua, 1996) pp. 27-31.
- Georrecursos 1998. Evaluación de daños ocasionados por los incendios forestales durante el verano de 1998. Informe de Consultoría. Instituto Nacional de Bosques. Guatemala.
- Goldammer, J.G. 1988. Rural land-use and wildland fires in the tropics. Agroforestry Systems 6:235-252.
- _____. 1997. International Decade for Natural Disaster Reduction: Report on Early Warning for Fire and other Environmental Hazards. Fire Ecology Research Group. Germany: IDNDR. 35p.
- _____. 1998. Rural land-use and wildland fires in the tropics. Agroforestry Systems. 6:235-252.
- Gómez, L.D. 1982. The origin of the Pteridophyte flora of Central America. Ann. Missouri Botanical Garden. 69: 548-556.
- Goward, S.N.; Turner, S.; Dye, D.G. y Liang, S. 1994. The University of Maryland improved Global Vegetation Index Product. Int. Journal of Remote Sensing 15 (17): 3365-3395.
- Gregorie, J.M. 1990. Effects of h dry season on the vegetation canopy of some river basins of West Africa as deduced from NOAA-AVHRR data. Hydrological Science Journal. 35:323-339.
- INSIVUMEH_PNUD. 1989. Memoria: I Congreso Guatemalteco de Agrometeorología. Guatemala: Sección de Agrometeorología. INSIVUMEH 337p.

- Jankowski, P. 1995. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. *Int. Journal of Geographical Information Systems* 9(3): 251-273.
- Jansen, J.R. 1996. *Introductory Digital Image Processing: a remote sensing perspective*. 2^a. Ed. USA: Prentice Hall. 316p.
- Islebe, G.A.; Hooghiemstra, H. y Borg, V. (en prensa) A Holocene vegetation history of lowland Guatemala (Lake Petén Itzá). Artículo aceptado por *The Holocene*
- Lundell, C.L. 1937. *The Vegetation of Petén*. USA: Carnegie Institution of Washington. 221p.
- Kidwell, K. (Ed.) 1995. *NOAA Polar Orbiter Data: User's Guide*. Washington: NOAA/NESDIS. (En línea) Consultado el: 25 de febrero de 1999. Disponible: <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/cover.htm>
- Lillesand, T.M. y Kiefer, R.W. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. USA: John Wiley & Sons, Inc. 3th Edition. 750 p.
- Lundell, C.L. 1937. *The Vegetation of Petén*. USA: Carnegie Institution of Washington. 221p.
- Martín, M.P. y Chuvieco, E. 1995. Cartografía y evaluación superficial de grandes incendios forestales a partir de imágenes de satélite. *Ecología* 9:9-12.
- Méndez, C.; Barrientos, C.; Catañeda, F. y Rodas, R. Programa de Monitoreo, Unidad de Manejo Laguna del Tigre, los estudios base para su establecimiento. Guatemala: ProPetén-Coservación Internacional. Documento Técnico. 63p.
- Meyerson, F. 1997. Potential Threats to the Selva Maya Biosphere Reserves: Demographic and Land-use Projections (1950-250), En: Taller del Proyecto de Monitoreo de Biodiversidad de la Selva Maya, Flores, Petén, Guatemala
- Miranda, F. 1978. *Vegetación de la Península Yucateca*. México: Colegio de Posgraduados, SARH. pp. 215-271.
- Moody, A. y Strahler, A.H. 1994. Characteristics of composited AVHRR data and problems in their classification. *Int. Journal of Remote Sensing* 15 (17): 3473-3491.
- Navarro, P. y Flasse, S.P. 1996. La Teledetección con NOAA y la capacidad de sistemas de información geográfica en MARENA. En: Memoria del Taller del Proyecto de Monitoreo de Recursos Terrestres (Incendios) en Nicaragua (Nicaragua 1996) pp. 27-31.
- Sader, S. 1998. Spatial Characteristics of Forest Clearing and vegetation regrowth as detected by Landsat Thematic Mapper Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 61(9): 1145-1151.

- Stanley, S.A. 1998, Evaluación rápida de los incendios forestales de 1998 en la Reserva de la Biosfera Maya, Petén, Guatemala. Informe de Consultoría a la Comisión Nacional de Areas Protegidas. 21p.
- Schuster, E.; Frissell, S.S.; Baker, E. and Loveless Jr. R. 1985. The Delphi method: application to elk habitat quality. U.S. Department of Agriculture. Research paper INT-353. 32p.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing Environ 8: 127-150.

ANEXO 1

Algoritmo para la detección de nubes utilizado en MARENA
Jacques A. 1999. Comunicación electrónica

El algoritmo utilizado es el siguiente:

Para imágenes DIURNAS:

Un píxel es considerado como cubierto por una nube si una de estas pruebas es positiva:

1. $ch1 + ch2 > 1.1$ (o sea, 110% de reflectancia bidireccional)
2. $ch5 < 265$ K (temperatura de brillo en grados Kelvin)
3. $ch1 + ch2 > 0.75$ y $ch5 < 290$ K
4. $ch1 > ch2$ y $ch1 + ch2 > 0.4$

Una vez determinados los grupos de píxel que son nubes, se les agrega un "buffer" de 2 píxel alrededor que se considera que son los "bordes" de la nube, para eliminar cualquier interferencia. Esto último no se le aplica siempre, pero se hizo en Nicaragua, porque nos parecía que muchas nubes tenían contornos no tan nítidos y era complicado discriminar lo que realmente era nube y lo que no era.

Para imágenes NOCTURNAS:

Se realiza la siguiente prueba:

$Ch5 < 280$ K

Para detectar si una imagen es diurna o nocturna se usa el sistema IDL (Interactive Display Language) que calcula el promedio de ángulo cenital del sol por toda la imagen. Si este promedio es mayor a 80 grados (es decir, el sol está casi al horizonte) la imagen es nocturna. Si no, diurna.

ANEXO 2

Algoritmo Contextual para la detección de incendios utilizando AVHRR

Flasse S.P. y Ceccato P. (1996). A contextual algorithm for AVHRR fire detection. Int. Journal of Remote Sensing 17(2): 419-424.

El algoritmo contextual consiste de dos etapas:

1. Detección de incendio potencial

Este paso selecciona de forma gruesa todos los píxeles que pueden ser incendios. Para ello se utilizan umbrales lo suficientemente bajo para detectar los píxeles que pueden ser incendios y lo suficientemente altos para discriminar lo que definitivamente no son incendios. Para ello se utiliza dos tests:

Prueba 1: el píxel es seleccionado como incendio potencial (IP) si:

$$T_3 > 311 \text{ K (1)}$$

y

$$T_3 - T_4 > 8 \text{ K (2)}$$

Donde T_3 y T_4 (en grados kelvin) son la temperatura radiante captada por los canales 3 y 4 respectivamente del sensor AVHRR. La elección de los umbrales utilizados en estas dos pruebas derivan de la experiencia. En (1) el umbral fue seleccionado tan bajo como para reducir la probabilidad de que un fuego potencial pueda ser rechazado en ambientes frescos como sucede dentro del bosque. El segundo umbral (2) fue lo suficientemente alto para rechazar aquellos píxeles que pueden no ser fuegos. Estos umbrales aumentan su eficiencia si las nubes, desiertos y agua son enmascarados.

Prueba 2: Píxeles con alta reflectancia:

Debido a que el canal 3 de AVHRR cubre rangos del espectro correspondientes a la zona solar y termal, es importante rechazar aquellos píxeles cuyo valor en el canal 3 puede ser saturado o puede ser lo suficientemente alto, debido a una alta reflectancia más que por su temperatura. Esto es estimado a través de la reflectancia en el canal 2, de la siguiente forma:

Un IP no es incendio si

$$\rho_2 \geq 20\%$$

donde ρ_2 es el factor de la reflectancia bidireccional hasta arriba de la atmósfera en el canal 2. Cuando se aplican las máscaras, la experiencia muestra que con esta prueba todavía se eliminan puntos de calor falsos, por ejemplo en sitios como las sabanas radiantes o en ríos.

2. Confirmación de los incendios potenciales:

La segunda etapa confirma que un IP seleccionado en la etapa anterior es definitivamente un incendio. Para cada IP, esta decisión se hace con base en cierto conocimiento del punto de

calor potencial y sus vecinos. Si los pixeles vecinos son realmente diferentes que el IP, este es seleccionado como un incendio.

Para cada IP se obtiene una información estadística calculada automáticamente de una ventana contextual de tamaño variable. (de 3 x 3 a 15 x15 pixeles) alrededor del IP, para analizar hasta por lo menos 25% de los pixeles vecinos, los cuales son considerados como fondo del incendio y por lo menos hasta 3 pixeles son elegibles para ser usados en el cálculo. Cuando estas condiciones no son conocidas, el IP es rechazado y el pixel es marcado como no-incendio, de lo contrario la siguiente información es calculada:

T_{3b} = media de T_3 del fondo del incendio

$\sigma_{T_{3b}}$ = desviación estándar T_3 del fondo del incendio

T_{34b} = media de $[T_3 - T_4]$ del fondo del incendio

$\sigma_{T_{34b}}$ = desviación estándar de $[T_3 - T_4]$ del fondo del incendio

Solo aquellos pixeles que tienen un fondo de incendio normal son seleccionados para los cálculos estadísticos, eso quiere decir que no deben ser un IP, y si se localizan tampoco pixeles con agua o nubes, ya que su inclusión sesga la información estadística. Por ejemplo, el suelo caliente, discriminado como IP rodeado de agua puede ser confirmado como un fuego, porque los valores bajos en el canal 3 del agua podrían disminuir la media del fondo del incendio. Por el contrario, un incendio pequeño rodeado de otros incendios puede no ser confirmado como incendio, porque los valores de los otros incendios podrían incrementar erróneamente la media del fondo del incendio.

Prueba 3: Prueba contextual

Finalmente un IP es clasificado y considerado como incendio si es lo suficientemente diferente de su fondo:

IP es confirmado como un incendio cuando

$$T_{3PF} - [T_{3B} + 2\sigma_{T_{3B}}] > 3K$$

y

$$T_{34PF} > T_{34b} + 2\sigma_{T_{34b}}$$

ANEXO 3.

ANEXO 3a. EVALUACIÓN MULTICRITERIO –MCE- DEFINICIÓN DE VARIABLES

QUEMAS:

Se dan en la **frontera agrícola**, cercanos a bosques. Provocados para limpiar las áreas de cultivo y en algunos casos para aumentar la frontera agrícola, por ejemplo en las áreas núcleo de la RBM.

OTRAS CAUSAS:

Se toman en cuenta todos los incendios que son provocados por accidentes, incendiarios, cazadores, xateros. Se deben analizar a través de los poblados y caminos, ya que estas dos variables pueden favorecer a este tipo de incendios.

- **Poblados:** Son el espacio físico que ocupan las viviendas y el rango de influencia donde puede ocurrir un incendio forestal debido a accidentes, niños jugando con fuego, colillas de cigarro e incendiarios.
- **Acceso:** son los caminos, trocopes, brechas que se observan en una hoja cartográfica, no incluye las brechas recientes hechas por xateros y chicleros. Se deben analizar desde el punto de vista que, con los caminos hay actividad humana lo que aumenta la probabilidad de que ocurran accidentes e incendios forestales.

VEGETACIÓN: Se define como la vegetación que esta disponible para quemarse y que puede estar más seca por efectos de la sequía.

ANEXO 3b. Hoja de evaluación y definiciones para la Evaluación Multicriterio

EVALUACIÓN MULTICRITERIO –MCE-
ÁREAS SUSCEPTIBLES A INCENDIOS FORESTALES

NOMBRE: _____

Escala de importancia:

igual	Débil fuerte							
0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0

Matriz de evaluación:

	Población	Caminos	Quemas	Vegetación susceptible
Población				
Caminos				
Quemas				
Vegetación susceptible				

Razones del juicio

1. Población/caminos: _____

2. población/quemas: _____

3. población/vegetación: _____

4. caminos/quemas: _____

5. caminos/vegetación: _____

6. quemas/vegetación: _____

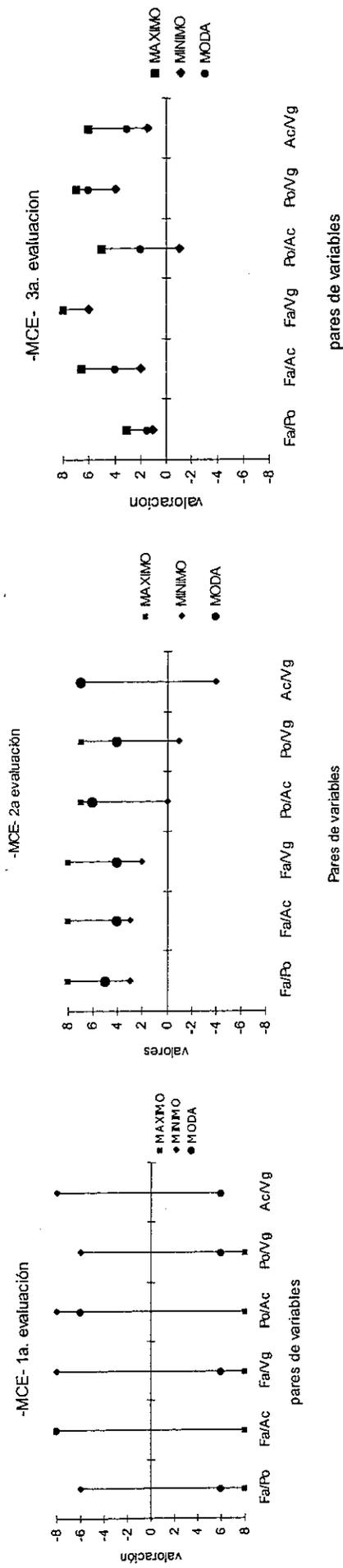
ANEXO 4.

Nombre de los expertos entrevistados para la valoración de variables en la Evaluación Multicriterio.

EXPERTO	CARGO	INSTITUCION
1. José Jorge Chan	Técnico Forestal	INAB
2. Erick Cuéllar	Técnico sección de Proyectos	CONAP
3. Manuel Manzanero	Coordinador regional de vida silvestre y manejo forestal	CONAP
4. César Vinicio Montero	Director Parque Nacional Laguna del Tigre	CONAP
5. Ricardo Morataya	Coordinador Nacional del Proyecto de Incendios forestales	INAB
6. Reginaldo Reyes	Coordinador Guatemala	CATIE/OLAFO
7. Walter de la Roca	Técnico en Incentivos forestales	INAB
8. Juan José Romero	Técnico sección de manejo forestal	CONAP
9. Oscar Salazar	Técnico Forestal	INAB
10. Manuel Segura	Técnico de divulgación y educación ambiental	CONAP-Parque Nacional Sierra de Lacandón
11. René Suárez	Director Región Metropolitana	INAB
12. Marco Tulio Torres	Auxiliar en control y vigilancia Parque Nacional Laguna del Tigre	CONAP

ANEXO 5

Resultados de la valoración para la evaluación multicriterio, realizada a 12 expertos en incendios forestales mediante la metodología Delphi.



Pares de variables: Fa = frontera agrícola, Ac = vías de acceso Po = población, Vg = vegetación

En los gráficos se puede observar la secuencia de la evaluación con el método Delphi, el cual busca la congruencia entre las personas entrevistadas mediante varias evaluaciones iterativas.

ANEXO 6

Tipos de Vegetación del Parque Nacional Laguna del Tigre y Biotopo Laguna del Tigre

Tomado de:

Méndez C. Barrientos C. Catañeda F. Rodas R. Programa de Monitoreo, Unidad de Manejo Laguna del Tigre, los estudios base para su establecimiento. Guatemala: Propetén-Conservación Internacional. Documento Técnico. 63p.

Bosque alto: caracterizado por un estrato arbóreo denso, alto, diámetro de copa que permiten el contacto entre árboles. Generalmente sobre colinas o pequeñas serranías. Asociaciones típicas de Petén como los ramonales (*Brosimum alicastrum*) son predominantes en esta clase. El bosque alto ocupa un área de 19,354 ha, 5.72% de todo la unidad de manejo

Bosque de encino: Es un relicto de *Quercus oleoides* en el área del río Sacluc y San Pedro, que ocupa un área de 2,367 ha., 0.7% de la unidad de manejo. El área está dominada por encino, asociado con pucté (*Bucida buceras*) y tinto (*Haematoxylon campechianum*) en zonas inundables.

Bosque de transición: Ocupa la mayor parte de la unidad de manejo (175,432 ha, 51.8%). Es un tipo de asociaciones que en general ha sido denominada como bosque transicional. Presenta áreas formadas por la unión de parches de bosque alto, bosque bajo y sabana entremezclados sin patrón definido. Bosque bajo es que está periódicamente sujeto a inundación con especies indicadoras de esta condición como el pucté (*Bucida buceras*). Sabana es una agrupación constituida por extensas praderas de gramíneas, pudiendo o no incluir árboles de poca altura distribuidos en forma dispersa.

Sabana inundable: áreas inundadas o sujetas a inundación. Vegetación dominada por Poaceas y Bambusaceae (jimbal). Extensa historia de fuego. Ocupan la parte Norte de la zona Central y Oeste de la unidad de manejo, cubren 50,996 ha, 15% del total.

Pantano: Las áreas consideradas como pantano son inundadas o sujetas a inundación. Ocupan una gran parte de la zona Este y Oeste de la Unidad de Manejo, cubren 40,671 ha, 12% del total. Las altitudes sobre el nivel del mar alcanzan escasamente los 100 metros (con topografía plana). Se caracteriza por vegetación emergente *Cladium sp.* Poaceas. Presenta extensa historia de fuego.

Area de impacto: Areas descombradas recientemente, guamiles y potreros. Están relacionadas con vías de acceso (carreteras y ríos). Ocupan una gran parte de la zona Central y Este de la unidad de manejo, cubren 49,747 ha, 15% del total.