



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**MATERIAL CARBONIZADO EN REGISTROS
SEDIMENTARIOS LACUSTRES COMO INDICADOR
DE REGÍMENES DE INCENDIOS EN EL CENTRO Y
SUR DEL PAÍS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G A

P R E S E N T A:

MINERVA LÓPEZ PÉREZ



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. YOHAN ALEXANDER CORREA METRIO
(2014)**

Hoja de datos del jurado

1. Datos del Alumno

López
Pérez
Minerva
(55) 57539661
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
406090636

2. Datos del tutor

Dr.
Yohan Alexander
Correa
Metrio

3. Datos del Sinodal 1

Dra.
María del Socorro
Lozano
García

4. Datos del Sinodal 2

Dra.
Liseth Carolina
Pérez
Alvarado

5. Datos del Sinodal 3

Dra.
Margarita Erna
Caballero
Miranda

6. Datos del Sinodal 4

Dra.
Blanca Lucía
Prado
Pano

7. Datos del trabajo escrito

Material carbonizado en registros sedimentarios lacustres como indicador de regímenes de incendios en el centro y sur del país.

77 p
2014

Lo que sabemos es una gota de agua, lo que ignoramos es el océano

Isaac Newton

ÍNDICE

Agradecimientos	iv
Resumen	v
1. Introducción	1
1.1 Marco Teórico	3
1.1.1 Generación de partículas de material carbonizado	3
1.1.2 Procesos tafonómicos de las partículas de material carbonizado	5
1.1.3 Formas de estudiar el material carbonizado lacustre	7
1.2 Antecedentes	8
2. Objetivos e Hipótesis	10
3. Sitios de estudio	12
3.1 Centro de México	12
3.2 Península de Yucatán y alrededores	18
4. Métodos	27
4.1 Partículas de material carbonizado	27
4.2 Datos de incendios actuales	29
4.2.1 Satélites	29
4.2.2 Características de los datos	31
4.3 Datos ambientales	32
4.4 Procesamiento estadístico	32
5. Resultados	37
5.1 Partículas de material carbonizado e incendios	37
5.2 Señal de fondo y señal de incendios	42
5.3 Relación carbón e incendios	46
5.4 Influencia del ambiente	49
6. Discusión	55
7. Conclusiones	61
8. Bibliografía	63
9. Anexos	70

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Yohan Alexander Correa Metrio, por sus enseñanzas, apoyo y paciencia al dirigirme en la elaboración de esta tesis.

A mis sinodales, Dra. María del Socorro Lozano García, Dra. Margarita E. Caballero Miranda, Dra. Blanca Lucía Prado Pano y Dra. Liseth C. Pérez Alvarado, por haberse tomado en tiempo en leer mi trabajo y aportar a éste sus ideas y experiencias.

Al Dr. Anje Schwalb del Insitut für Umweltgeologie, Alemania, junto con la Dra. Liseth Pérez por colectar las muestras de la Península de Yucatán y alrededores (Belice y Guatemala) que forman parte de este trabajo.

A la Dra. Susana Sosa Nájera, por su apoyo mientras procesé las muestras en el Laboratorio de Paleoambientes en el Instituto de Geología.

A mis compañeros del grupo de trabajo: Yosa, Ale, Esme, Juan Felipe y Juan Carlos.

Esta tesis se llevó a cabo gracias a los apoyos financieros de los proyectos: CONACYT 0167621 “El cuaternario tardío en el centro de México: estimación cuantitativa y meta-análisis de cambios climáticos inferidos de secuencias lacustres”. UNAM-PAPIIT IA200412 “Desarrollo y calibración de métodos para la cuantificación de cambios climáticos a escalas milenarias aplicadas al centro de México. UNAM-PAPIIT IN101513 “Registros de la variabilidad climática en el ecotono entre el bosque tropical y el bosque templado”. Al Instituto de Geología de la Universidad Nacional de México por los apoyos económicos brindados.

Por último y no menos importante, a mi madre por apoyarme para estudiar lo que me apasiona.

RESUMEN

Objetivo. El objetivo principal de este trabajo es conocer la relación de las partículas de material carbonizado preservadas en sedimentos lacustres modernos con los incendios ocurridos alrededor de los lagos.

Ubicación. Los sedimentos se obtuvieron de 21 cuerpos de agua en la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y 51 en la Península de Yucatán (PY) y alrededores.

Método. Se extrajeron y cuantificaron partículas de material carbonizado de sedimento lacustre moderno, las cuales se agruparon en cuatro clases de tamaño para facilitar su relación con los incendios. La información de incendios alrededor de los cuerpos de agua se obtuvo de imágenes satelitales, identificando incendios alrededor de los cuerpos de agua que ocurrieron hasta cinco años antes del muestreo y a 15 km alrededor de los mismos.

Resultados. Se identificó para todos los cuerpos de agua muestreados los parámetros estadísticos de la distribución de la señal de fondo, aquellas partículas que no reflejan incendios alrededor de los sitios, y de la distribución de la señal de incendios. En los sitios donde no se registraron incendios en el tiempo que comprende el trabajo, pero si hay presencia de material carbonizado, se confirmó que estas partículas corresponden a la señal de fondo. Al evaluar la relación lineal entre el material carbonizado e incendios se encontraron relaciones significativas y valores de $R^2 \sim 0.4$ en lagos de la FVTM, y de $R^2 \sim 0.1$ en la PY y alrededores. Tomando en cuenta a la vegetación que rodea a los cuerpos de agua y variables ambientales, el Análisis de Factores Múltiples mostró que la mayor variabilidad es aportada por las partículas de carbón $< 0.0064 \text{ mm}^2$, y por incendios detectados 5 años antes del muestreo sedimentario a 15 km de proximidad a los cuerpos de agua. Con una certeza de 0.78, se definió que las partículas de material carbonizado de los sitios estudiados representan incendios ocurridos dos años antes del muestreo de sedimentos y en un radio de 5km alrededor de los mismos.

Conclusiones principales. Las partículas de material carbonizado mayores a $70 \mu\text{m}$ en la FVTM, y mayores a $80 \mu\text{m}$ en la PY y alrededores, indican incendios ocurridos alrededor de los cuerpos de agua. En términos de la distancia de los incendios a los lagos, se determinó que el área de influencia de las partículas de material carbonizado en los sitios estudiados es de 78.5 km^2 . En términos de la temporalidad de los incendios representados en las partículas de material carbonizado, el centímetro de sedimento superficial analizado contiene información de incendios ocurridos dentro de los dos últimos años anteriores a la colecta de sedimento. Para lograr una efectiva calibración del material carbonizado se debe considerar, además de las variables utilizadas en este trabajo, información limnológica de los cuerpos de agua y análisis espaciales más detallados de los incendios. El esfuerzo por calibrar los indicadores paleoecológicos, como el material carbonizado lacustre, es primordial en nuestro país es primordial para lograr interpretaciones del pasado con mayor confiabilidad, de tal forma que logremos conocer como han sido los regímenes de incendios a lo largo del tiempo y su efecto e interacción con los patrones climáticos y biogeográficos.

Palabras clave. *Material carbonizado, sedimento lacustre, imágenes satelitales, Faja Volcánica Transmexicana, Península de Yucatán.*

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia del planeta el fuego ha estado presente como una fuerza importante que impacta los sistemas bióticos. Por medio de carbón fósil se sabe que los incendios forestales en el planeta comenzaron poco después de la aparición de las plantas terrestres en el Silúrico, hace 420 millones de años (Bowman *et al.*, 2009). El fuego se origina de forma natural por la caída de rayos, caída de meteoritos, actividad volcánica y artificialmente por la intervención humana (Patterson *et al.*, 1987b). Los incendios pueden ser desastrosos o benéficos según el sitio y la magnitud con que se presentan. En México, un incendio forestal se define como un evento que ocurre cuando el fuego se extiende de manera descontrolada y afecta los bosques, las selvas, o la vegetación de zonas áridas y semiáridas (CONAFOR, 2013). Para entender mejor la respuesta de los ecosistemas a los incendios se requiere información de la variabilidad natural en diferentes tipos de vegetación y condiciones climáticas, así como su asociación con el fuego a través del tiempo. Conocer la forma en la que los incendios se han presentado a lo largo del tiempo en un lugar nos puede proporcionar una base para definir la dinámica de los ecosistemas en respuesta a las perturbaciones (Green, 1985; Sadori & Giardini, 2007). Esto es posible con estudios paleoecológicos que nos permiten conocer la respuesta de la vegetación a los incendios en diversas escalas temporales.

Para conocer acerca de los incendios ocurridos en el pasado se utilizan principalmente dos herramientas: los anillos de crecimiento de los árboles y el material carbonizado en los sedimentos. La primera nos permite conocer con precisión el sitio donde ocurrió el incendio, así como la intensidad del mismo. Sin embargo, su alcance temporal no llega a más allá de unos cuantos cientos de años antes del presente, representando una seria limitación para las reconstrucciones (Whitlock, 2001, 2003, 2004). La segunda herramienta, en la cual está enfocado este trabajo, son las partículas de material carbonizado que se preservan en los sedimentos lacustres, los cuales ofrecen información en escalas temporales que llegan hasta cientos de miles de años atrás (Patterson *et al.*, 1987b; Clark, 1988). Sin embargo, a diferencia de los anillos de crecimiento, esta herramienta aún ofrece información limitada con respecto a la extensión espacial e intensidad de los incendios.

Los registros sedimentarios lacustres ofrecen evidencias de los cambios ambientales ocurridos a lo largo del tiempo, pues los sedimentos se depositan generalmente de manera continua y es posible datarlos con diversos métodos (Delcourt & Delcourt, 1991; Bradley, 1999). En los sedimentos se preservan diversos indicadores biológicos como polen, diatomeas, ostrácodos, esporas, y material carbonizado (Birks & Birks, 1980). También se utilizan datos geoquímicos e isotópicos, que junto a los indicadores biológicos brindan evidencia sobre eventos climáticos y ecológicos en el tiempo.

Debido a la complejidad de los procesos de generación, depositación y preservación del material carbonizado en los lagos, se han desarrollado estudios tafonómicos modernos para mejorar la interpretación de este indicador (Higuera *et al.*, 2007; Peters, 2007). Dichos estudios tienen como objetivo mejorar el entendimiento de este indicador, de manera que las interpretaciones derivadas de él sean cada vez más informativas. Se ha revisado la influencia del viento en la depositación de las partículas carbonizadas (Gardner, 2001), el tamaño de las partículas y su asociación con la escala geográfica de los incendios (Millsbaugh, 2000), la forma en que se distribuyen las partículas por tamaños a partir de un incendio conocido o experimental (Clark, 1998; Lynch, 2004), se han modelado la tafonomía y la dispersión de las partículas carbonizadas (Higuera *et al.*, 2007), etc. Sin embargo, estos trabajos se han desarrollado en su mayoría para zonas templadas, de manera que son pocos los trabajos que intentan conocer cómo se comportan las partículas de carbón en ecosistemas de latitudes más bajas.

En la zona tropical, se ha explorado la tafonomía de las partículas de material carbonizado en sabanas, buscando una relación entre el tamaño de los lagos y la señal de carbón que presentan en sedimentos superficiales (Duffin *et al.*, 2008). Por otro lado, otros autores han explorado el comportamiento de las partículas de material carbonizado en el suelo, con un enfoque en el tratamiento estadístico de los datos (McMichael *et al.*, 2012).

En México se han utilizado las partículas de material carbonizado como indicador de incendios para, junto con polen, conocer las dinámicas de la vegetación a través del tiempo. Tal es el caso del Lago Verde en Los Tuxtlas (Lozano-García *et al.*, 2007; Lozano-García *et al.*, 2010), la Cuenca Alta del Río Lerma (Lozano-García *et al.*, 2005), Laguna Atezca en Hidalgo (Conserva, 2002), y el Lago Zirahuén, en Michoacán (Torres-Rodríguez *et al.*,

2012), etc. Sin embargo, no existe una calibración que permita derivar interpretaciones cuantitativas de la señal ofrecida por el material carbonizado. Así, mediante este trabajo se pretende conocer la respuesta general de las partículas de material carbonizado en lagos de del centro de México y cuerpos de agua en la Península de Yucatán y alrededores. Los cuales presentan condiciones ambientales contrastantes, para posteriormente determinar qué condiciones ambientales influyen los procesos de producción y deposición de material carbonizado, y aún más importante, refinar el entendimiento que existe respecto a las relaciones entre el material carbonizado y el fuego que lo genera.

De especial importancia resulta el entendimiento de las relaciones existentes entre la cantidad y localización de los incendios y la cantidad y distribución de tamaño del material carbonizado depositado en los lagos. A partir de este entendimiento se pueden generar herramientas de interpretación que aplicadas a los registros sedimentarios, permitirían conocer cómo ha sido el régimen de incendios natural en México.

México cuenta con un número elevado de lagos con diversos ecosistemas que representan una gran oportunidad para conocer acerca del pasado del país a través de sus registros sedimentarios. Así, se obtuvieron muestras de sedimentos superficiales de 72 cuerpos de agua, principalmente lagos localizados en el centro de México y en la Península de Yucatán, para describir la cantidad de material carbonizado presente y su distribución en clases de tamaño. De igual manera, se utilizó información de incendios ocurridos alrededor de cada sitio muestreado, los que fueron captados por el sensor MODIS de los satélites Terra y Aqua de la NASA, hasta cinco años anteriores a la toma de muestra de sedimento. Finalmente, se establecieron relaciones estadísticas entre el material carbonizado y la información derivada de las imágenes satelitales, tendiendo al establecimiento de una herramienta que permita interpretar el material carbonizado fósil de una manera cuantitativa.

1.1. Marco teórico

1.1.1 Generación de partículas de material carbonizado

Cuando ocurren incendios, se generan partículas de material carbonizado, una forma amorfa del carbón inorgánico resultado de la combustión incompleta (pirólisis) de materia

orgánica (Fig. 1.1) (Patterson *et al.*, 1987b). Se reconocen dos características importantes del material carbonizado (Scott, 2010): la primera es que se puede preservar la anatomía de la planta en piezas que suelen medir algunas micras, permitiendo la identificación taxonómica; y la segunda característica es que es relativamente inerte y fácil de preservar en los registros fósiles.



Figura 1.1. Partículas de material carbonizado. Se muestran partículas vistas con microscopio estereoscópico obtenidas de sedimentos lacustres.

Dependiendo del tamaño de las partículas carbonizadas, éstas pueden ser transportadas desde el sitio del incendio a diversos lugares por medio del viento y el agua, y eventualmente son incorporadas y preservadas en los sedimentos de los lagos (Clark, 1988). El proceso de carbonización de la materia vegetal se da según la temperatura alcanzada en el incendio (Scott, 2010): A temperaturas de 20 a 110°C, la celulosa absorbe calor y libera vapor de agua; cuando la temperatura está alrededor de los 100°C la madera se seca completamente; de los 100 a 270°C los últimos restos de agua se desprenden y la madera se comienza a descomponer liberando monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido acético y metanol; de 270 a 290°C, comienza la descomposición exotérmica de la madera con desprendimiento de gases y vapores; de 290 a 400°C, el rompimiento de la estructura de la madera continúa, los alquitranes comienzan a predominar; finalmente, a los 400°C la carbonización de la madera está prácticamente completa. De esta manera, en incendios

forestales, el tipo de material que se quema, el combustible, el tipo de incendio y su intensidad, influyen en la cantidad y forma de las partículas de material carbonizado (Patterson *et al.*, 1987b; Scott, 2010).

1.1.2 Procesos tafonómicos de las partículas de material carbonizado

La tafonomía de las partículas de material carbonizado estudia los procesos que ocurren desde que éstas se generan, hasta que son colectadas las muestras de sedimento. Esto incluye la dispersión de las partículas, su depositación en los lagos y la forma en que se generan los arreglos en el sedimento (Patterson *et al.*, 1987b; Whitlock, 2001). La cantidad de material carbonizado que queda en los sedimentos y que es usada para los análisis y reconstrucción de incendios se ve afectada directamente por todos estos procesos (Figura 1.2). Se consideran dos momentos importantes en la depositación del material carbonizado (Whitlock, 2001; Higuera *et al.*, 2007). Un primer periodo de depósito ocurre durante un incendio o en un periodo de tiempo muy corto posterior al mismo, y produce material carbonizado conocido como primario. De manera subsecuente, factores de transporte como el viento y el agua trasladan partículas almacenadas en el suelo y las depositan en los lagos aún en tiempos en los que no ocurren incendios, dando lugar al material carbonizado secundario.

Las partículas de material carbonizado pueden viajar grandes distancias desde el punto donde ocurre el incendio por medio de viento (Clark, 1988; Gardner, 2001) y modelos de dispersión Gaussianos muestran que las partículas macroscópicas (>100µm de diámetro) se depositarían principalmente entre 10 y 100 m del lugar del incendio siendo transportadas por el viento (Higuera *et al.*, 2010). Otros trabajos que han analizado la dispersión de partículas de material carbonizado a partir de incendios experimentales también concluyen que las partículas macroscópicas reflejan eventos de fuego locales, siendo las partículas carbonizadas microscópicas (<100 µm) las que alcanzan mayores distancias de dispersión, reflejando de esta manera eventos de fuego regionales y continentales (Whitlock, 1996; Lynch, 2004; Higuera *et al.*, 2007; Peters, 2007).

Una cantidad importante de partículas de material carbonizado son transportadas por flujos superficiales de agua. Después de los incendios en el suelo se forma una capa

repelente al agua producto de las altas temperaturas, facilitando la movilidad de las partículas de carbón que quedan en la superficie (Scott, 2010). Así, la escorrentía es el factor principal de transporte de material carbonizado, la cual se ve afectada por la topografía alrededor de las cuencas (Whitlock, 2001; Scott, 2010).

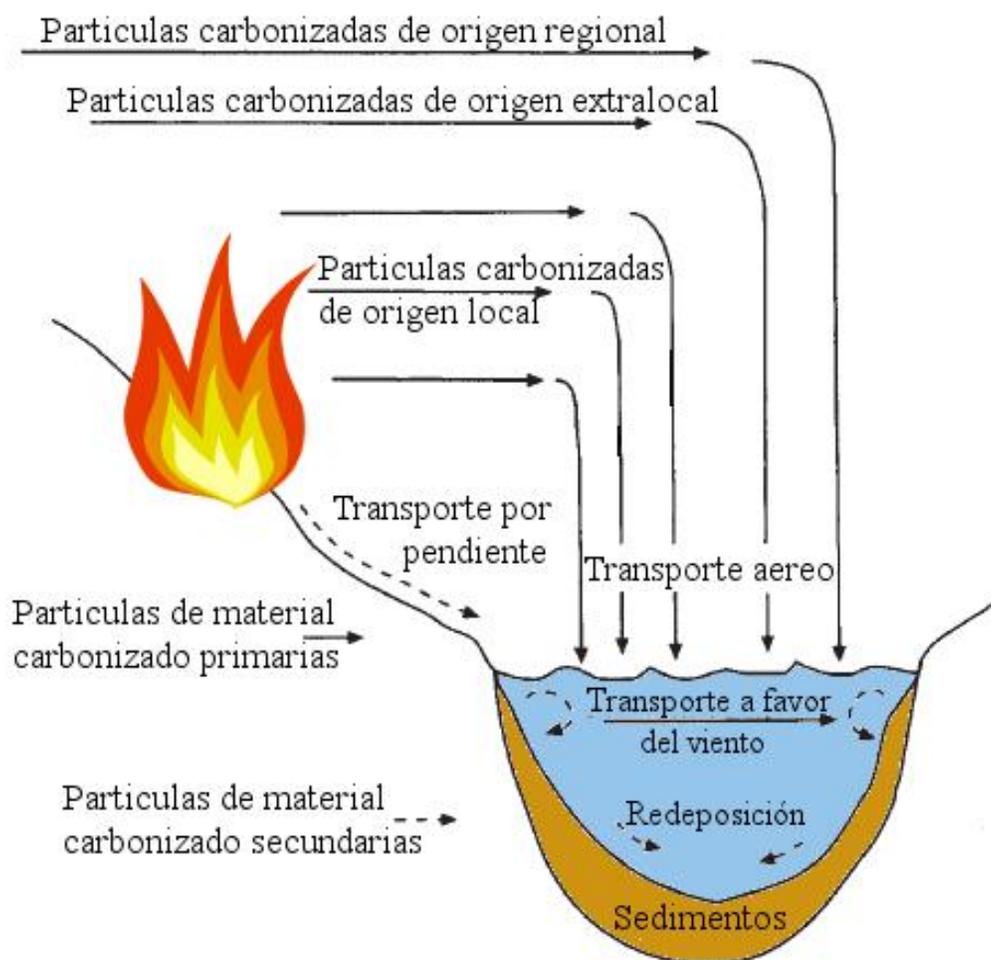


Figura 1.2. Esquema de procesos tafonómicos del material carbonizado. Las partículas se originan en incendios que pueden ser cercanos o no a los lagos, su transportación se da principalmente escorrentía. Dentro de los lagos hay procesos de mezcla y redistribución de sedimentos que influyen en el registro. Modificado de (Whitlock, 2001).

El tiempo en que se da la dispersión de las partículas de material carbonizado varía en cada evento, y se ve modulado por el relieve y las condiciones ambientales que se presentan después del incendio. Se considera que la mayor parte del material carbonizado se deposita

en un periodo de tiempo muy cercano al incendio, pero siguen incorporándose cantidades menores de material después del fuego (Patterson *et al.*, 1987b). Debido a esto, al estudiar núcleos sedimentarios lacustres se observan capas sedimentarias con abundancias de carbón por encima de una cierta cantidad de fondo o constante, identificándose “picos” de carbón que se interpretan como evidencia de incendios pasados (Whitlock, 1996; Higuera *et al.*, 2010).

Al integrarse las partículas de material carbonizado a un sistema lacustre, se depositan en el fondo del lago y entran a formar parte de los sedimentos. Dentro del lago existen procesos de mezcla de sedimentos que pueden afectar la forma en que se sedimentan las partículas y los “picos” de carbón que se observen en los núcleos sedimentarios pueden ser reflejo de incendios con condiciones muy distintas entre sí (Whitlock, 2001). Otras características importantes en la depositación son la batimetría del lago, el tamaño del mismo y su profundidad, en la medida que éstas determinan la existencia de zonas de acumulación de partículas de carbón. De hecho, se ha observado que en lagos grandes o profundos ocurren procesos de recirculación y mezcla de sedimentos más marcados que en lagos pequeños (Gardner, 2001).

1.1.3 Formas de estudiar el material carbonizado lacustre

La mayoría de los estudios basados en partículas de material carbonizado provienen de sedimentos lacustres, sin embargo es posible utilizar sedimentos de abanicos aluviales y coluviales, y de suelos en zonas forestales donde hay acumulación de sedimentos (e.g. Long, 2002; McMichael *et al.*, 2012). En el caso de lagos, las partículas de material carbonizado que se analizan dependen de la resolución temporal deseada, pueden estudiarse sedimentos superficiales para relacionarlo con eventos de fuego recientes o décadas atrás, o estudiarse núcleos sedimentarios que nos permiten conocer eventos de fuego ocurridos miles de años atrás (Whitlock, 2001). El análisis de partículas de material sedimentario está basado en cuantificar la acumulación de estas partículas y determinar eventos de fuego en el tiempo. En lagos con altas tasas de sedimentación o con presencia de sedimentos laminados la utilización del material carbonizado puede reflejar información con mejor

resolución temporal que en lagos con bajas tasas de sedimentación (Sadori & Giardini, 2007).

Las partículas microscópicas de material carbonizado se observan y cuantifican a partir de una muestra que ha sido preparada para obtener y visualizar polen. Sin embargo, esta técnica suele causar fragmentación de las partículas de carbón durante la preparación de la muestra, creando una abundancia artificial de partículas microscópicas ($<100\mu\text{m}$) (Whitlock, 2001). Debido a los problemas para conocer si las partículas microscópicas observadas realmente reflejan un incendio cercano al lago muestreado, el trabajo con ellas implica aceptar que las limitaciones tafonómicas son mayores que con las partículas macroscópicas de material carbonizado.

Los estudios que se enfocan en incendios locales utilizan las partículas macroscópicas ($>100\mu\text{m}$) de material carbonizado, las cuales requieren una preparación de muestra diferente que para la obtención de polen. En este caso, el principal objetivo de los métodos es evitar la fragmentación de las partículas durante el procesamiento y separarlas de las arcillas lo mejor posible (Whitlock, 2001). El resultado es el conteo y clasificación por tamaños, de las partículas carbonizadas por volumen de muestra, generalmente a partir de 1 cm^3 , dato que es la base de la mayoría de los análisis. El conteo de las partículas de material carbonizado se facilita utilizando métodos que incorporan el análisis de fotografías tomadas a las partículas de carbón, que permite conocer su área (MacDonald, 1991), como se propone en este trabajo.

1.2 Antecedentes

El uso de las partículas de material carbonizado como principal indicador de incendios pasados ha sido muy importante para conocer acerca de los regímenes de incendios a lo largo del tiempo en el planeta (Power *et al.*, 2008; Power *et al.*, 2010). Sin embargo, a la fecha no se cuenta con estudios enfocados en la descripción y calibración de la señal de material carbonizado de sedimentos lacustres en México, siendo las referencias principales de este estudio las calibraciones a partir de incendios en bosques en Estados Unidos (Gardner, 2001; Whitlock, 2001; Renssen *et al.*, 2009), Canadá (Lynch, 2004) y Siberia (Clark, 1998). Para otros tipos de vegetación hay un estudio que revisa la asociación de

partículas de material carbonizados con incendios alrededor de lagos en sabanas de África (Duffin *et al.*, 2008), donde se encontró que los tamaños de las partículas que reflejaron mejor los eventos de fuego fueron de menor tamaño que los reportados en trabajos con bosques como tipo de vegetación predominante. Siendo este último uno de los trabajos que muestra que en un tipo de vegetación distinto a los bosques, donde se han llevado a cabo la mayoría de los estudios de calibración, las características de la relación entre el material carbonizado y los incendios detectados cambia.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

El objetivo principal de esta tesis es conocer la relación de las partículas de material carbonizado preservadas en sedimentos lacustres modernos en el centro y sur de México con los incendios ocurridos alrededor de los cuerpos de agua.

Los objetivos particulares son los siguientes:

- 1) Conocer la cantidad y distribución de tamaño de partículas del material carbonizado presente en sedimentos superficiales en lagos de México.
- 2) Determinar la cantidad y distribución espacial de los incendios ocurridos alrededor de cada lago muestreado para material carbonizado, con base en imágenes satelitales en los cinco años anteriores al muestreo sedimentario en cada sitio.
- 3) Determinar los tamaños de partícula de material carbonizado que explican mejor los incendios.
- 4) Explorar las relaciones existentes entre el material carbonizado en términos de su abundancia y distribución de tamaños con los incendios ocurridos alrededor de los cuerpos de agua.
- 5) Definir las variables ambientales más importantes que median la relación material carbonizado-incendios, de manera que se generen herramientas de interpretación cuantitativas que puedan ser aplicadas en secuencias sedimentarias para la reconstrucción ambiental.

Las hipótesis asociadas a este estudio son:

- 1) Debido a que el material carbonizado depositado en los sedimentos lacustres se compone de la señal de fondo o carbón primario y el carbón secundario (Whitlock, 2001), se espera encontrar presencia de partículas de carbón en todos los lagos muestreados.

- 2) El umbral de tamaño de partículas de material carbonizado que brinde información de incendios será distinto para cada zona de estudio (centro y sur de México), tomando en cuenta sus diferencias ambientales.
- 3) La forma en que las partículas de material carbonizado reflejarán los incendios ocurridos a su alrededor en el lapso de tiempo estudiado será distinta según el tiempo en que ocurrieron los incendios y su distancia al lago.
- 4) Considerando las diferencias entre los resultados de calibraciones en bosques (Whitlock, 2001) y sabanas (Duffin *et al.*, 2008), se espera que la vegetación presente en los sitios de estudio afecte la señal de material carbonizado presente en los lagos, de tal forma que permitirá explicar mejor su relación con los incendios.

3. SITIOS DE ESTUDIO

El presente estudio comprende dos regiones: el centro de México donde se muestrearon 21 lagos de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM); y el sur de México, que incluye la Península de Yucatán (PY), montañas adyacentes de Chiapas, Guatemala y Belice, donde se muestrearon 51 cuerpos de agua. A continuación se describen algunos detalles de estas dos áreas de trabajo (Figura 3.1). En el Anexo 1 se encuentran los detalles de localización y variables ambientales determinadas de todos los sitios incluidos.

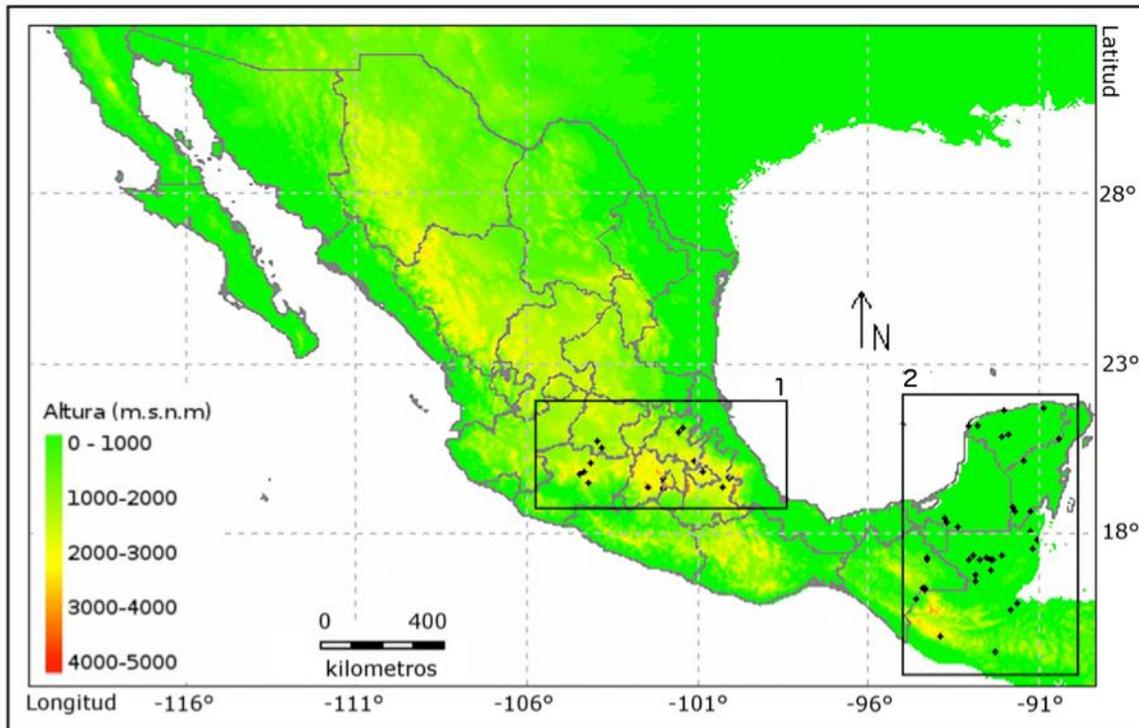


Figura 3.1. Mapa altitudinal de las regiones de estudio. 1: FVTM, donde se muestrearon 21 lagos, 2: PY y alrededores, se trabajó con cuerpos de agua, lagos principalmente, en la Península de Yucatán, Chiapas, Belice y Guatemala, 51 cuerpos de agua en esta zona se muestrearon. Los puntos negros representan sitios muestreados.

3.1. Centro de México

Los lagos en la zona central de México se ubican entre los 22° y 16° de Latitud N, 105° y 94° de Longitud, en los estados de Jalisco, Hidalgo, Veracruz, Michoacán, México, Puebla, Distrito Federal y Tlaxcala. Los lagos muestreados se encuentran dentro de la Región Fisiográfica de la Faja Volcánica Transmexicana (Figuras 3.1 y 3.2), una región reconocida

como centro de diversificación, endemismo y transición biogeográfica para una gran variedad de taxa (Gámez *et al.*, 2012).

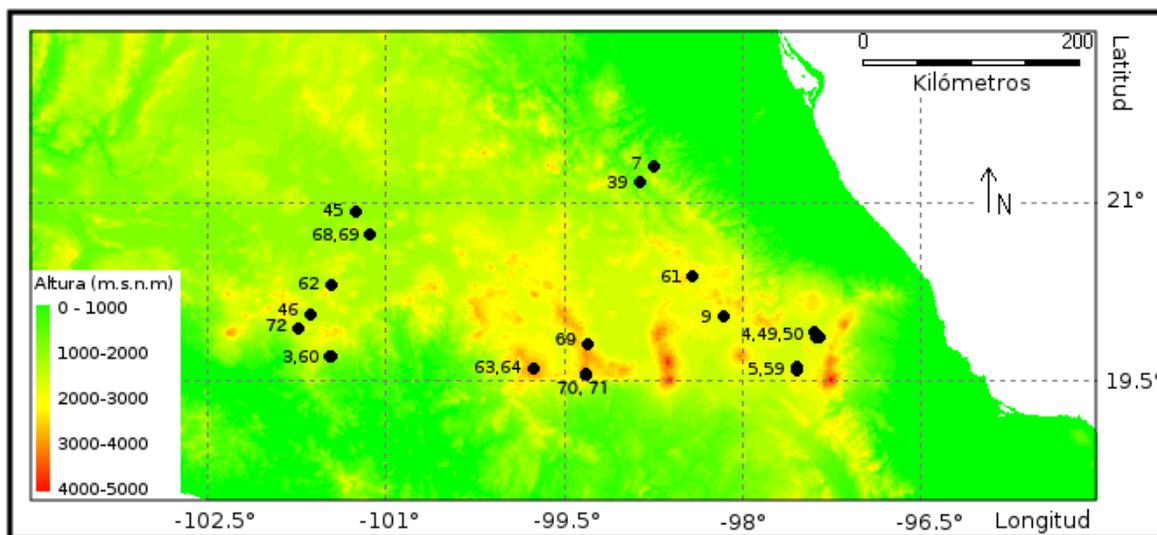


Figura 3.2 Mapa altitudinal de lagos muestreados en la FVTM. Los lagos son: 3) Alberca, 4) Alchichica, 5) Aljojuca, 7) Atezca, 9) Atlangatepec, 39) Metztlán, 45) Parangueo, 46) Pátzcuaro, 49) Preciosa, 50) Quechulac, 59) San Miguel Tecuitlapa, 60) Tacámbaro, 61) Tecocomulco, 62) Teremendo, 63) Toluca Luna, 64) Toluca Sol, 68) Yuriria, 69) Quila, 70) Tonatihua, 71) Zempoala, 72) Zirahuén.

Fisiografía. La fisiografía del centro de México, en la FVTM, consiste en una serie de planicies escalonadas, dispuestas desde las costas del Pacífico de Nayarit, hasta el Atlántico en Veracruz, las cuales están desmembradas por volcanes de todos tipos: maares, conos de escoria (cineríticos), volcanes de escudo y grandes compuestos aislados (estratovolcanes) y en conjuntos (Velasco, 2007). La FVTM cuenta con cerca de 8,000 estructuras volcánicas, cuya actividad ha dado lugar a un gran número de cuencas endorreicas que permitieron el desarrollo de numerosos lagos (Morán-Zenteno, 1984). Las cordilleras volcánicas de esta región tienen alturas de los 900 a 5,000 m y entre los principales volcanes se encuentran el Pico de Orizaba, el Popocatepetl, el Iztaccíhuatl, el Nevado de Toluca y el Nevado de Colima (Vidal-Zepeda, 2005).

Geología. La FVTM cuenta con una faja de volcanes aún en actividad, que se ha formado durante los últimos 19 millones de años. Cuatro grandes episodios de vulcanismo

afectaron de manera asincrónica el territorio, primero en el oeste, y tardíamente en el este. Sin embargo, los episodios más prominentes se produjeron en los últimos 3 millones de años (Gómez *et al.*, 2012). El episodio 1 consistió en la instauración de un arco de composición intermedia entre el Mioceno medio y tardío. El episodio 2 es un episodio máfico del Mioceno tardío, mientras el episodio 3 es silíceo de finales del Mioceno y llegó a ser bimodal en el Plioceno temprano. Finalmente, el episodio 4 estuvo definido por la reinstauración de un arco con gran variabilidad composicional a partir del Plioceno tardío (Gomez-Tuena, 2005).

Climatología. Está influida por diferencias en la altitud de los sistemas montañosos en la FVTM, los climas van de cálidos a fríos, según la altitud (Figura 3.2). La zona se encuentra dominada por los vientos alisios del noreste, mismos que se ven modulados por el relieve (Vidal-Zepeda, 2005).

Precipitación (Figura 3.3). El relieve juega un papel muy importante en la distribución de la humedad. Hay contrastes muy marcados de humedad entre los valles y las partes altas de las montañas, entre unas laderas y otras según su orientación, siendo las que se inclinan al noreste las más expuestas a la humedad (Vidal-Zepeda, 2005). En algunos lugares del estado de Hidalgo, como el Valle de Ixmiquilpan, los llanos de Apan y los llanos de San Juan se reportan menos de 400 mm de lluvia al año. En las laderas orientadas a la Altiplanicie de las Sierras de Zacatecas y Guanajuato sólo se acumulan 600 mm de lluvia al año. Las partes menos montañosas de los estados de Querétaro, Guanajuato, Aguascalientes y Jalisco, conocidas en su conjunto como El Bajío reportan 800-1000 mm de lluvia. En el Ajusco y la Sierra Nevada se registran 1200 mm al año (Vidal-Zepeda, 2005), sin embargo, en las laderas de la Sierra Negra, en Puebla y Zacapoaxtla se llegan a recibir hasta 4,500 mm de lluvia al año (Hernández, 2007).

Temperatura (Figura 3.3.). En las zonas de menor altitud, hacia el oeste, la temperatura media anual es mayor a 22°C, consideradas zonas cálidas. Hacia los 2,000 m de altura la temperatura media anual es entre 18 y 22°C, una condición semicálida que predomina en la región.

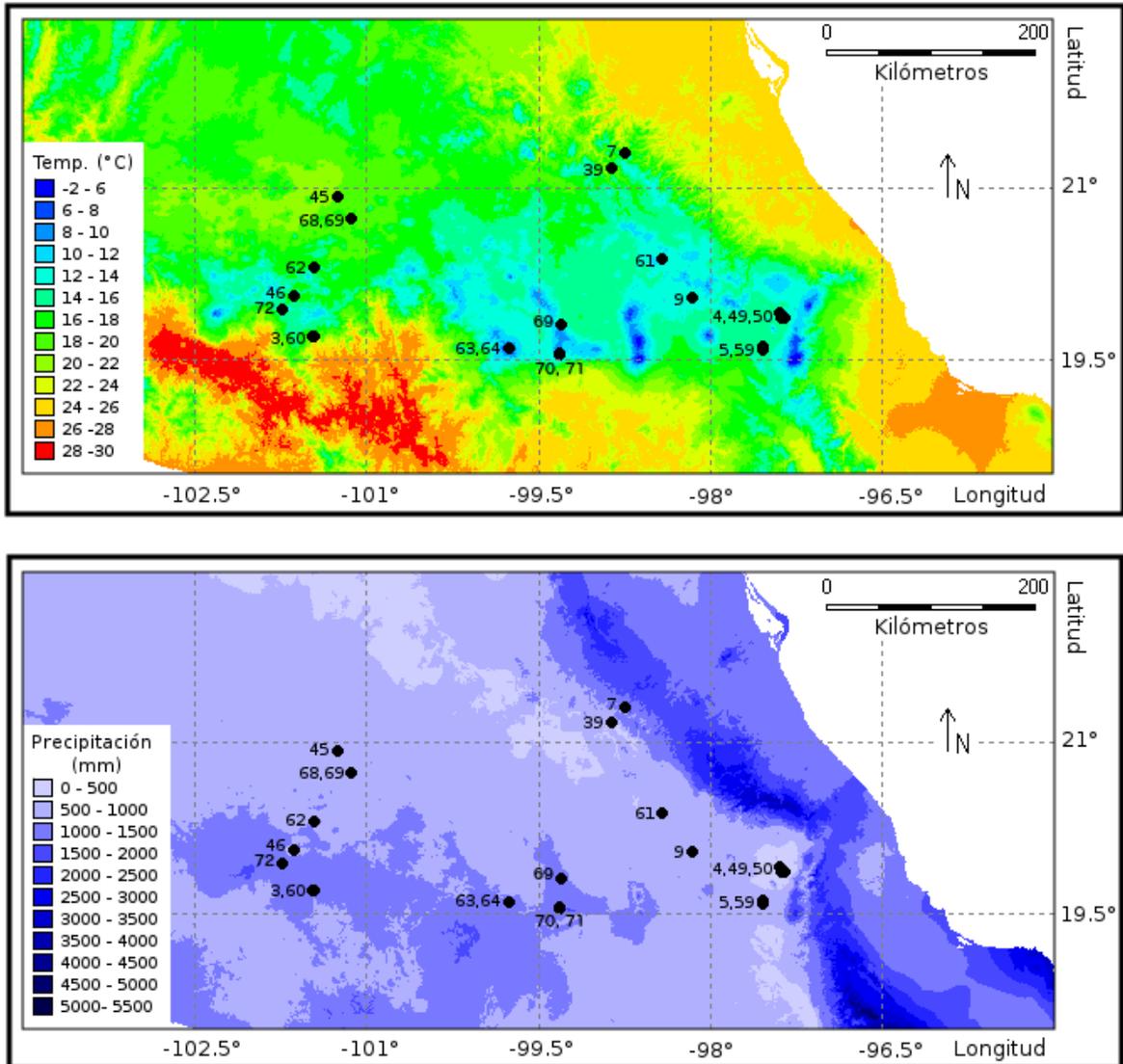


Figura 3.3 Mapas climáticos con los lagos muestreados en la FVTM. *Arriba:* Precipitación Total Anual, *Abajo:* Temperatura Media Anual, los lagos son: 3) Alberca, 4) Alchichica, 5) Aljojuca, 7) Atezca, 9) Atlangatepec, 39) Metztlán, 45) Parangueo, 46) Pátzcuaro, 49) Preciosa, 50) Quechulac, 59) San Miguel Tecuitlapa, 60) Tacámbaro, 61) Tecocomulco, 62) Teremendo, 63) Toluca Luna, 64) Toluca Sol, 68) Yuriria, 69) Quila, 70) Tonatihua, 71) Zempoala, 72) Zirahuén.

Entre 2,000 y 2,800 m la temperatura es templada entre 12 y 18°C. De 2,800 a 4,000 metros de altitud la temperatura media anual disminuye hasta 12°C, una temperatura semifría que está presente en el Ajusco o el Nevado de Toluca. Las temperaturas frías entre -2 y 5 °C se encuentran en los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Nevado de Toluca y Malinche, los cuales tienen alturas entre 4,000 y 5,000 m, límites a partir de los cuales la

temperatura media anual se sitúa en los -2°C , constituyendo nieves perpetuas. Sin embargo, estas condiciones se alcanzan sólo en la cúspide del Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba (Vidal-Zepeda, 2005).

Climas. De acuerdo a la carta de climas de México (García, 1998), en la FVTM están representados los climas cálidos húmedos y subhúmedos (A), climas semicálidos húmedos y subhúmedos A(C), climas secos (B), climas templados húmedos y subhúmedos (C), climas semifríos húmedos y subhúmedos (Cb), climas fríos de altura (E(T)H), y climas muy fríos de altura (E(F)H) (Hernández, 2007). Los climas húmedos se localizan en el lado del Golfo de México sobre las pendientes montañosas y la llanura costera que se encuentran directamente expuestas a los vientos húmedos del mar, asociados con los vientos alisios, los “nortes”, y las ondas, depresiones, tormentas, y los ciclones tropicales.

Los climas húmedos con lluvias abundantes durante todo el año se encuentran en las partes bajas del declive oriental de las Sierras de Zacapoaxtla, Teziutlán y Negra. Los climas húmedos con lluvias en verano se localizan sobre las laderas de las sierras de Zacapoaxtla, Teziutlán y Negra, así como en la Sierra de Apatzingán en Michoacán. Los climas subhúmedos, aquellos donde la cantidad de lluvia anual no es suficiente para mantener el suelo húmedo todo el año, se extienden a todo lo largo de la FVTM con diferentes grados de humedad siendo predominantes en la zona. Los climas secos, donde la evaporación excede la precipitación, se ubican en zonas de transición a los climas subhúmedos y en la zona de estudio hay de dos tipos, áridos y semiáridos. Estos climas se registran en zonas pequeñas entre Veracruz y Puebla, en las inmediaciones de Perote, al sur de Santiago Zautla en Puebla y en Hidalgo en la cuenca alta del río Amajac y en Ixmiquilpan. Los climas semifríos se localizan en las laderas altas de las sierras y/o volcanes, como en la Sierra Negra, la Malinche, la Sierra Nevada, cerro las Cruces, el Nevado de Toluca, el Nevado de Colima y Aranguero. Los climas fríos se presentan en las cima de altas montañas, como el Pico de Orizaba, Cofre de Perote, Malinche, Nevado de Toluca y Nevado de Colima.

Hidrología. En cuanto a la hidrología, la FVTM se encuentra entre varias regiones hidrográficas importantes, al norte la cuenca del Medio y Alto Lerma y la Cuenca del Valle

de México, y al sur la Cuenca del Alto y Medio Balsas (Priego, 2007), siendo los ríos más importantes el Río Grande de Morelia, Río Lerma, Río Tula, Río Amajaque, Río Calabozo y Río Nexapa (Maderey-R, 1990). En esta región de estudio se encuentran los lagos principales de México según su área y volumen de almacenamiento, es el caso de los lagos: Cuitzeo (306 km²), Pátzcuaro (97 km²) y Yuriria (75 km²) (CNA, 2012). Debido a la naturaleza volcánica de la región, algunos de los lagos son de tipo cráter, como Alberca (3), Alchichica (4), Aljojuca (5), Paranguero (45), Preciosa (49), Quechulac (50), San Miguel Tecuitlapa (59), Toluca Luna (63) y Toluca Sol (64).

Edafología. En la FVTM los principales grupos de suelos, en base al mapa escala 1:1000000 de INEGI, adaptados a la clasificación de la FAO-ISRIC-ISSS (1998), son: Pheozems (29.9%), Vertizoles (15.4%), Regosoles (14.1%), Cambisoles (8.5%), Andosoles (7.8%), Leptosoles (7.7%), Luvisoles (6.4%), Planosoles (2.5%), Calcisoles (2.5%), Acrisoles (2.2%), Xerosoles (1.8%), Solonchaks y Solonetz (0.7%), Kastanozems (0.2%), Fluvisoles (0.2%), Chernozems (0.05%), y Gleysoles en áreas de menor extensión (García-Calderón, 2007).

Ecosistemas principales. Los principales tipos de vegetación en la FVTM son los bosques de pino y encino que ocupan 11,617 km², Selva baja caducifolia con 11,298 km², Pastizal inducido en un área de 10,156 km², y Bosque de encino que abarca 9,687 km² (Suárez-Mota, 2013). Se reconoce también como una región florística con una riqueza excepcional de algunos grupos de plantas, como el caso del género *Sedum*, el género *Quercus*, del que se han registrado 75 especies dentro de los estados que conforman la FVTM, que representan el 46% del total de especies reportadas en México (Suárez-Mota, 2013).

La mayoría de las especies de pinos mexicanas es afín a climas templados a fríos y semihúmedos, así como a suelos ácidos. Sin embargo, en estas zonas compiten con los bosques de *Quercus* y en ocasiones con *Abies*, *Juniperus* y *Alnus*, esta similitud entre los nichos ecológicos de las comunidades vegetales da como resultado bosques mixtos (Rzedowski, 2006). Los bosques de encino o *Quercus*, son característicos de las zonas

montañosas del país, que junto con los pinares constituyen la mayor parte de la cubierta vegetal de zonas de clima templado y semihúmedo. Con frecuencia la franja de encinos se ubica a niveles altitudinalmente inferiores a los pinos. Los encinares son bosques con árboles de hojas generalmente persistentes pero su composición varía en especies según el lugar y condiciones ecológicas, pues en México existen alrededor de 250 especies de *Quercus* (Rzedowski, 2006).

La selva baja caducifolia es una selva de menos de 15 m. de altura media de los árboles altos que pierden casi completamente las hojas en la época seca y no suelen ser espinosos, en este tipo de vegetación abundan las especies del género *Bursera* (Miranda & Hernández, 1963). En cuanto a su estructura, lo más frecuente es que haya un solo estrato arbóreo, el estrato arbustivo varía mucho de un sitio a otro (Rzedowski, 2006).

Los pastizales son conformados principalmente por gramíneas, pueden ser pastizales primarios o secundarios. Los primeros suelen desarrollarse en serranías y sobre suelos profundos derivados de rocas ígneas. Los segundos suelen ser consecuencia del sobrepastoreo o presencia de incendios en bosques de *Pinus* y *Quercus* (Miranda & Hernández, 1963). La intervención humana suele extender la presencia de gramíneas a costa de otros tipos de vegetación, a favor de la agricultura. Los pastizales están sujetos al aprovechamiento pecuario, pues resultan adecuados para la alimentación del ganado bovino y equino (Rzedowski, 2006).

3.2. Península de Yucatán y alrededores

El grupo de cuerpos de agua estudiados en esta región se encuentran entre los 22° y 14° Latitud N, y 92° y 87° Longitud W. Dentro de esta localización se halla la Península de Yucatán, que como región fisiográfica incluye parte de Belice y Guatemala (Beltrán, 1959) (Figura 3.1 y 3.4). En esta zona la mayoría de los cuerpos de agua analizados son lagos, pero se incluyen muestras de sedimento de los ríos Ixlú (31) y Caldelaria (12), de Cenotes: Cenote Timul (15) y San Francisco Kana (56), de cuerpos de agua costeros: Rosada (51) y Celestún (14), y de humedales: Loché (37) y Belice (11).

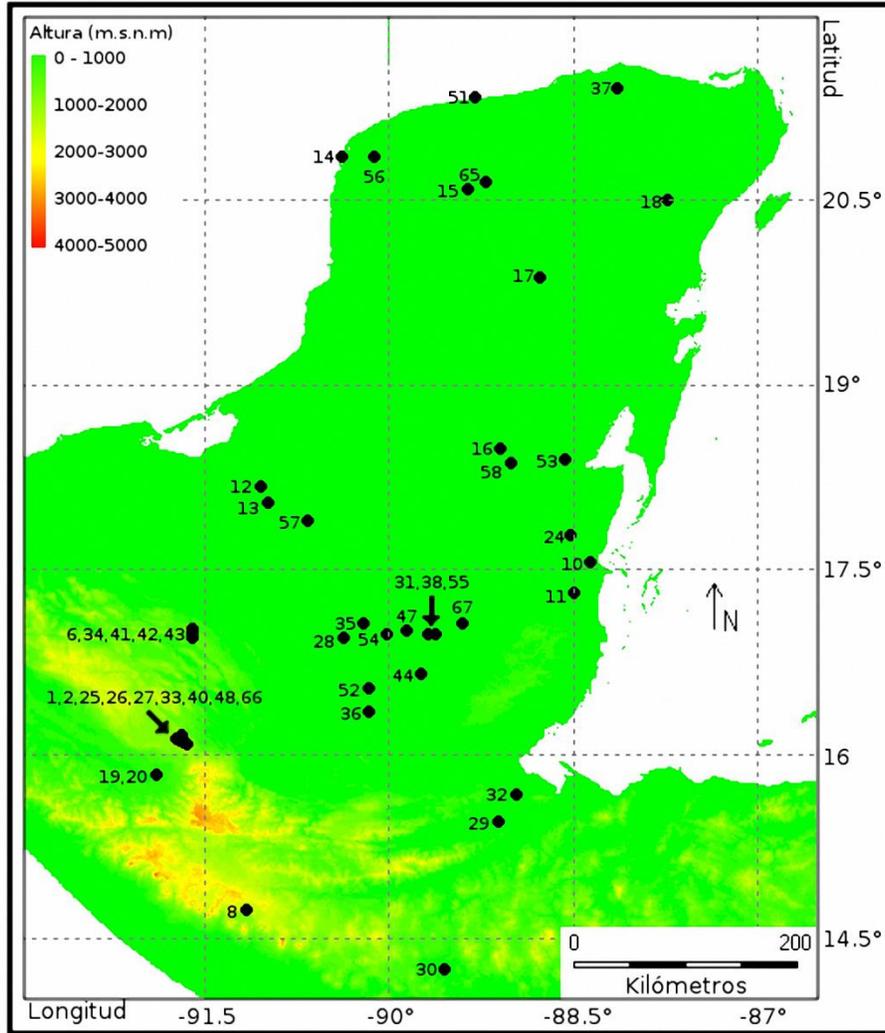


Figura 3.4 Mapa altitudinal de cuerpos de agua muestreados en la PY y alrededores.
Lagos: 1) 5-Lagos-S, 2) 5-Lagos-B, 6) Amarillo, 8) Atitlán, 10) Bacab, 13) Cayucón, 16) Chacan-Lara, 17) Chichancanab, 18) Cobá, 19) Colon lake1, 20) Colon lake2, 21) Colon lake3, 22) Colon lake4, 23) Colon lake5, 24) Croked_Tree, 25) Escondido, 26) Esmeralda, 27) Gemelas, 28) Gloria, 29) Golfete, 30) Güija, 32) Izabal, 33) Kichayil, 34) Lacandón, 35) Laguna Perdida, 36) Las Pozas, 38) Macanché, 40) Montebello, 41) Na ha Atrás, 42) Na ha Canal, 43) Ocotitalito, 44) Oquevix, 47) Petén Itzá, 48) Pojoj, 52) Rosario, 53) Sabanita, 54) Sacpuy, 55) Salpetén, 57) San Francisco Mateos, 58) San José Aguilar, 65) Yalahau, 66) Yalaluch, 67) Yaxhá. **Ríos:** 12) Candelaria, 31) Ixlú. **Cenotes:** 15) Cenote Timul, 56) San Francisco Kaná. **Lagunas costeras:** 14) Celestún, 51) Rosada. **Humedales:** 11) Belice, 37) Loché.

Fisiografía. Con escaso relieve, se puede decir que la Península de Yucatán es una gran losa caliza, cuyas mayores altitudes no llegan a los 400 msnm (Vidal-Zepeda, 2005). Hacia el centro de la Península se encuentra la meseta baja tectónica de Zohlaguna, que

constituye el área más elevada y se extiende en dirección norte-sur en el límite de Campeche y Quintana Roo. Esta elevación máxima se encuentra cerca de la población de Zohlaguna, con poco más de 300 msnm de altitud y desciende al este y al oeste por escalones bruscos.

Hacia el noroeste se observa una altitud media de 40 a 60 m que se extiende al oeste hasta la costa. Al norte, el terreno vuelve a elevarse un poco hasta el borde de la Sierra Ticul, en el sur del estado de Yucatán y noreste del de Campeche, la cual constituye un declive relativamente brusco y escalonado hacia las planicies de la Península. Su borde superior tiene una altura que oscila entre 100 y 170 msnm, aunque se han señalado altitudes de hasta 250 m (Vidal-Zepeda, 2005).

La mayor parte de la Península es una planicie cárstica con una topografía muy irregular en donde se encuentran los cenotes o dolinas. En general, las costas tienen poco relieve, con un litoral bajo y arenoso, conchífero o rocoso, con plataforma continental de gran extensión en el Golfo de México. En el Mar de las Antillas, es fundamentalmente rocoso pero bajo, con playas arenosas intercaladas y plataforma corta (Beltrán, 1959).

Esta región incluye zonas montañosas en el sur de Chiapas y tierras altas del sur de Guatemala, las cuales se formaron sobre una zona de subducción, y descienden en inmensas llanuras hacia la Península de Yucatán (Marshall, 2006). La zona cárstica de Belice cubre alrededor de 5,000 km², aproximadamente el 22% de la superficie del país (Day, 1996).

Geología. Desde el punto de vista geológico, la Península consiste en una plataforma con potentes estratos, principalmente de rocas carbonatadas. En la superficie éstas son reconocidas en una clara secuencia que va desde el Paleógeno hasta el Cuaternario (Lopez-Ramos, 1973). Debido a que carece de una red fluvial, el escurrimiento es casi totalmente subterráneo, lo que ha dado origen a un gran sistema de formas cársticas, que incluye los cenotes, poljes y sistemas de cuevas. Dichos sistemas llegan a los cientos de metros de profundidad y decenas de kilómetros de longitud. La plataforma de rocas sedimentarias mesozoicas y cenozoicas presenta un grosor de más de 3,500 m, descansando sobre un basamento paleozoico. Sobre esto se inicia la columna de rocas jurásicas, reconocidas en el

subsuelo profundo de la porción centro-septentrional de Belice (Lugo-Hupb *et al.*, 1992). El Cretácico forma parte de toda la plataforma, en especial con la formación llamada Evaporitas de Yucatán. La secuencia de rocas paleogénicas se encuentra en todo el subsuelo y consiste principalmente en caliza, arenisca y evaporita del Paleoceno y el Eoceno. El Oligoceno está ausente, excepto en la parte nororiental (caliza y lutita), donde se reconoce a los depósitos marinos del Neógeno y las calizas de la Formación Carrillo Puerto, durante el Mioceno, fueron depositados los sedimentos calcáreos de la Formación Río Dulce, en el oriente, actual Estado de Quintana Roo (Lugo-Hupb *et al.*, 1992).

Climatología. El clima de la Península de Yucatán y sus alrededores es controlado principalmente por los patrones atmosféricos inducidos por la migración de la Zona de Convergencia Intertropical Atlántico (ITCZ por sus siglas en inglés) (Wilson, 1980). Por su localización dominan durante todo el año sobre la región los vientos alisios, con una fuerte componente del este, predominando la dirección este-sureste.

Precipitación (Figura 3.5). El patrón de precipitación de la Península sigue un gradiente de condiciones muy secas a condiciones húmedas en la dirección norte a sur. La porción suroeste de la península constituye la región más lluviosa con precipitaciones de entre 1200 y 1500 mm anuales (Lopez-Ramos, 1973).

Una gran parte de la lluvia que se presenta sobre la región es de tipo convectivo, con máximos en mayo o junio, que son los meses de más alta temperatura, durante el verano y parte del otoño, los ciclones tropicales ocasionan las precipitaciones más importantes en una franja que se extiende de noreste a suroeste, desde Cancún hasta la base de la Península (Vidal-Zepeda, 2005). La precipitación decrece hacia el norte, hasta unos 450 mm en el litoral, ya que ahí los vientos dominantes durante el verano soplan paralelos a la costa y producen un efecto de corriente en chorro que obliga a los vientos continentales a converger hacia ella.

La temporada de lluvias bien definida abarca de octubre a mayo, el mes más lluvioso es septiembre, con precipitación alrededor de 200 mm, señalando la influencia ciclónica. La

temporada seca va de noviembre a abril, siendo los meses más secos febrero, marzo y abril (Vidal-Zepeda, 2005).

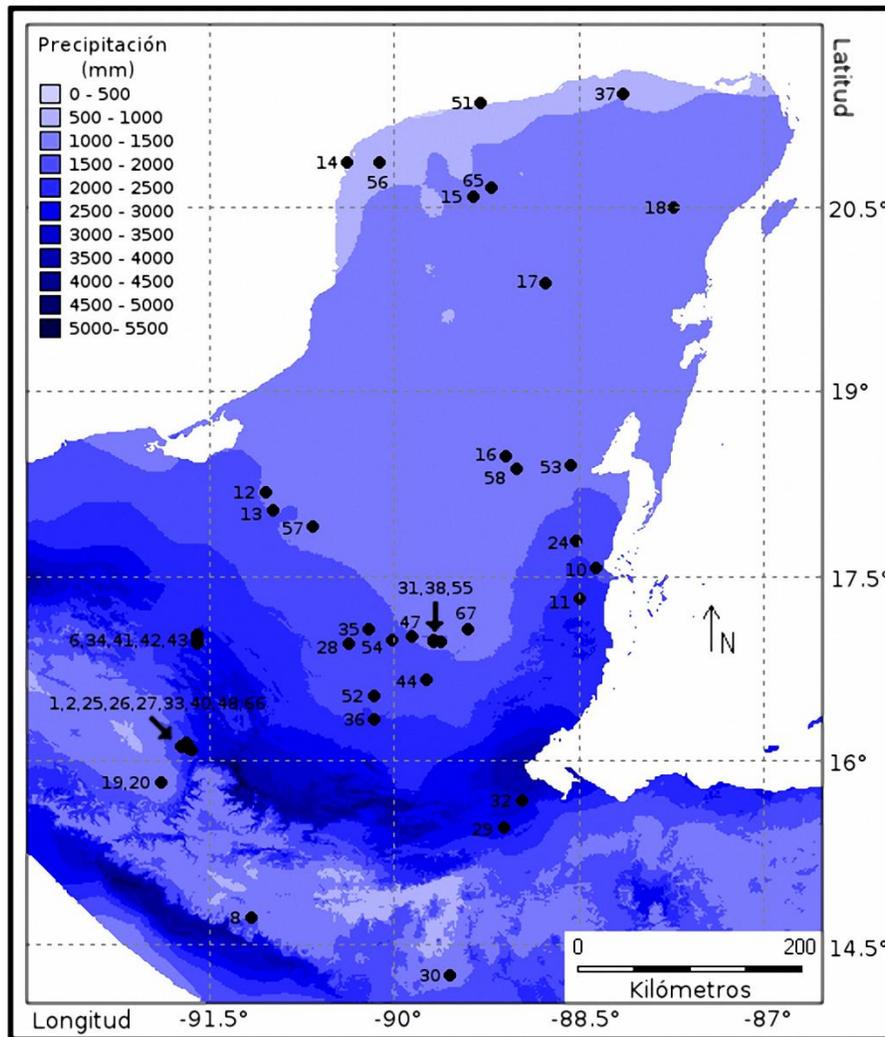


Figura 3.5. Mapa de precipitación media anual de cuerpos de agua muestreados en la PY y alrededores. **Lagos:** 1) 5-Lagos-S, 2) 5-Lagos-B, 6) Amarillo, 8) Atitlán, 10) Bacab, 13) Cayucón, 16) Chacan-Lara, 17) Chichancanab, 18) Cobá, 19) Colon lake1, 20) Colon lake2, 21) Colon lake3, 22) Colon lake4, 23) Colon lake5, 24) Croked_Tree, 25) Escondido, 26) Esmeralda, 27) Gemelas, 28) Gloria, 29) Golfete, 30) Güija, 32) Izabal, 33) Kichayil, 34) Lacandón, 35) Laguna Perdida, 36) Las Pozas, 38) Macanché, 40) Montebello, 41) Na ha Atrás, 42) Na ha Canal, 43) Ocotolito, 44) Oquevix, 47) Petén Itzá, 48) Pojoj, 52) Rosario, 53) Sabanita, 54) Sacpuy, 55) Salpetén, 57) San Francisco Mateos, 58) San José Aguilar, 65) Yalahau, 66) Yalaluch, 67) Yaxhá. **Ríos:** 12) Candelaria, 31) Ixlú. **Cenotes:** 15) Cenote Timul, 56) San Francisco Kaná. **Lagunas costeras:** 14) Celestún, 51) Rosada. **Humedales:** 11) Belice, 37) Loché.

Temperatura (Figura 3.6). Por su posición tropical, la insolación que se recibe en la península es bastante elevada y uniforme a lo largo del año, por lo que no se diferencian las estaciones en términos de la temperatura, la temperatura anual promedio es de 26°C, los meses más frescos son diciembre, enero y febrero con temperaturas menores de 22°C (Vidal-Zepeda, 2005).

Climas. La Península de Yucatán se caracteriza por un marcado gradiente barométrico desde las zonas de altas presiones del Atlántico hacia las de bajas presiones en el interior de la misma. Se presentan masas de aire cargadas que no precipitan de manera frontal al no existir elevaciones orográficas de importancia, generando condiciones secas en las partes más distales de la Península. Los climas predominantes en la península de Yucatán son de Norte a Sur, clima seco muy cálido en la zona costera (BS0), le sigue una franja horizontal de clima semiseco muy cálido (BS1). La mayor parte de la Península de Yucatán y hacia Belice predominan los climas semisecos cálidos y muy cálidos (Aw0 y Aw1) (García, 1998). La zona montañosa de Guatemala los climas que predominan son templados y cálidos húmedos, siendo las zonas más altas frías (Melgar, 2003).

Hidrología. Las aguas superficiales de importancia que existen en la región son las de los ríos Candelaria, Champotón y Hondo. En el resto de la región los arroyos corrientes son intermitentes y normalmente descargan en sumideros que funcionan cuando tienen suficiente carga hidráulica. Alrededor del Río Candelaria existe el sistema lagunar más importante del Golfo de México, constituido por la Laguna de Términos y otras que la circundan como son las de Pom-Atasta, Sitio Viejo, Panlao, Puerto Rico, El Vapor, y San Francisco. La causa principal de que haya pocas corrientes superficiales es el relieve y la naturaleza del suelo, principalmente calcáreo, que favorece la infiltración (CNA, 1997). Al sur de la Península de Yucatán, en Chiapas, corren los ríos Grijalva-Usumacinta, ambos ríos tienen 1,521 km de longitud, son reconocidos como una Región Hidrológica que abarca 83,553 km² con 83 cuencas hidrológicas (CNA, 2012).

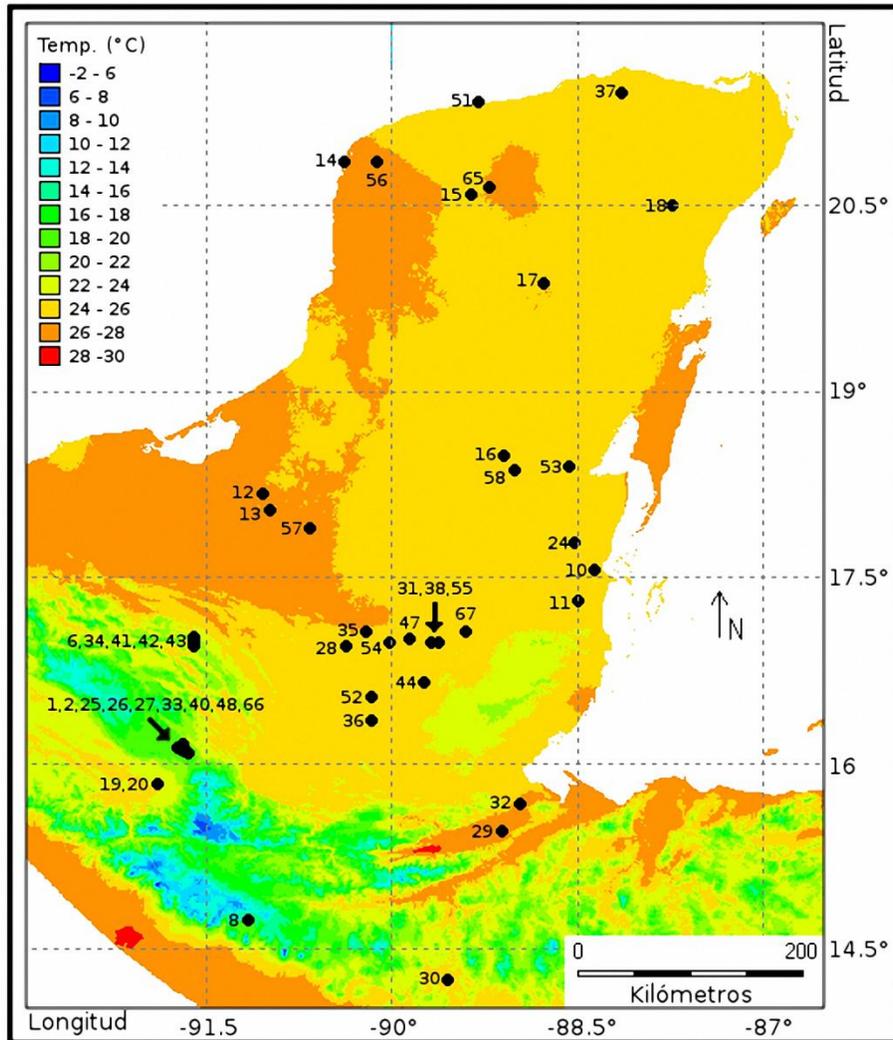


Figura 3.6. Mapa de temperatura media anual de cuerpos de agua muestreados en la PY y alrededores. **Lagos:** 1) 5-Lagos-S, 2) 5-Lagos-B, 6) Amarillo, 8) Atitlán, 10) Bacab, 13) Cayucón, 16) Chacan-Lara, 17) Chichancanab, 18) Cobá, 19) Colon lake1, 20) Colon lake2, 21) Colon lake3, 22) Colon lake4, 23) Colon lake5, 24) Croked_Tree, 25) Escondido, 26) Esmeralda, 27) Gemelas, 28) Gloria, 29) Golfete, 30) Güija, 32) Izabal, 33) Kichayil, 34) Lacandón, 35) Laguna Perdida, 36) Las Pozas, 38) Macanché, 40) Montebello, 41) Na ha Atrás, 42) Na ha Canal, 43) Ocotalito, 44) Oquevix, 47) Petén Itzá, 48) Pojoj, 52) Rosario, 53) Sabanita, 54) Sacpuy, 55) Salpetén, 57) San Francisco Mateos, 58) San José Aguilar, 65) Yalahau, 66) Yalaluch, 67) Yaxhá. **Ríos:** 12) Candelaria, 31) Ixlú. **Cenotes:** 15) Cenote Timul, 56) San Francisco Kaná. **Lagunas costeras:** 14) Celestún, 51) Rosada. **Humedales:** 11) Belice, 37) Loché.

Edafología. Los suelos de mayor extensión en la Península de Yucatán son las Rendzinas y los Litosoles 67% en zonas cársticas. En las zonas costeras hay Gleysoles (15.5%), en las planicies cársticas se encuentran Luviosoles (4.44%), Vertisoles (3.02%) al sur y al noreste, Solonchak en la zonas costeras, Regosol e Histosol en el litoral y planicies costeras principalmente. En la península de Yucatán hay suelos de escasa importancia agrícola como los de Litosol, Rendzina, Solochak, Gleysol, Regosol, Histosol y Solonetz, con excepción de los dos primeros, se encuentran en zonas de gran interés ecológico y ambiental, como los petenes, manglares y planicies costeras (Bautista *et al.*, 2005).

Ecosistemas principales. En esta zona de estudio encontramos bosque tropical caducifolio, bosque tropical subcaducifolio, bosque tropical perennifolio y zonas con matorrales espinosos (Wilson, 1980; Rzedowski, 2006).

El bosque tropical perennifolio es una categoría que incluye a las selvas altas y medianas perennifolias y subperennifolias. En la Península de Yucatán hay algunas porciones, en el noreste de Chiapas a la “Selva Lacandona”, y la “selva del ocote” en la región limítrofe de Chiapas, Oaxaca y Veracruz. Se encuentran más frecuentemente sobre rocas calizas, en paisajes kársticos de drenaje rápido y suelos someros, toleran el anegamiento y prosperan sobre laderas, pero se desarrollan mejor en terrenos planos (Rzedowski, 2006). El bosque tropical caducifolio está dominado por especies arborescentes que pierden sus hojas en la época seca del año durante un lapso de tiempo variable, generalmente por seis meses. También se conoce como selva baja caducifolia (Miranda & Hernández, 1963). Este tipo de vegetación tiene un componente endémico importante, estimado en 25% a nivel de género y 40% a nivel de especie (Rzedowski, 1998).

El bosque tropical subcaducifolio es un tipo de vegetación que agrupa comunidades vegetales con características intermedias en su fisonomía y en sus requerimientos climáticos entre el bosque tropical perennifolio y el bosque tropical caducifolio, por lo general se distinguen dos estratos arbóreos y un estrato arbustivo, que suele desarrollarse más al presentarse disturbios (Rzedowski, 2006). En la Península de Yucatán el árbol más común en este tipo de vegetación es *Vitexgaumeri* (Miranda & Hernández, 1963).

Los matorrales espinosos o xerófilos presentan su distribución más amplia hacia el norte del país, donde cubren vastas extensiones de suelos someros. Los representantes más meridionales de los matorrales se encuentran en Chiapas y la frontera con Guatemala, siendo comunidades arbustivas densas, más o menos caducifolias, con predominante reproducción vegetativa (Rzedowski, 2006).

4. MÉTODOS

Para conocer cómo se relacionan las partículas de material carbonizado con los incendios, así como la influencia del medio ambiente en esta relación, se utilizaron diversas metodologías y fuentes de información, las cuales se describen a continuación.

4.1. Partículas de material carbonizado

Trabajo en campo. Se realizaron muestreos sedimentarios en 21 lagos del centro de México, localizados en la FVTM (Figura 3.2) y 51 cuerpos de agua en la PY y alrededores (Figura 3.4). Las muestras de sedimento moderno se tomaron de la interfaz agua-sedimento en la zona más profunda de cada sitio, utilizando una draga Ekman (Figura 4.1). Paralelamente a las muestras de carbón se colectaron muestras para el análisis de bioindicadores como ostrácodos, cladóceros, copépodos, quironómidos, diatomeas y polen (Pérez *et al.*, 2010; Correa-Metrio *et al.*, 2011; Pérez *et al.*, 2013). Los sitios de muestreo se designaron en base a la representatividad de los gradientes climáticos, como la precipitación media anual, la temperatura y el número de días con lluvia al año, así como la presencia de cuerpos de agua aptos para el muestreo. Para muestrear sedimento moderno se consideró que los cuerpos de agua tuvieran un radio mínimo de 10 metros, con poco flujo de agua, que estuvieran rodeados de vegetación con relativamente pocos disturbios, y presencia permanente de agua a lo largo del año.

Trabajo de laboratorio. El trabajo en el laboratorio tuvo como objetivo principal deflocular las muestras de sedimento para facilitar la separación manual de las partículas de material carbonizado con el uso de microscopio estereoscópico (Olympus SZX12), evitando la fractura de las partículas (Figura 4.1). En cada sitio se utilizó un centímetro cúbico de sedimento.

Cálculo del área de las partículas de material carbonizado. Las partículas de carbón separadas se fotografiaron y las imágenes se procesaron con el Software de libre distribución **ImageJ 1.47a** (Rasband, 2005), el cual distingue las partículas de material

carbonizado de entre otras partículas (restos de plantas, restos de pequeños insectos, minerales, etc.) en base al contraste, el material carbonizado es de color negro y pocos materiales igualan el tono del mismo. El software se calibró de acuerdo a los aumentos utilizados en el microscopio estereoscópico para poder calcular el área de las partículas en mm^2 . Se buscó separar el carbón del resto de materiales en la muestra y fotografiar varias partículas juntas. Se obtuvo el área de cada partícula identificada y se sumaron las áreas de todas las partículas en la muestra para obtener el valor total de partículas de carbón por cuerpos de agua (Weng, 2005).



Se obtuvo 1cm^3 de sedimento moderno de 72 cuerpos de agua en total.



El sedimento se colocó en frascos con una solución de Pirofosfato de Sodio al 10% ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) y reposaron durante 48 horas en refrigeración.

La mezcla se trasladó a tubos de ensayo para ser calentada durante 20 minutos a 98°C .

Se tamizó la mezcla usando una malla de 25 micras de apertura, se separó manualmente la mayor cantidad posible de arcillas y se desecharon.

Figura 4.1 Muestreo de sedimentos y procesamiento de muestras en el laboratorio. *Arriba:* Fotografía del muestreo en un lago. *Abajo:* Diagrama de flujo de la metodología para el análisis de las muestras de carbón en laboratorio. El objetivo del tratamiento es eliminar la mayor cantidad de arcillas de la muestra de sedimento evitando la fragmentación de las partículas de material carbonizado.

4.2. Datos de incendios

Se utilizaron datos de puntos de calor que infieren observaciones de incendios del sistema Fire Information for Resource Management System (FIRMS), que son datos procesados por el sistema Land, Atmosphere Near Real-Time Capability for EOS (LANCE).

Earth Observing System (EOS) es un conjunto de datos terrestres captados por los satélites Terra (EOS AM) y Aqua (EOS PM) de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), los cuales utilizan el sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) que es un instrumento que capta información de 36 bandas espectrales con longitudes de onda que van de los $0.4\mu\text{m}$ a $14.4\mu\text{m}$. El sistema LANCE permite obtener información satelital en tiempos muy cercanos al momento del incendio, disponible para los usuarios en 3 horas o menos a partir de la observación. (NASA-FIRMS, 2012).

4.2.1. Satélites

El satélite Terra (EOS AM) fue lanzado el 18 de Diciembre de 1999 y las observaciones de alta calidad de puntos de calor iniciaron en noviembre del año 2000. Considerando que la muestra más antigua de los cuerpos de agua incluidos en este trabajo se tomó en noviembre de 2005, se consideró utilizar sólo los datos de incendios de cinco años anteriores a la fecha del muestreo en cada sitio para tener mínimo cinco años de información en todos los sitios, y sólo aquellos que ocurrieron dentro de un radio de 15 km alrededor de los cuerpos de agua pues el mayor interés de este trabajo se centra en eventos de fuego locales. Las fechas de muestreo de cada sitio se encuentran en el Anexo 2.

La órbita del satélite Terra va de norte a sur a y pasa por el ecuador a las 10:30 am hora local, de ahí el término AM. En zonas tropicales, las nubes se forman típicamente en horas la tarde, pues se calienta la superficie y crea corrientes de aire. Así, las imágenes de Terra de la mañana son imágenes más claras de la Tierra. El satélite Aqua (EOS PM) se lanzó el 4 de Mayo de 2002 y las observaciones de alta calidad de puntos de calor que infieren observaciones de fuego comenzaron en Julio del mismo año. Su órbita pasa de sur a norte por el ecuador en la tarde, de ahí el PM en su nombre, y complementa la información del satélite Terra y amplía la resolución temporal de MODIS. Combinando la órbita de ambos satélites se obtiene información global cada 1 o 2 días del sensor MODIS.

Estos satélites son de órbita polar, tienen un rango de ± 55 grados de búsqueda de patrones y orbitan la Tierra una vez cada 99 minutos con una inclinación de 98 grados con respecto al ecuador, a una altitud media de 438 millas náuticas (705 kilómetros).

Detección de incendios. MODIS detecta incendios activos representando el centro de un cuadrado (pixel) de aproximadamente de 1km como *punto de calor*. Estas detecciones son procesadas usando el mismo algoritmo que el estándar de fuego y MODIS MOD14/MYD14 de producto de anomalías térmicas.

La detección de incendios se realiza mediante un algoritmo contextual que aprovecha la fuerte emisión de la radiación infrarroja de los incendios. Sin embargo, MODIS no detecta el tamaño exacto del fuego, de manera que cada pixel puede contener más de un incendio pequeño o si es un incendio grande puede estar representado por varios pixeles cercanos que indican presencia de fuego (Figura 4.2).

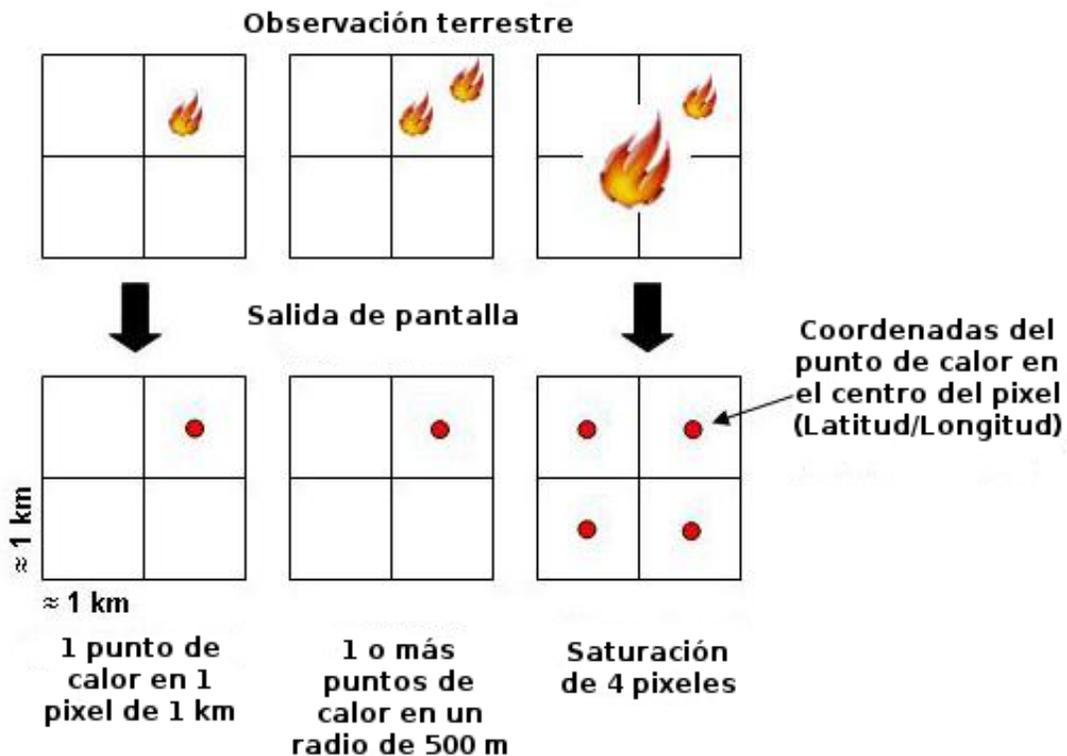


Figura 4.2 Esquema de la identificación de incendios por percepción remota. Se muestra como se relacionan los puntos de calor que perciben los sensores satelitales y los incendios ocurridos en tierra. Modificado de NASA-FIRMS (2012).

Tampoco es posible saber qué tipo de fuego es detectado, en la mayoría de los casos se trata de incendios forestales, pero en ocasiones puede ser una erupción volcánica o un incendio derivado de actividades humanas (quema de petróleo, incendio de inmuebles, etc.).

4.2.2. Características de los datos

La información de incendios que puede obtenerse de FIRMS tiene los siguientes atributos:

- 1) **Latitud y Longitud:** La ubicación central del pixel de 1km (aproximadamente) que está marcado como incendio.
- 2) **Brillo:** El brillo de la temperatura, medida en grados Kelvin, usando los canales 21/22 y 31 del sensor MODIS. Es una medida de los fotones a una determinada longitud de onda que recibe el satélite, pero se presenta en unidades de temperatura.
- 3) **Escáner y Trayectoria:** Indica la resolución espacial real del pixel escaneado. El algoritmo de MODIS funciona a una resolución de 1 km aproximadamente, pero los pixeles aumentan de tamaño hacia el borde de la exploración.
- 4) **Fecha:** Fecha en que se captó el pixel que indica presencia de incendio.
- 5) **Hora:** La hora de paso del satélite, en UTC.
- 6) **Satélite:** Indica que satélite captó la señal de fuego, Terra (T) o Aqua (A).
- 7) **Confianza:** Indica la calidad de la señal de fuego captada. Este dato es útil para ayudar a que los usuarios evalúen la calidad de la información presentada por los pixeles que indican incendios, este valor oscila entre 0 y 100%.
- 8) **Versión:** Se refiere al tipo de procesamiento y la fuente de los datos.
- 9) **Canal T31:** Brillo de la temperatura en el canal 31 de MODIS, medido en grados Kelvin.
- 10) **FRP: *Fire Radiative Power*,** Representa la integración de los pixeles que indican incendios en Mega Watts (MW). Proporciona información sobre el calor irradiado del incendio, se cree que este dato está relacionado con la velocidad de combustible que consume el incendio detectado.

4.3. Datos ambientales

Se revisó el mapa de Uso de Suelo y Vegetación, escala 1:1 000000 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para determinar el tipo de vegetación que rodea cada lago (INEGI, 1994). Con base en el tipo o tipos de vegetación que se encontraban alrededor de los lagos se les asignó una categoría: Conservado (C), para los lagos que presentaran de 80% a 100% un mismo tipo de vegetación, Medianamente Conservado (MC), para los lagos con un 60% a 80% del tipo de vegetación predominante, y Poco Conservado (PC) si el tipo de vegetación predominante era menor al 60% o se encontrara en un área de agricultura. Esto para generar una variable categórica que permitiera conocer el grado de “Homogeneidad” de la vegetación que rodea los cuerpos de agua.

Los datos de altitud (m.s.n.m.), precipitación media anual (mm) y temperatura media anual (°C) para cada cuerpo de agua, se obtuvieron de WorldClim: www.worldclim.com (Hijmans *et al.*, 2005) y con el software de libre distribución **DIVA-GIS**v.7.5 se elaboraron los mapas correspondientes a cada zona de estudio.

4.4. Procesamiento estadístico.

Se elaboraron gráficas de barras de tres tipos, 1) el número de partículas de material carbonizado por sitio considerando el tamaño de las mismas 2) gráficas de cajas Tukey con los datos de área en mm^2 de partículas de material carbonizado por sitio tomando en cuenta el tipo de vegetación que rodeaba los cuerpos de agua, y 3) se graficó el número de incendios por año para cada sitio. De esta forma es posible observar la presencia de partículas de material carbonizado y los incendios ocurridos en una sola Figura.

Se describen a continuación las variables utilizadas en este trabajo:

1) Variables estadísticas de las partículas de material carbonizado por lago:

- Media.
- Mediana.
- Desviación estándar.
- Simetría. Grado en que la distribución de las partículas de material carbonizado se “inclinan” hacia un lado u otro de la media, para todos los

valores de simetría calculados se realizó la prueba para evaluar la significancia de la asimetría (Zar, 1999; Sheskin, 2003).

- Curtosis. Medida que provee información de la altura de la distribución en relación a la desviación estándar, también se calculó la significancia (Zar, 1999; Sheskin, 2003).
- Número de partículas de material carbonizado en cada clase de tamaño según la tabla siguiente:

Tabla 1. Clases de tamaño de partículas de material carbonizado. Se muestran los tamaños en área que se utilizaron en este trabajo y la longitud del diámetro aproximado que representan.

Área (mm ²)	Longitud del lado mayor aproximado (µm)
<0.0064	Partículas menores a 80 µm de lado.
0.0064 a 0.05	Partículas de 80-225 µm de lado.
0.05 a 0.25	Partículas de 225-500 µm de lado.
>0.25	Macropartículas de carbón, mayores a 500 µm de lado.

La primera clase de tamaño (<0.0064mm²) se estableció porque corresponde con la mayoría de los estudios que usan partículas de material carbonizado microscópicas (<80µm) como indicador de incendios regionales. A partir de la segunda clase de tamaño (0.064-0.05 mm²), corresponde a las partículas macroscópicas que se relacionan con incendios locales.

3) Información de incendios alrededor de los cuerpos de agua:

- Incendios hasta un año anterior a la toma de muestra de sedimento en segmentos de 1-15 kilómetros alrededor de cada lago en incrementos de 1 km.
- Incendios hasta dos años anteriores a la toma de muestra de sedimento en segmentos de 1-15 kilómetros alrededor de cada lago en incrementos de 1 km.
- Incendios hasta tres años anteriores a la toma de muestra de sedimento en segmentos de 1-15 kilómetros alrededor de cada lago en incrementos de 1 km.

- Incendios hasta cuatro años anteriores a la toma de muestra de sedimento en segmentos de 1-15 kilómetros alrededor de cada lago en incrementos de 1 km.
- Incendios hasta cinco años anteriores a la toma de muestra de sedimento en segmentos de 1-15 kilómetros alrededor de cada lago en incrementos de 1 km.

Por ejemplo, la muestra de sedimento de Chichancanab (17), la más antigua de todo el conjunto de muestras, se colectó el 13/12/2005. Los datos de incendios identificados con imágenes satelitales cinco años antes del muestreo corresponden a incendios entre 13/12/2000 y 13/12/2005. Los incendios se dividieron en clases, según el año anterior a la toma de muestra. Para este sitio el Año 1 abarca eventos de fuego de 13/12/2004 a 2005. El año 2 incendios entre el 13/12 2003 a 2004, y así sucesivamente. Las fechas de colecta de sedimentos para cada sitio se encuentran en el Anexo 2.

3) Variables ambientales:

- Tipo de vegetación alrededor del lago.
- Homogeneidad: El porcentaje que ocupa el tipo de vegetación predominante alrededor del lago, discretizado en las clases C, MC o PC.
- Precipitación media anual (mm).
- Temperatura media anual (°C).
- Altitud (m.s.n.m.).

Con las variables anteriores se generó una base de datos con la cual se realizó el procesamiento estadístico utilizando el software de libre distribución **R** (R Core Team, 2013).

Para conocer el umbral de tamaño de las partículas de material carbonizado que indican ocurrencia de incendios de aquellas que pertenecen a la señal de fondo, se utilizó el paquete **mixtools** (Benaglia *et al.*, 2009; Young *et al.*, 2014). Este paquete permite, basado en los datos, parametrizar las dos distribuciones Gaussianas que en teoría caracterizan a las partículas de material carbonizado de una muestra en particular (Higuera *et al.*, 2010): una para el ruido y la otra para el fuego. Además de los parámetros para cada distribución

Gaussiana (media: μ y desviación estandar: σ^2), se identificó la proporción que cada una de ellas debería aportar al modelo Gaussiano de mezcla finita (GMM, por sus siglas en inglés) que describe el comportamiento de la totalidad de los datos (λ^1 y λ^2) para la distribución de ruido y de señal respectivamente, de manera que suman 1) (Bolker, 2008). Finalmente, λ^1 es usado para identificar en el modelo el cuantil a partir del cual las partículas representan incendios.

Se ajustaron regresiones lineales para conocer el grado en que el material carbonizado es explicado por la ocurrencia de eventos de fuego cercanos a los lagos. Primero se estudió la relación entre el material carbonizado y los incendios ocurridos a lo largo de 5 años, 15 km alrededor de cada lago por zona de estudio (FVTM y PY), y se graficó el valor de R^2 y la significancia expresada como *p-value* según la distancia del lago al incendio. Después, para conocer de forma más específica la respuesta del material carbonizado a los incendios, se realizó la regresión lineal separando las partículas de carbón en las clases de tamaño antes descritas junto con los incendios según el año en que ocurrieron, y se graficó el valor de R^2 con la significancia.

Con el objeto de evaluar el grado de variabilidad en los datos y la influencia de otras variables como mediadoras de la relación del material carbonizado-incendios se hizo un Análisis de Factores Múltiple (AFM) (Escofier, 1994; Becue-Bertaut, 2008) utilizando el paquete **FactoMineR** (Husson *et al.*, 2013). Los grupos de variables utilizados fueron: 1) Variables de las partículas de material carbonizado, 2) Variables de incendios, 3) Variables de vegetación y 4) Variables climáticas. Este análisis es correlativo y permite conocer el grado de asociación entre las variables, permitiendo la mezcla de variables continuas y categóricas. Para visualizar mejor las relaciones entre variables, este análisis generó los siguientes gráficos:

- Grupos de variables: La forma en que se ubican los grupos de variables utilizadas en un plano que refleja su variabilidad.
- Ejes parciales: Permite conocer los ejes estandarizados de los Análisis de Componentes Principales (ACP) que el AFM realiza a cada grupo de variables (Legendre & Legendre, 1998).
- Circulo de correlación: Muestra la correlación entre variables cuantitativas.

- Mapa de Factores individuales: Brinda información de la posición de los cuerpos de agua en relación a las variables categóricas. En este caso se muestra también el grado de conservación (C, MC, PC) de la vegetación.

A partir de la información del AFM se realizó un Análisis de Redundancia Parcial (ARP) (Legendre & Legendre, 1998) utilizando el paquete **Vegan** (Oksanen *et al.*, 2009). El análisis es una ordenación canónica parcial que es el equivalente multivariado a una regresión lineal. Así, permite conocer cuáles variables explican mejor la distribución de las partículas de material carbonizado. En este caso, se trabajó la siguiente hipótesis estadística:

- Hipótesis de trabajo: La vegetación (V) y el clima (C) son factores que influyen en la distribución de partículas de material carbonizado (Pc) en sedimentos lacustres, las cuales son explicadas por los incendios ocurridos en un área de hasta 15 km alrededor de los lagos (I).
- Hipótesis nula, $H_0: Pc \neq f(I|V + C)$
- Hipótesis alternativa, $H_a: Pc = f(I|V + C)$

Se generaron dos gráficas, la primera muestra la correlación entre variables, y la segunda, la forma en que los lagos muestreados se ordenan según los incendios ocurridos. En ambas gráficas las ordenaciones toman en cuenta el ambiente.

5. RESULTADOS

Se contaron y midieron en total 6,501 partículas de material carbonizado en ambas zonas de estudio, centro de México y Península de Yucatán y alrededores, en 72 sitios. Así como 5,004 incendios en total durante cinco años en un diámetro de 15 km alrededor de los cuerpos de agua muestreados. A partir de los datos de material carbonizado y de incendios, más las variables ambientales antes descritas, se presentan los siguientes resultados.

5.1 Partículas de material carbonizado e incendios

En la FVTM se obtuvo una concentración promedio de $4.1 \text{ mm}^2\text{cm}^{-3}$ de material carbonizado por lago, representados en un promedio de 104 partículas. De igual manera, se identificaron 386 incendios en total durante los 5 años que se consideran en este trabajo, para un promedio de 17 incendios por lago, en un radio de 15 km alrededor de los cuerpos de agua (Figura 5.1).

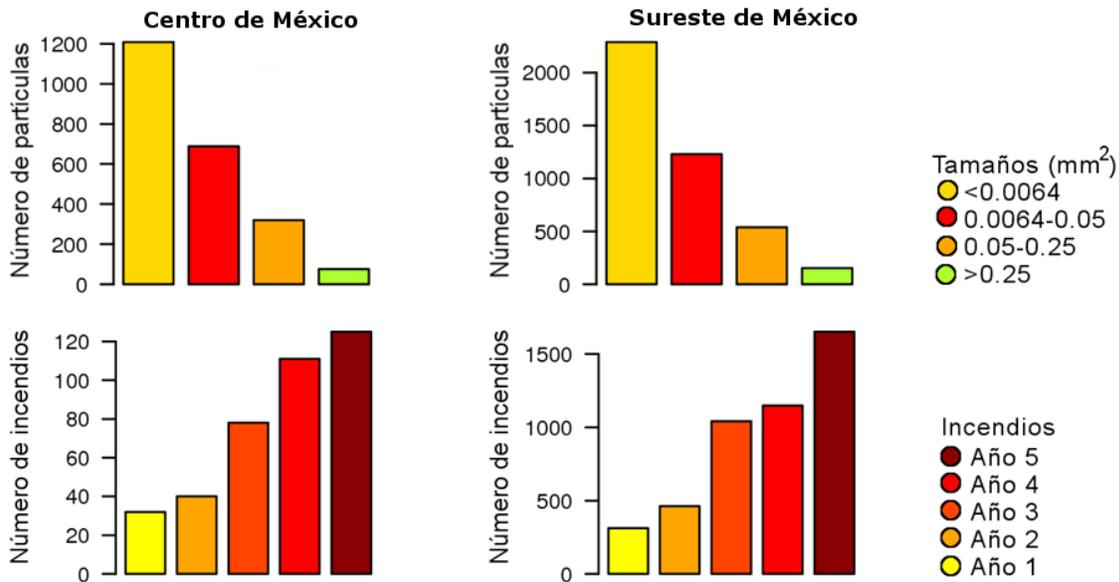


Figura 5.1. Partículas de material carbonizado e incendios cuantificados en los sitios de estudio. Se muestran las partículas de carbón por clase de tamaño y el número de incendios por año en cada zona de estudio.

Los lagos Toluca Luna (63), Toluca Sol (64), localizados en el volcán Nevado de Toluca, Estado de México, así como Atezca (7) y Metztitlán (39) en el estado de Hidalgo,

no tuvieron ningún evento de fuego durante el periodo de tiempo que incluye este trabajo, y sin embargo, presentaron material carbonizado, en su mayoría representado por partículas con un área menor a 0.064mm^2 (Figura 5.2). Los lagos que presentaron mayor cantidad de incendios fueron Tonatihua (70) y Zempoala (71), localizados en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala en el estado de Morelos. Estos lagos mostraron partículas de carbón mayores a 0.25 mm^2 de área, las cuales corresponden a partículas mayores a $500\text{ }\mu\text{m}$ de lado.

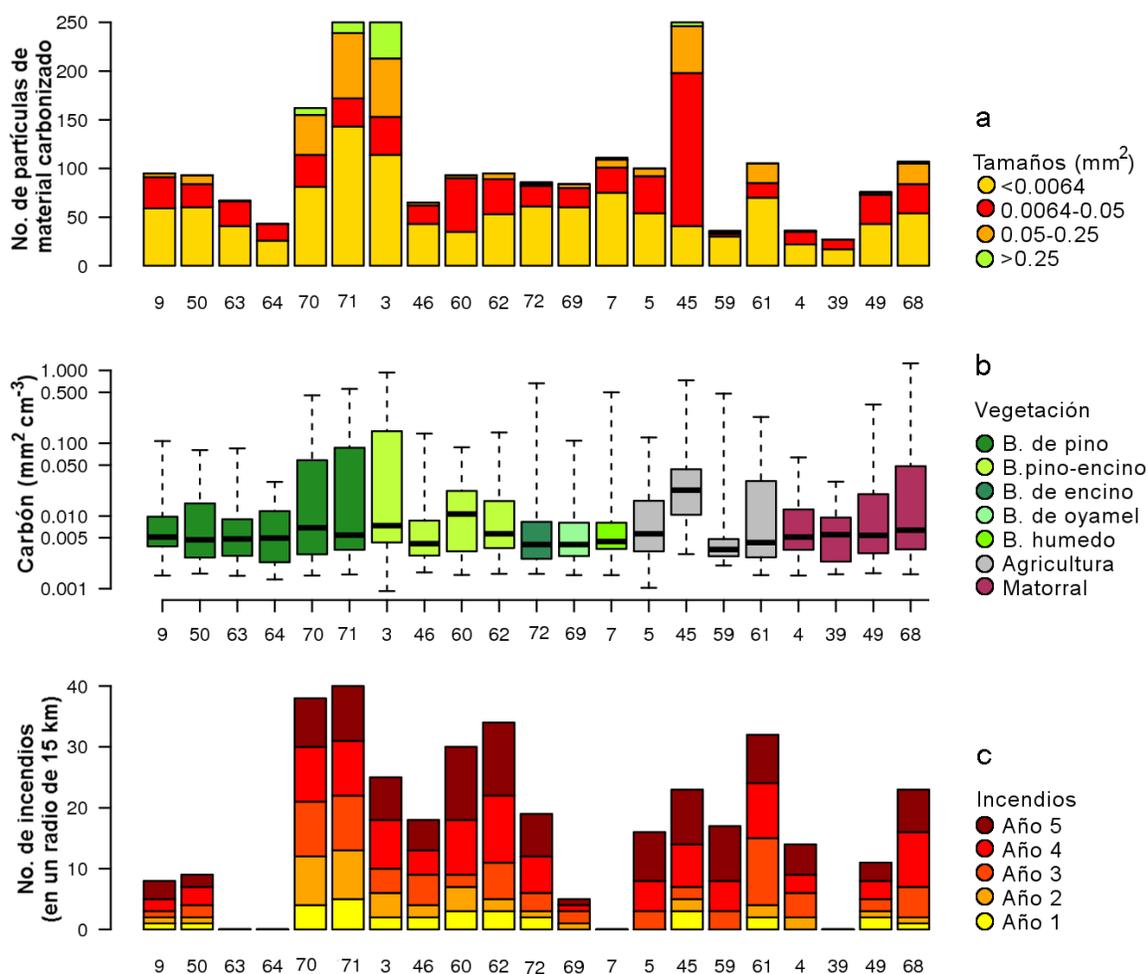


Figura 5.2. Gráficas descriptivas del material carbonizado e incendios en el centro de México, agrupados según el tipo de vegetación que rodea los lagos. Se muestra: **a)** Número de partículas de material carbonizado por lago y clases de tamaño, **b)** Concentración de carbón por lago y tipo de vegetación, **c)** Incendios por lago. Los lagos son: 3) Alberca, 4) Alchichica, 5) Aljojuca, 7) Atezca, 9) Atlangatepec, 39) Metztitlán, 45) Paranguero, 46) Pátzcuaro, 49) Preciosa, 50) Quechulac, 59) San Miguel Tecuitlapa, 60) Tacámbaro, 61) Tecocomulco, 62) Teremendo, 63) Toluca Luna, 64) Toluca Sol, 68) Yuriria, 69) Quila, 70) Tonatihua, 71) Zempoala, 72) Zirahuén.

También es importante mencionar los lagos Alberca (3) en Michoacán y Parangueo (45) en Guanajuato, ya que presentan gran cantidad de partículas de material carbonizado, sobre todo con áreas mayores a 0.0064mm^2 y con un mayor número de incendios detectados en los años 4 y 5 anteriores al muestreo sedimentario.

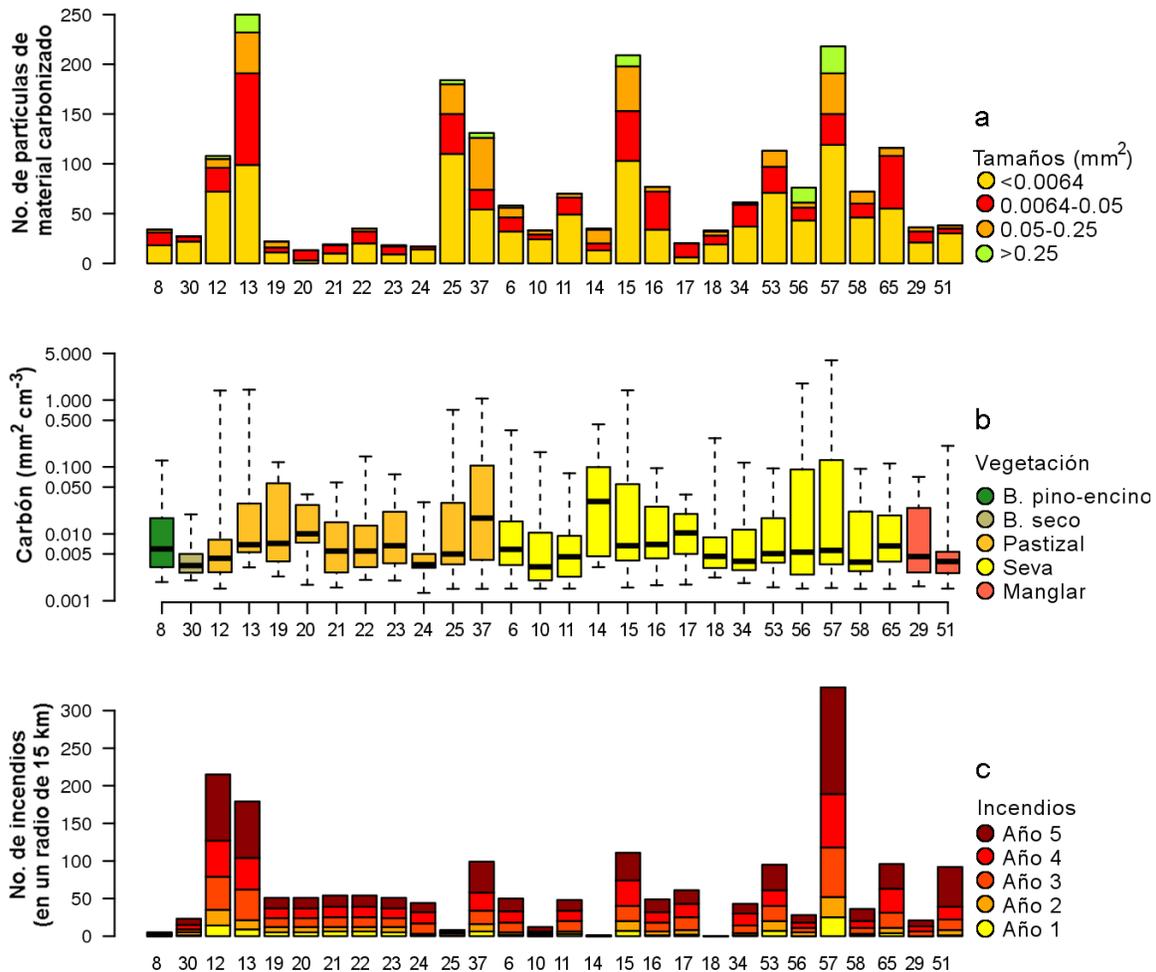


Figura 5.3. Gráficas descriptivas del material carbonizado e incendios en la Península de Yucatán y alrededores, parte 1. Los sitios están agrupados según el tipo de vegetación que los rodea. Se muestra: **a)** Número de partículas de material carbonizado por cuerpo de agua y clases de tamaños, **b)** Concentración de carbón en cada cuerpo de agua y tipo de vegetación, **c)** Incendios por sitio. Los cuerpos de agua son: 8) Atitlán, 30) Güija, 12) Candelaria, 13) Cayucón, 19) Colon lake1, 20) Colon lake2, 21) Colon lake3, 22) Colon lake4, 23) Colon lake5, 24) Crooked_Tree, 25) Escondido, 37) Loché, 6) Amarillo, 10) Bacab, 11) Belice, 14) Celestún, 15) Cenote Timul, 16) Chacan Lara, 17) Chichancanab, 18) Coba, 34) Lacandón, 53) Sabanita, 56) San Francisco Kaná, 57) San Francisco Mateos, 58) San José Aguilar, 29) Golfete, 51) Rosada.

En la PY y sus alrededores se obtuvo un promedio de $3.4 \text{ mm}^2\text{cm}^{-3}$ de material carbonizado por cuerpo de agua, representados en un promedio de 82 partículas. Las imágenes satelitales revelaron 4,618 incendios en total y un promedio de 90 incendios en 5 años en un radio de 15 km alrededor de cada sitio (Figura 5.3).

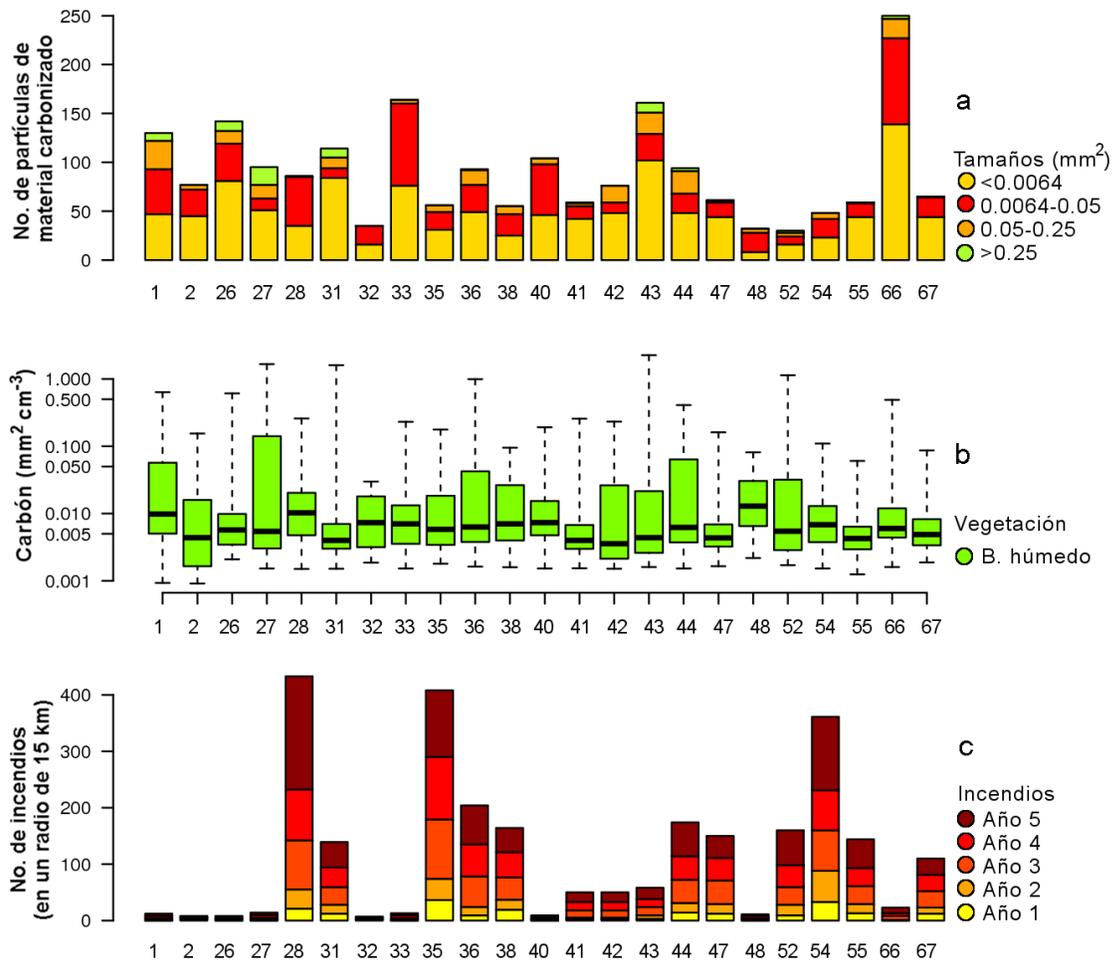


Figura 5.4. Gráficas descriptivas del material carbonizado e incendios en la Península de Yucatán y alrededores, parte 2. Los sitios están agrupados según el tipo de vegetación que los rodea. Se muestra: **a)** Número de partículas de material carbonizado por cuerpo de agua y clases de tamaños, **b)** Concentración de carbón en cada cuerpo de agua y tipo de vegetación, **c)** Incendios por sitio. Los cuerpos de agua son: 8) Atilán, 30) Güija, 12) Candelaria, 13) Cayucón, 19) Colon lake1, 20) Colon lake2, 21) Colon lake3, 22) Colon lake4, 23) Colon lake5, 24) Crooked_Tree, 25) Escondido, 37) Loché, 6) Amarillo, 10) Bacab, 11) Belice, 14) Celestún, 15) Cenote Timul, 16) Chacan Lara, 17) Chichancanab, 18) Cobá, 34) Lacandón, 53) Sabanita, 56) San Francisco Kaná, 57) San Francisco Mateos, 58) San José Aguilar, 29) Golfete, 51) Rosada.

Los lagos Gloria (28), Perdida (35) y Sacpuy (54), todos en el norte de Guatemala, presentan más de 300 incendios durante el periodo de tiempo estudiado. Por su parte, los tamaños de partícula que predominan en las muestras de sedimento de estos lagos son menores a 0.0064 mm^2 de área. Los cuerpos de agua Yalaluch (66), Chiapas, y Cayucón (13), estado de Campeche, presentan un mayor número de partículas de carbón que los demás sitios de esta zona (PY), con presencia de tamaños mayores a 0.0064 mm^2 , no así en el número de incendios cuantificados (Figura 5.3 y 5.4). También en esta región se identificaron cuerpos de agua con material carbonizado pero muy pocos o ningún incendio en los 5 años bajo estudio. Tal fue el caso de Celestún (14), y Cobá (18), ambos en Yucatán, de los lagos 5LagosS (1) y 5LagosB (2), Esmeralda (26) y Gemelas (27), Kichayil (33), Montebello (40) y Pojoj (48) en Chiapas e Izabal (32) en Guatemala (Figura 5.4).

Acerca de la distribución del material carbonizado, todos los lagos en ambas regiones de estudio mostraron distribuciones de tamaño de partículas significativamente asimétricas positivamente (Figura 5.5). Esto es, en la mayoría de las partículas contabilizadas se encuentran rangos de tamaños menores que la media de su distribución. La forma de las distribuciones es significativamente leptocúrtica en todos los lagos, excepto en Chichancanab (17), Colon lake1 (19) y Colon lake2 (20), Golfete (29) e Izabal (32), donde se distribuyeron de forma normal (Figuras 5.3 y 5.4).

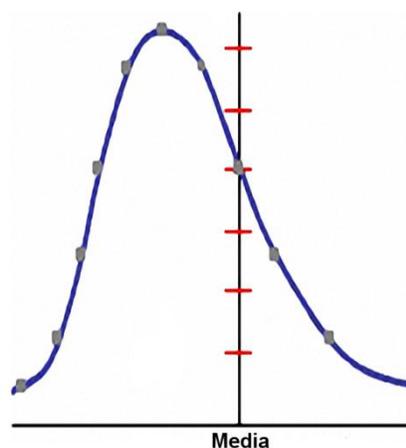


Figura 5.5. Forma general de las distribuciones encontradas en los lagos muestreados. La distribución predominante de las partículas de material carbonizado fue leptocúrtica y con simetría significativamente positiva.

5.2 Señal de fondo y señal de incendios.

Se muestra a continuación de forma gráfica las distribuciones de señal de fondo (cantidad de material carbonizado que no representa incendios) e incendios (cantidad de material carbonizado que representa eventos de fuego) identificadas a partir de las partículas de material carbonizado observadas en cada cuerpo de agua (Figura 5.6 a 5.8).

Los cuerpos de agua con las distribuciones de señal de fondo y señal de incendios mejor diferenciadas en la FVTM fueron Toluca Luna (63), Toluca Sol (64), Alchichica (4) y Metztitlán (39). En la PY y sus alrededores, fueron los lagos Güija (30), Colon_lake2 (20), Colon_lake3 (21), Izabal (32) y Pojoj (48). Los datos con los parámetros calculados para las distribuciones identificadas de todos los cuerpos de agua incluidos en este trabajo se encuentran en el Anexo 3. Se encontró que en lagos rodeados por bosque de pino y encino, presente en ambos sitios de estudio, el umbral de tamaño de partículas de material carbonizado que indican incendios es distinto, siendo mayor en la PY y sus alrededores que en a FVTM (Tabla 2).

Tabla 2. Umbrales de tamaño de partículas de material carbonizado por tipos de vegetación. Se muestra el umbral promedio de tamaño a partir del cual las partículas de carbón corresponden a la señal de incendios.

Vegetación en la FVTM	Umbral (mm ²)	Vegetación en la PY y sus alrededores	Umbral (mm ²)
Bosque de Encino	0.01003	Bosque seco	0.00620
Bosque de pino y encino	0.00682	Bosque de pino y encino	0.00815
Bosque de oyamel	0.01235	Pastizal	0.01298
Bosque húmedo	0.00576	Selva	0.00775
Bosque de pino	0.01298	Manglar	0.00733
Matorral	0.00918	Bosque húmedo	0.00909
Agricultura	0.00725		

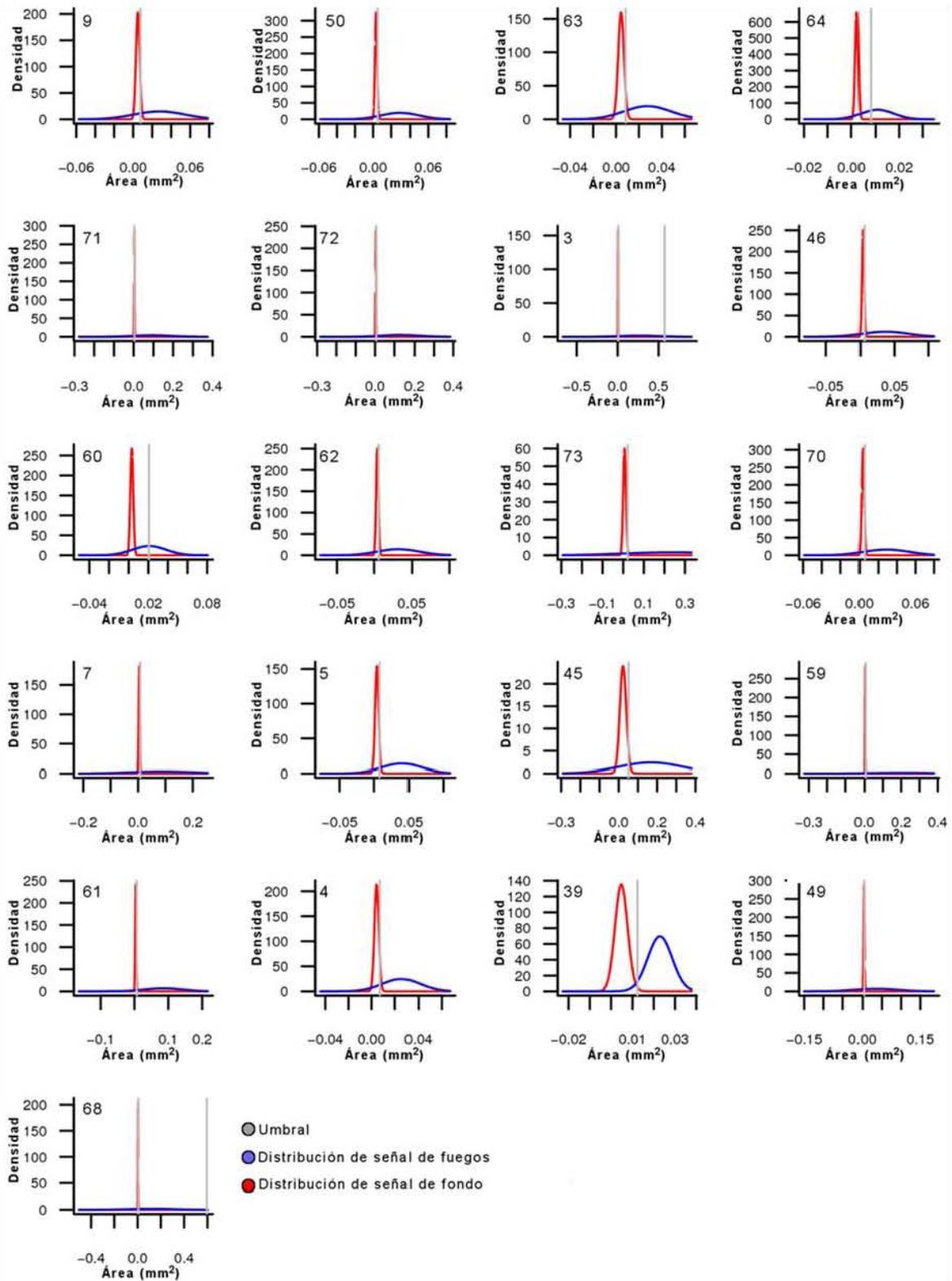


Figura 5.6. Distribuciones de señal de fondo y señal de incendios en lagos de la FVTM. Los números en la parte superior izquierda representan los cuerpos de agua mostrados en la Figura 5.2 que se agruparon según el tipo de vegetación que los rodean.

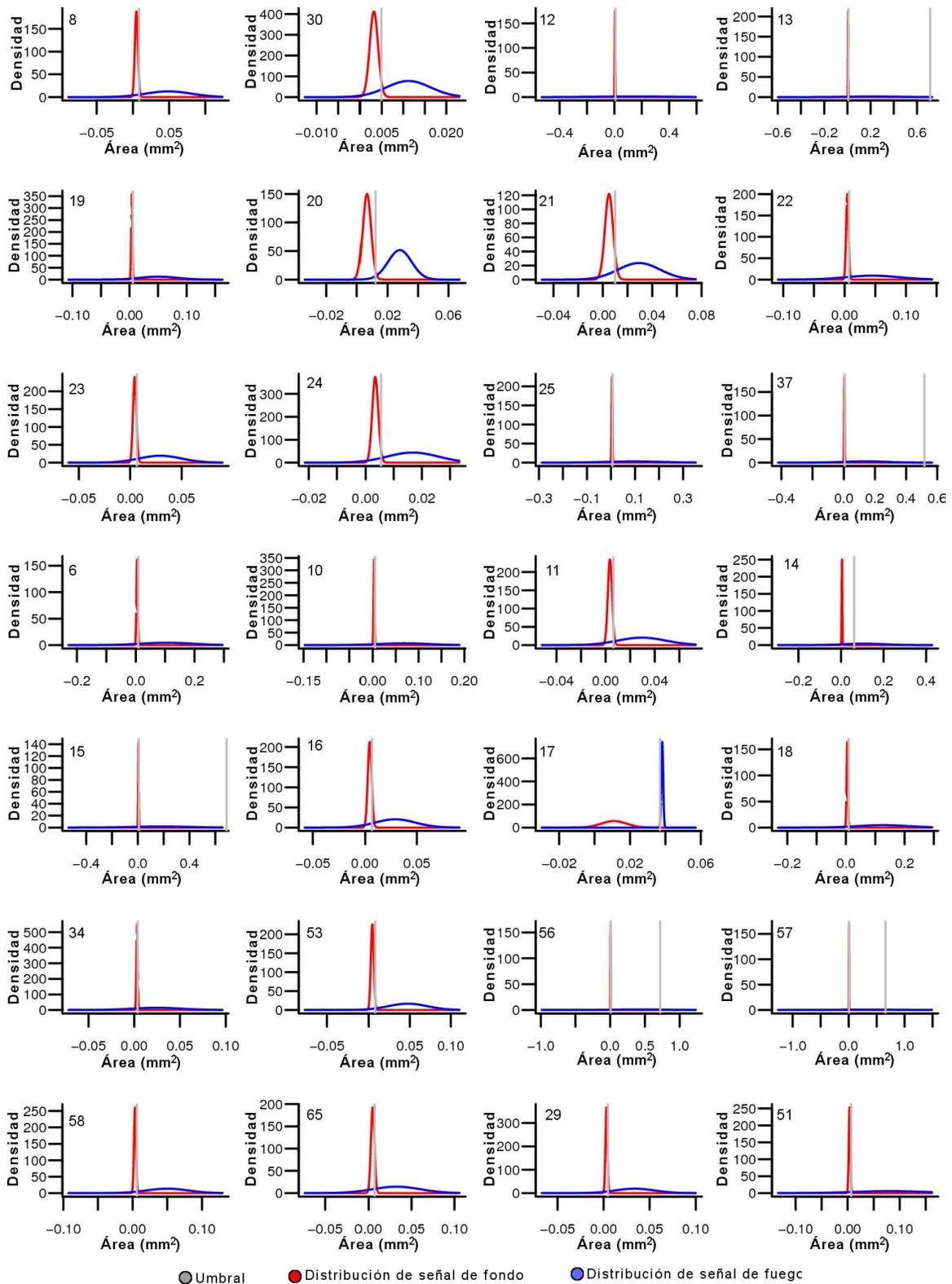


Figura 5.7. Distribuciones de señal de fondo y señal de incendios en lagos de la PY y alrededores, parte 1. Los números en la parte superior izquierda representan los cuerpos de agua mostrados en la Figura 5.3 que se agruparon según el tipo de vegetación que los rodean.

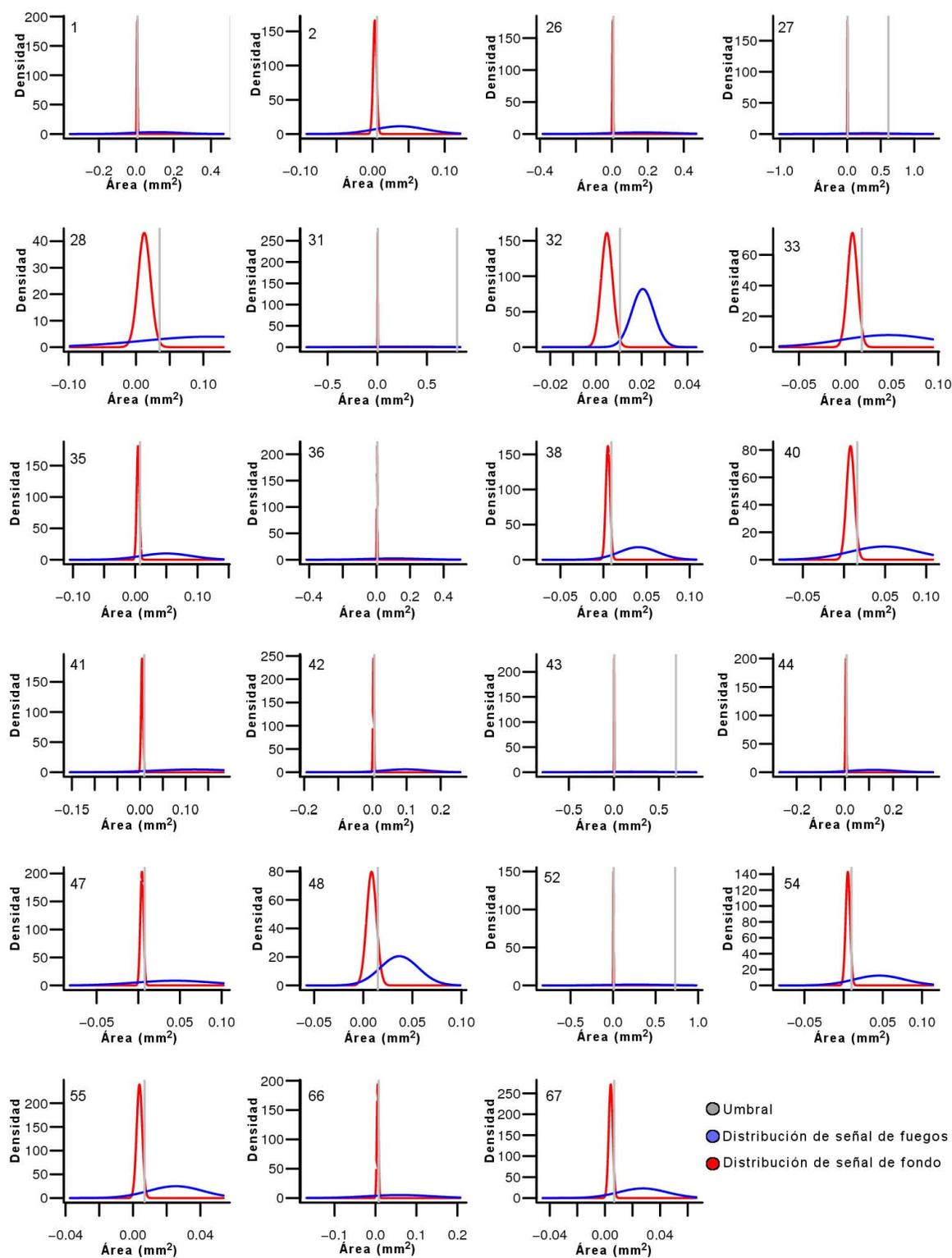


Figura 5.8. Distribuciones de señal de fondo y señal de incendios en lagos de la PY y alrededores, parte 1. Los números en la parte superior izquierda representan los cuerpos de agua mostrados en la Figura 5.4 que se agruparon según el tipo de vegetación que los rodean.

5.3 Relación carbón e incendios

Las regresiones lineales que explican las partículas de material carbonizado como función de los incendios mostraron resultados mixtos (Figura 5.9). En la FVTM, la regresión de todos los tamaños de partícula con incendios ocurridos durante 3 años anteriores a la toma de las muestras, a una distancia de 4-5 km, mostraron valores de R^2 mayores a 0.4. La misma zona mostró $R^2 \sim 0.4$ en la misma distancia en el año 4. Ambas regresiones resultaron significativas a un nivel de confianza del 95%. En la PY y sus alrededores, los valores de R^2 fueron bastante menores que en la FVTM, incluso menores a 0.1, excepto para incendios ocurridos con 5 años de anterioridad y 5-7 km de proximidad al lago (Figura 5.9). En los puntos donde la relación de material carbonizado y la distancia sí se correlacionan, los valores de significancia fueron de 95% en ambas zonas de estudio. Las regresiones lineales también se realizaron tomando en cuenta las clases de tamaño de partículas de material carbonizado, según el año en que los incendios ocurrieron.

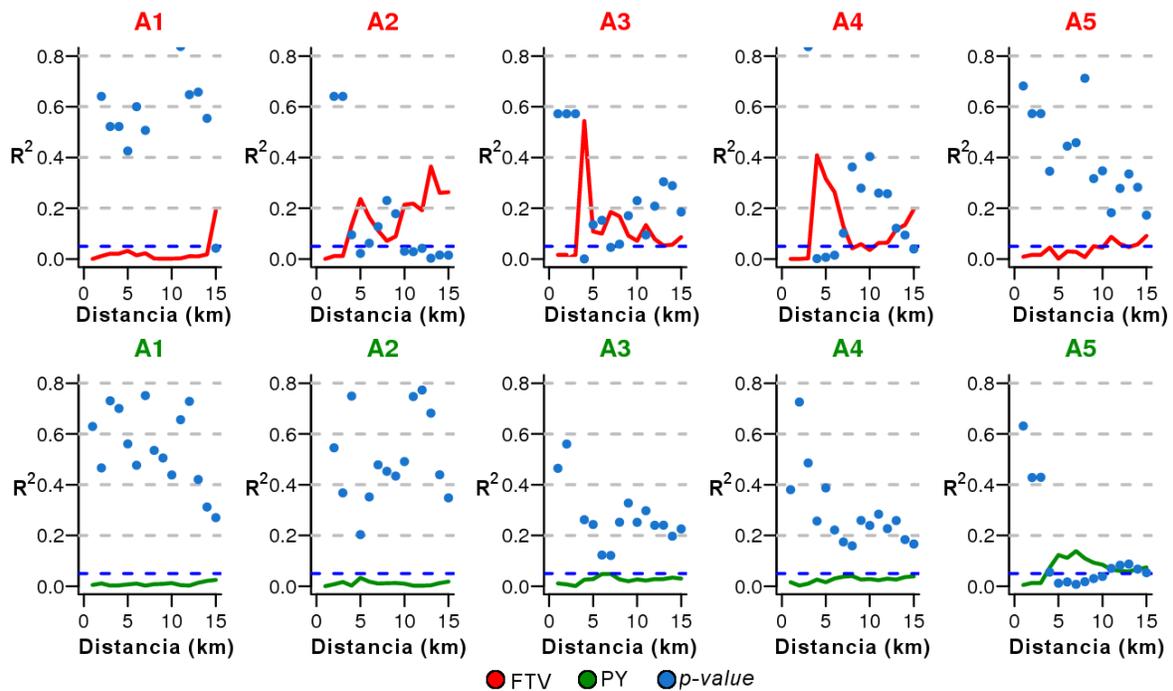


Figura 5.9. Regresiones lineales del material carbonizado y los incendios ocurridos por año para ambos sitios de estudio. Se muestran graficados los valores de R^2 con líneas rojas para la FVTM y verdes para la PY y alrededores. La línea punteada azul indica el límite de significancia de la relación (0.05), los puntos azules el valor puntual de la significancia. A1) año1, A2) año2, A3) año3, A4) año4, A5) año 5.

En la FVTM las partículas menores a 0.0064 mm^2 muestran valores de R^2 de 0.2 a 0.4 conforme aumenta la distancia de los incendios desde 8 a 15 km en uno a tres años de haber ocurrido los eventos de fuego. El valor de R^2 es mayor para este tamaño de partículas tras haber ocurrido 4 años de los incendios y a 4-5 km de proximidad al lago (Figura 5.10).

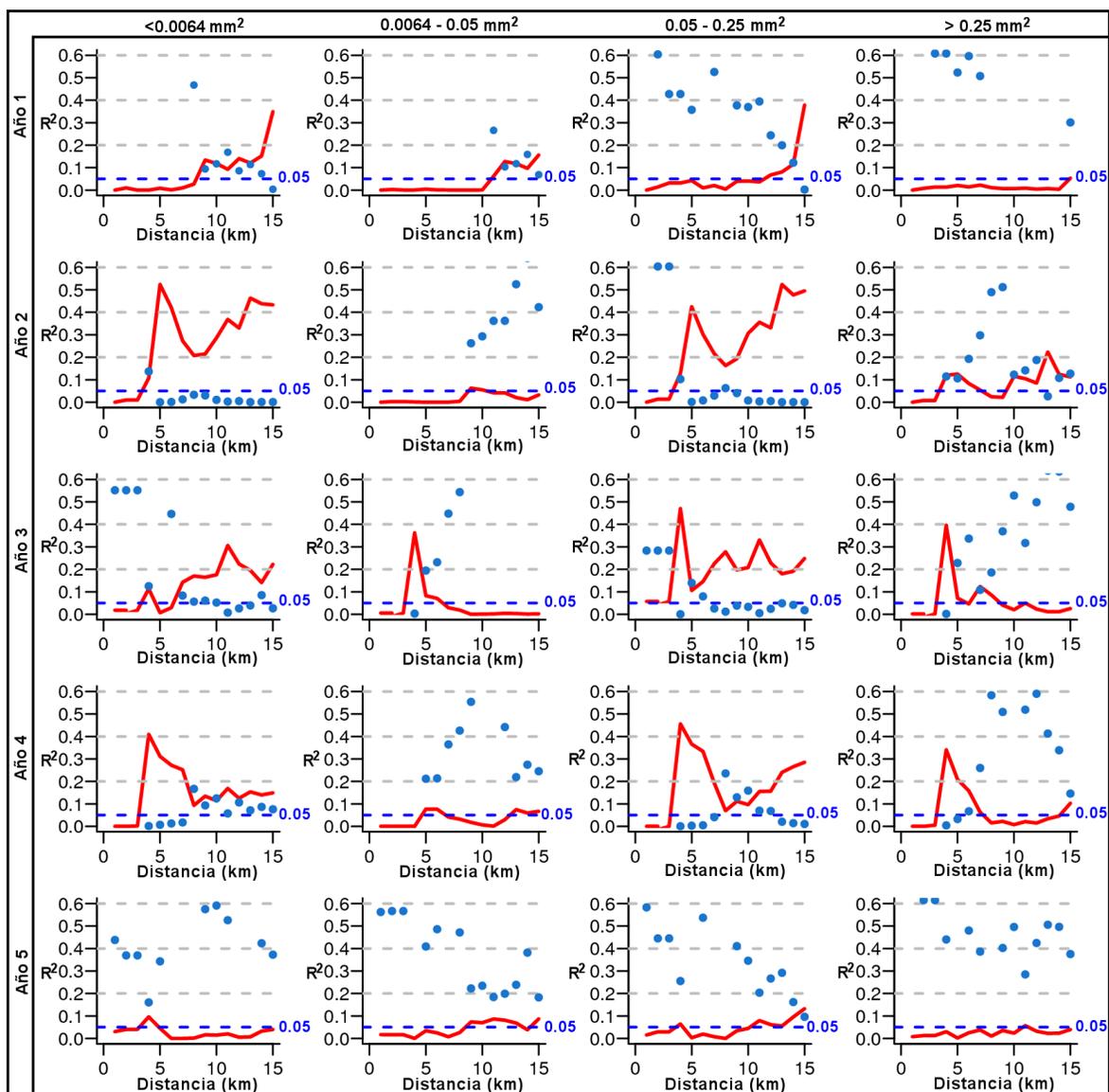


Figura 5.10. Regresiones lineales del material carbonizado y los incendios ocurridos en lagos de la FVTM. Se muestran graficados los valores de R^2 en líneas rojas. La línea punteada azul indica el límite de significancia de la relación (0.05), los puntos azules el valor puntual de la significancia. A1) año1, A2) año2, A3) año3, A4) año4, A5) año 5.

Las partículas de 0.5 a 0.25 mm² de área tienen valores de R² que van de 0.2 hasta 0.5 en incendios ocurridos dos años antes de tomar las muestras de sedimento y de 10 a 15 km de proximidad al lago, siendo los valores de R² más altos de esta zona de estudio. Todos los valores de R² son significativos con 95% de confiabilidad (Figura 5.10). En la PY los valores de R² de todas las regresiones lineales son menores de 0.15 y todos son significativos con 95% de confiabilidad (Figura 5.11).

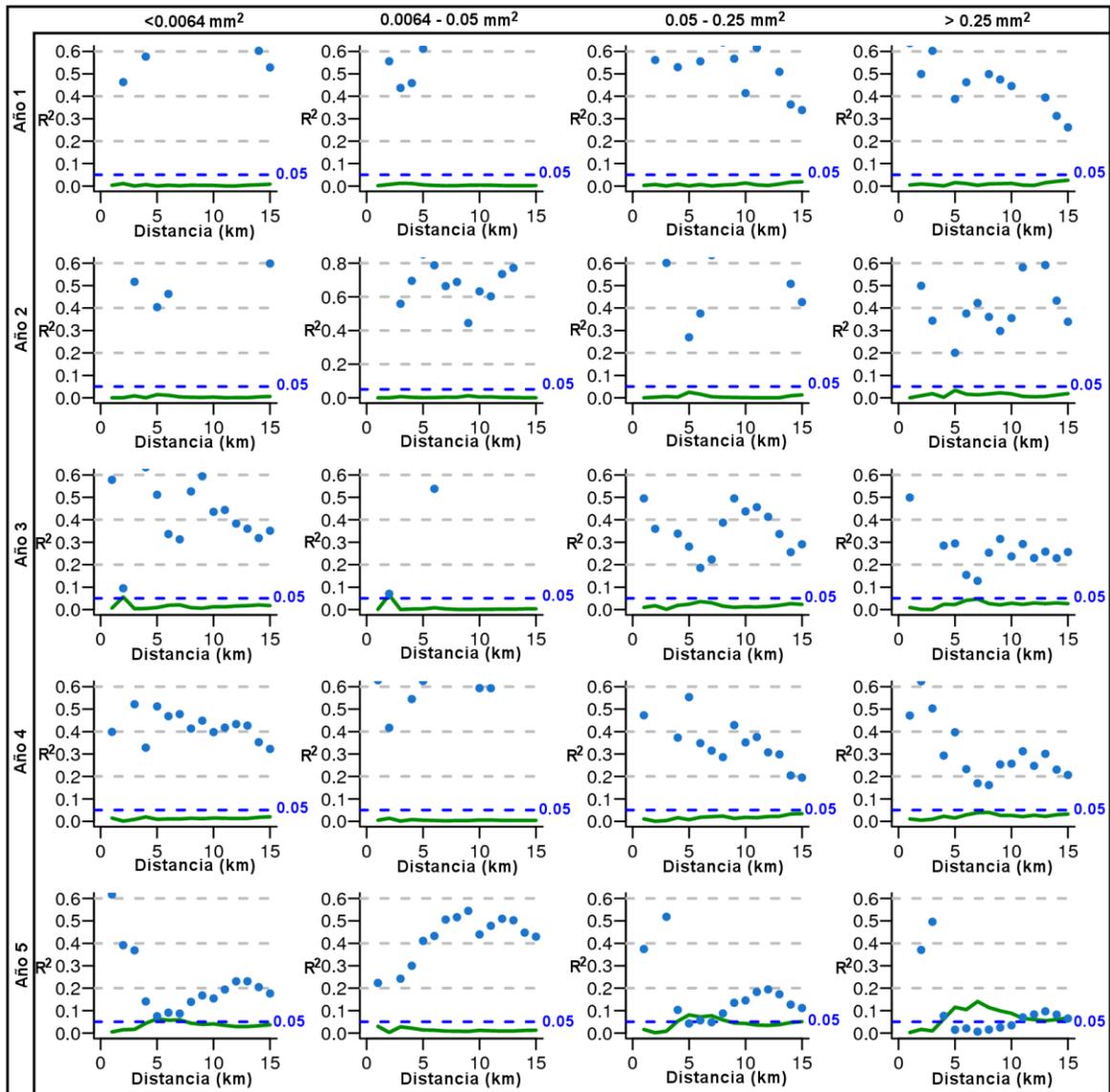


Figura 5.11. Regresiones lineales del material carbonizado y los incendios ocurridos en lagos de la Península de Yucatán. Se muestran graficados los valores de R² en líneas verdes. La línea punteada azul indica el límite de significancia de la relación (0.05), los puntos azules el valor puntual de la significancia. A1) año1, A2) año2, A3) año3, A4) año4, A5) año 5.

Las relaciones entre el material carbonizado de la FVTM y la PY no presentan valores de R^2 mayores de 0.4, lo que indica que su relación no tiene un comportamiento lineal y hay más variables que influyen.

5.4 Influencia del ambiente

Aunque las relaciones lineales de los incendios y el material carbonizado muestran puntos donde de la variabilidad en el material carbonizado es explicada por los incendios detectados a lo largo del tiempo, en la mayoría de los casos esos porcentajes no resultaron satisfactorios. Así, se realizó un Análisis de Factores Múltiple (AFM) para conocer el grado de correlación entre variables de distinto tipo, como variables categóricas de vegetación y homogeneidad, y variables cuantitativas, carbón, incendios, precipitación media anual y temperatura media anual

Los grupos de variables analizados fueron los relacionados con el material carbonizado, los incendios, la vegetación, y el clima, y además se incluyeron como variables suplementarias la altitud y la zona (FVTM o PY y sus alrededores). Se observó que la variabilidad del material carbonizado es mayor que la de los demás grupos, y que éstos están más relacionados entre sí (Figura 5.12).

En el AFM se observó que dentro de los grupos de variables, los incendios y el clima son grupos más relacionados entre sí, así como la vegetación, altitud y zona, mientras que el grupo de variables climáticas muestra relación inversa con la zona (Figura 5.13).

Dentro del grupo de variables de material carbonizado, la mayor parte de variabilidad es aportada por las partículas de carbón más pequeñas ($<0.0064\text{mm}^2$), así como por precipitación media anual. En términos de los incendios, la mayor variabilidad fue aportada por los eventos de fuego ocurridos en el año 5 a 15 km de distancia al lago y en las variables climáticas lo aporta la precipitación media anual (Figura 5.14).

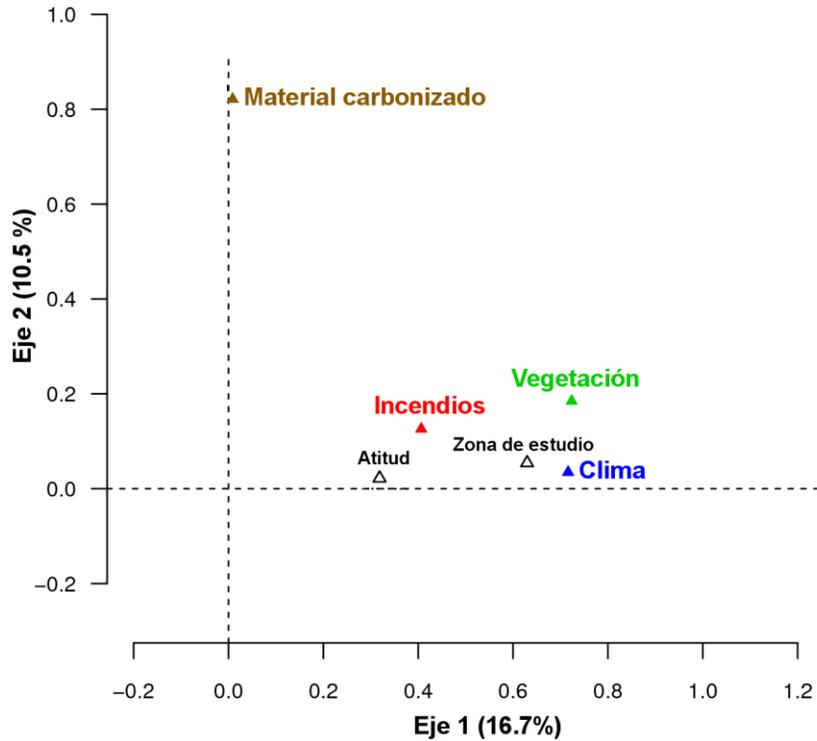


Figura 5.12. Ordenación de los grupos de variables. Se muestran graficados los grupos de variables incluidos en el AFM, además de los grupos suplementarios: Altitud y Zona de estudio.

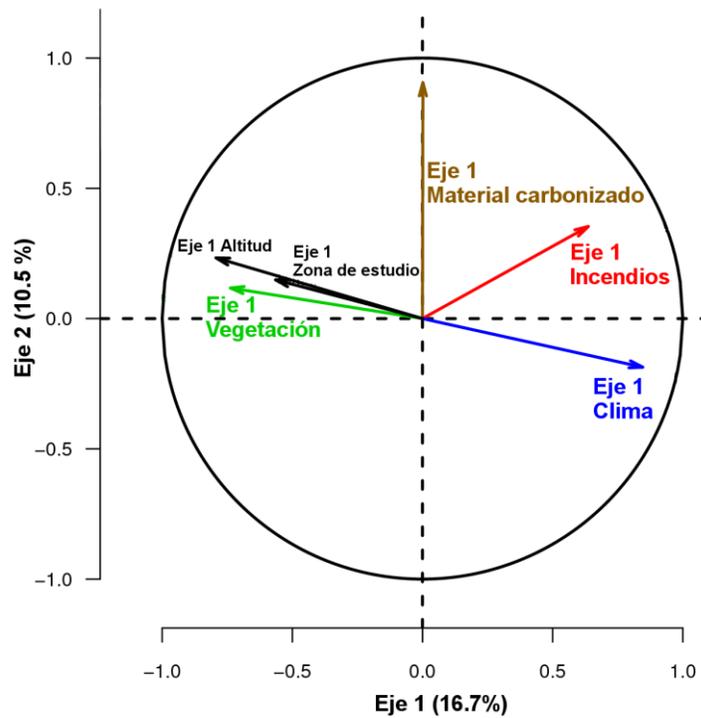


Figura 5.13. Grupos de variables y su relación entre sí en el AFM. Se muestra la correlación entre variables, donde los incendios y el clima están más relacionados entre sí, así como la altitud, la zona de estudio y la vegetación.

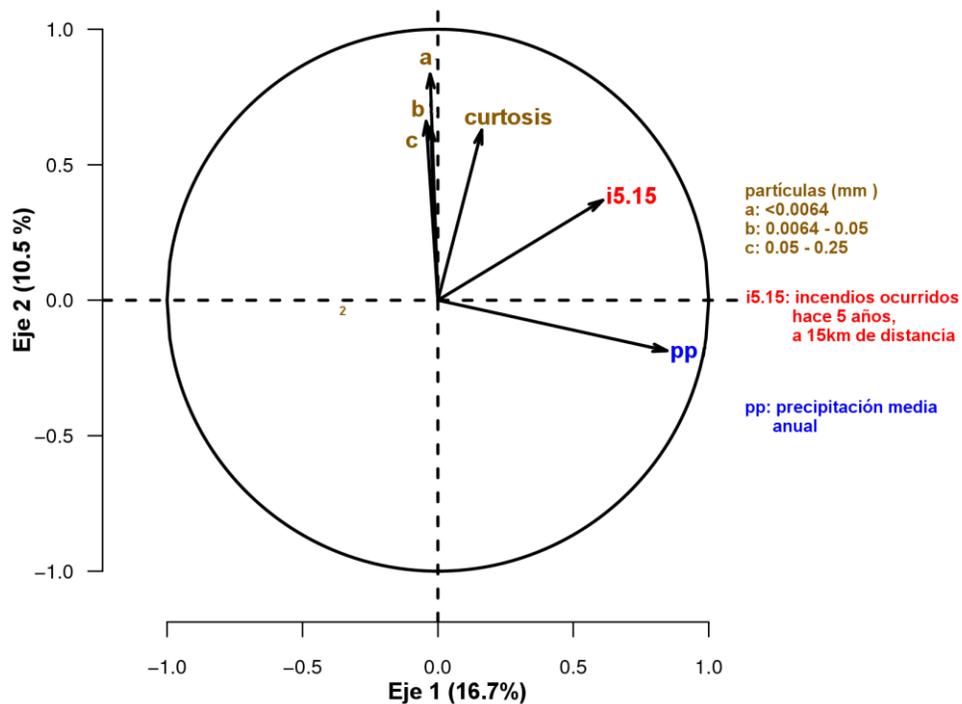


Figura 5.14. Variables que aportan la mayor variabilidad en cada grupo. Las partículas de material carbonizado $<0.0064\text{mm}^2$ y la precipitación media anual aportan la mayor variabilidad a los datos.

También es posible observar la forma en que se ordenan las variables considerando la zona en que se encuentran, la vegetación y el grado de homogeneidad que hay alrededor de los cuerpos de agua. Se observó que la mayoría de los lagos en la FVTM están medianamente conservados y poco conservados en comparación con los lagos en la PY y alrededores (Figura 5.15).

El Análisis de Redundancia Parcial (ARP) muestra la forma en que responden las variables del material carbonizado a la presencia de variables de incendios, pero considerando la variabilidad que aportan las variables de vegetación y clima. Estos grupos de variables tienen unidades categóricas y numéricas, que pueden analizarse conjuntamente con este método. Analizando los datos de ambas zonas de estudio, FVTM y PY y alrededores, se encontró que los incendios ocurridos dos años antes de la toma de muestras de sedimentos en los lagos y con 5 km de proximidad (aproximadamente 78.5km^2 de área alrededor del lago) son los que mejor se explican con las partículas de material carbonizado

de este trabajo. Se obtuvo un valor de $R^2=0.78$ con una confianza de 95%, que refleja la significancia de las ordenaciones generadas (Figura 5.16 y 5.17).

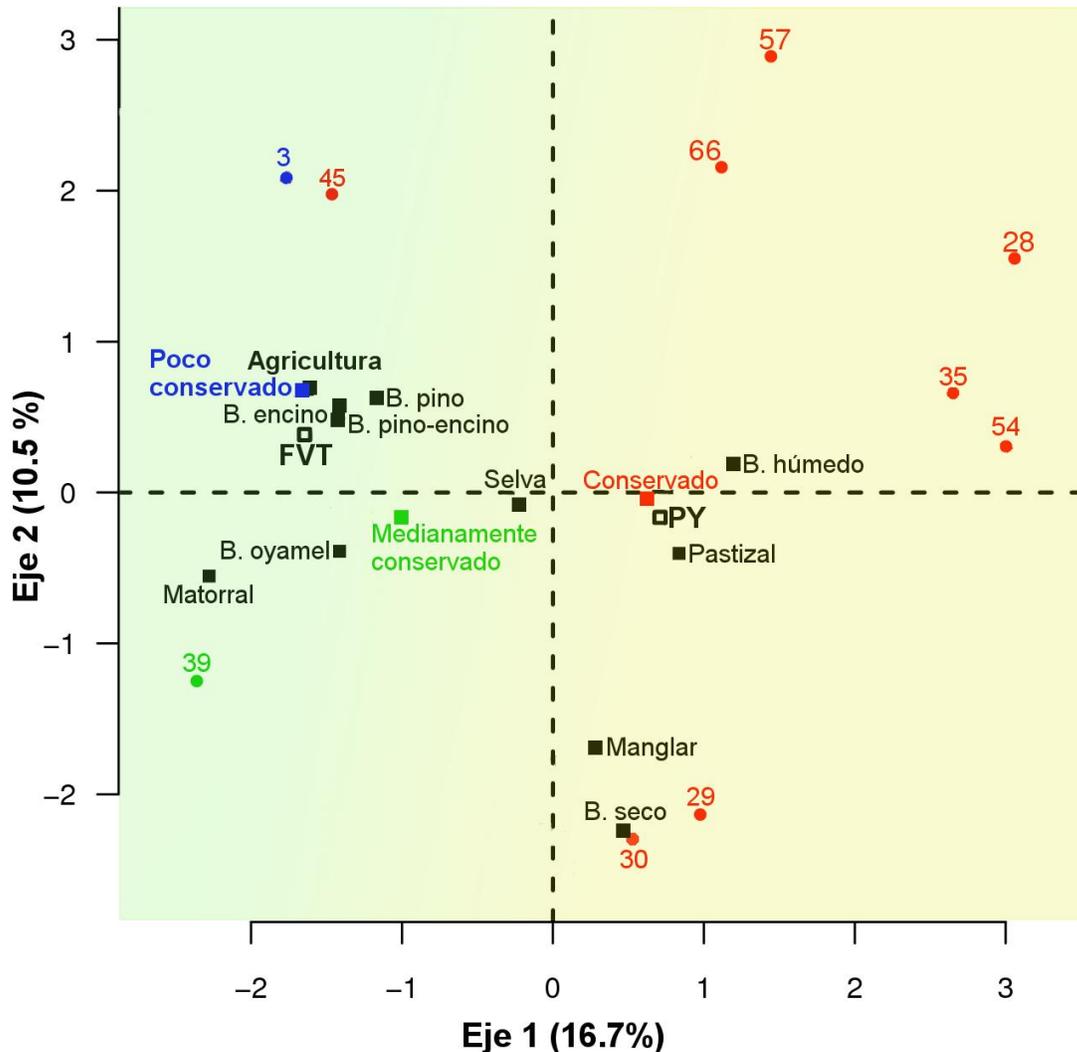


Figura 5.15. Ordenación de los lagos con mayor variabilidad considerando la vegetación a su alrededor, el grado de homogeneidad y la zona en que se ubican. Los cuerpos de agua que se muestran son los que aportan más variabilidad en la ordenación, son: 3) Alberca, 45) Parangueo, 39) Metztlán, 66) Yalaluch, 57) San Francisco Mateos, 28) Gloria, 35) Laguna Perdida, 54) Sacpuy, 29) Golfete, 30) Güija.

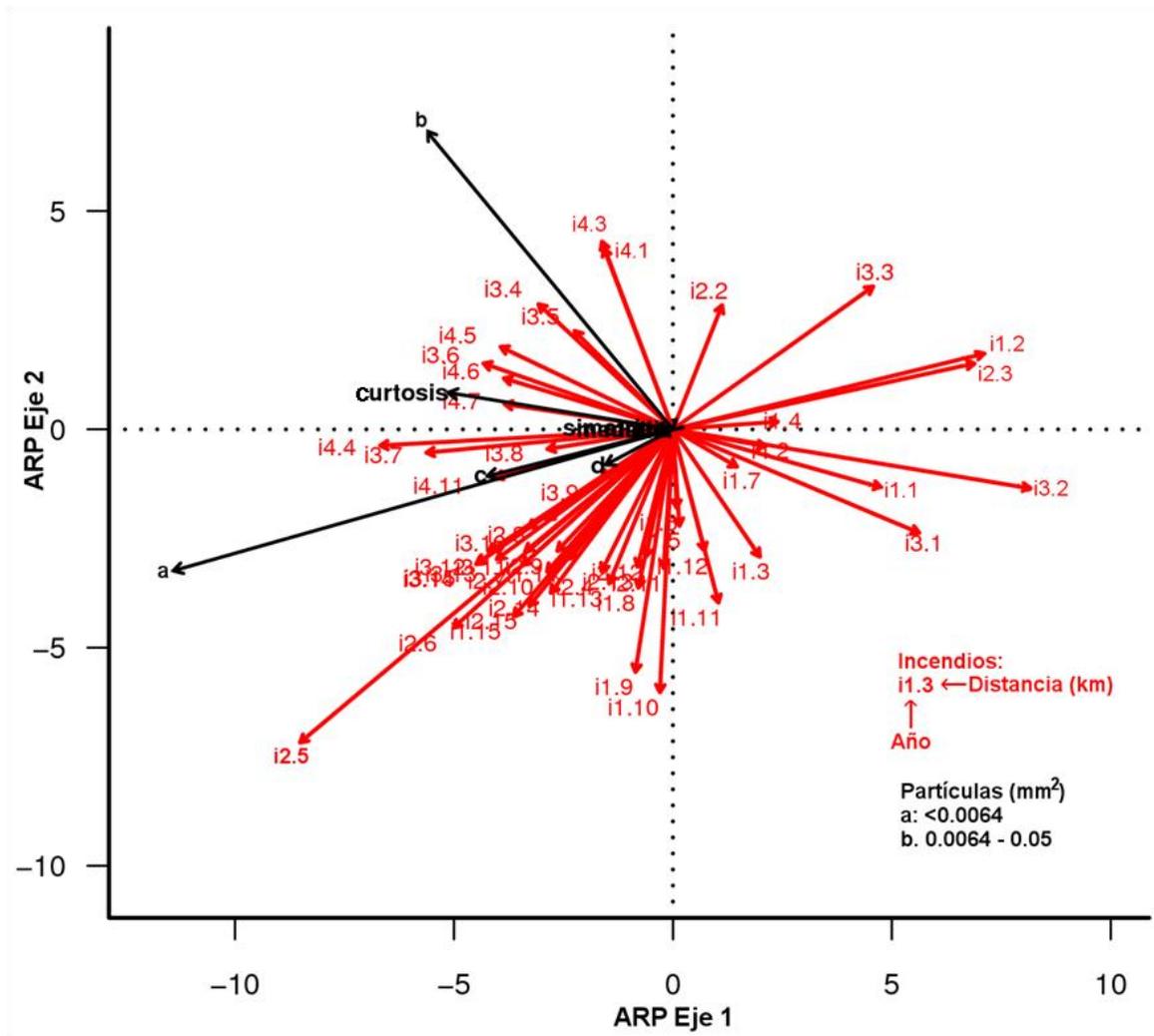


Figura 5.16. Ordenación de las variables de incendios respecto a las partículas de material carbonizado por medio del ARP. El vector más largo en rojo (*i2.5*) representa las características de los incendios que mejor explica la base de datos de partículas de carbón considerando la vegetación y el ambiente. $R^2=0.78$, 95% de confiabilidad.

El RPA permitió conocer la asociación entre la distribución de las partículas de material carbonizado en cada lago con los incendios (Figura 5.17). En cada cuadrante del gráfico, el vector de mayor longitud representa la variable que mejor se relaciona con el material carbonizado de los lagos. El vector más largo *i2.5*, incendios de 2 años y a 5km del lago, se relaciona mejor con el material carbonizado de los lagos Zempoala (71) y San Francisco Mateos (57) que con los demás lagos estudiados.

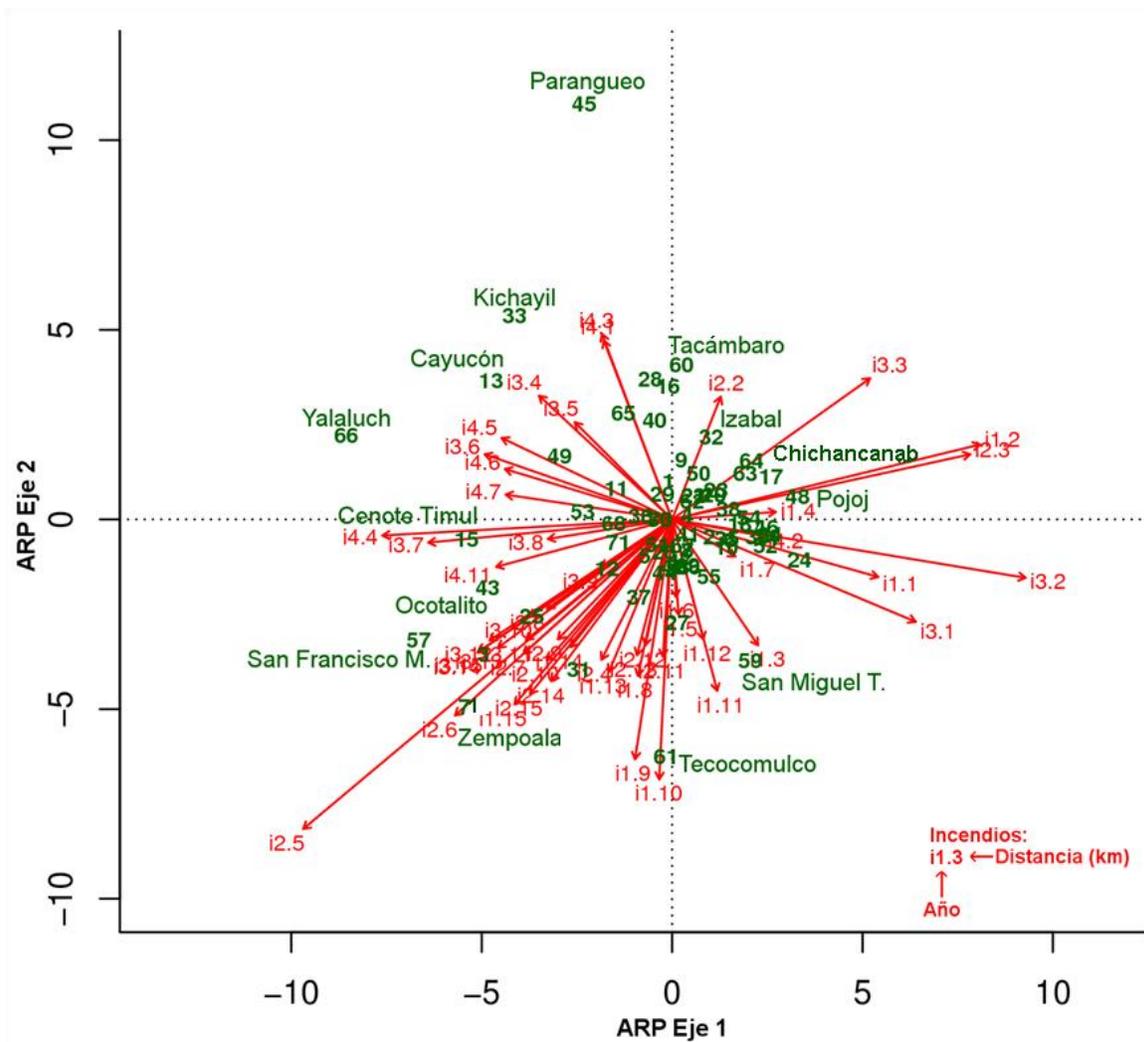


Figura 5.17. Ordenación de las variables de incendios respecto a los cuerpos de agua por medio del ARP. Los vectores en rojo reflejan las características de los incendios y la ordenación de los sitios, en verde, muestra la correlación entre ellos. $R^2=0.78$, 95% de confiabilidad.

6. DISCUSIÓN

Las partículas de material carbonizado presentes en sedimentos lacustres y la forma en que reflejan incendios ocurridos alrededor de los lagos es una relación compleja. En ella influyen numerosos factores que se deben tomar en cuenta para derivar conclusiones adecuadas al momento de interpretar la historia del fuego a partir del material carbonizado. Entre otros factores se encuentran el tiempo transcurrido entre la ocurrencia de un incendio hasta el momento de la depositación, la distancia entre el incendio y el lago donde se deposita, las características del material carbonizado que se preserva, tipo de vegetación que se quema, así como factores ambientales que caracterizan el sitio del incendio y el lago. A continuación se intenta responder algunas preguntas básicas con respecto a la señal de material carbonizado en sistemas lacustres con base en los resultados de la presente investigación y su interpretación.

¿Cómo es la señal de las partículas de material carbonizado en sistemas lacustres en las regiones estudiadas?

Como se esperaba, todos los cuerpos de agua incluidos en este trabajo mostraron presencia de partículas de carbón, incluso en casos donde no se identificaron incendios en el área circundante (15 km alrededor) durante el tiempo analizado mediante el uso de imágenes satelitales. Tal es el caso de los lagos Toluca Luna (63) y Toluca Sol (64), en la FVTM, los cuales son lagos tipo cráter y se encuentran ubicados en el Volcán Nevado de Toluca a más de 4000 m.s.n.m. En esta zona, la vegetación, que representa la fuente de combustible se localiza en las laderas del volcán, de tal suerte que no se presentan incendios en el área de captación de aguas de los lagos.

El efecto de la pendiente y la posición de los lagos respecto a los incendios se revisó a detalle en un estudio que determinó la forma en que se acumuló el material carbonizado en 36 lagos posterior a un incendio en Oregon, E.U. (Gardner, 2001). En dicho trabajo, se identificó una cantidad significativamente menor de partículas de carbón en lagos con elevación mayor al sitio del incendio, caso que coincide con lo observado en los lagos Toluca Luna (63) y Toluca Sol (64) localizados por encima del límite superior de la

vegetación que los rodea. Así, la cantidad de carbón que se encontró en estos lagos difícilmente reflejará las condiciones locales de los incendios, constituyendo una señal de carbón secundaria, o señal de fondo. Esta señal corresponde al carbón que se deposita continuamente aún sin haber ocurrido incendios, y está asociado con el transporte de partículas por el viento, representando incendios a nivel regional (Whitlock, 2003). De hecho, las partículas encontradas en los lagos Toluca Luna y Toluca Sol fueron principalmente de tamaños menores a 0.0064mm^2 , que corresponden a partículas de menos de $80\mu\text{m}$ de lado (Figura 5.2), mismas que de acuerdo al Análisis de Modelos Mixtos forman parte de la señal de fondo (Figura 5.6). La misma situación ocurrió en la Península de Yucatán (PY) en los sitios Celestún (14) y Cobá (18), los cuales presentaron material carbonizado pero no observaciones de incendios. En estos casos se trata de lagunas costeras dentro de zonas protegidas y turísticas (Figura 5.3), donde también se confirmó que el material observado era parte de la señal de fondo (Figura 5.7).

La señal de material carbonizado en los cuerpos de agua de este estudio fue generalizada a partir del estudio de la distribución de las partículas mayores a $23\mu\text{m}$ de lado. La forma general de las distribuciones fue significativamente asimétrica positiva y leptocúrtica (Figura 5.1 y 5.5.). Este fenómeno se deriva de una mayor cantidad de partículas pequeñas ($<0.0064\text{mm}^2$), las cuales reflejan principalmente procesos de fragmentación que ocurren desde que se generan las partículas en un evento de fuego hasta su depositación y procesos de mezcla y redepositación dentro de los lagos (Figura 1.2) (Patterson *et al.*, 1987a; Clark, 1988; Whitlock, 2001). En general, se encontraron más partículas de material carbonizado en los lagos de la FVTM que en la PY y alrededores, a pesar que en la PY hubo mayor incidencia de incendios en el tiempo estudiado (Figura 5.2 a 5.4). La forma en que ambos sitios incorporan el carbón a los sedimentos lacustres es distinta, y está determinada por características relacionadas con la producción, dispersión y depositación primaria del material carbonizado, así como la depositación secundaria, los procesos de mezcla de los sedimentos e incluso la metodología de muestreo. Estas, entre otras características, se abordaron en un modelo numérico que permitió reconocer que la forma en la que se presenta el material carbonizado en los sedimentos lacustres no es lineal (Higuera *et al.*, 2007).

Como parte del trabajo exploratorio de este estudio en lagos de México, se realizaron regresiones lineales que permitieron conocer el grado en que son explicadas las partículas de carbón presentes en los sedimentos en términos de los incendios observados en el área (Figura 5.9 a 5.11). Los primeros estudios que tratan de explicar la presencia de ciertos tamaños de partículas y su dispersión desde el sitio del incendio son modelos teóricos bidimensionales (Patterson *et al.*, 1987a; Clark, 1988). En la actualidad los modelos con múltiples variables, son los que permiten abordar mejor el comportamiento de las partículas de carbón (Higuera *et al.*, 2007; Kelly *et al.*, 2011). Sin embargo, en lugares para los cuales se cuenta con poca información, como el sur de África, se han utilizado modelos lineales (Duffin *et al.*, 2008). Para esta localidad se evaluó el umbral de tamaño de partículas de carbón en sedimentos lacustres que mejor se relacionan con la proximidad e intensidad de incendios observados durante 10 años. El mejor R^2 obtenido fue de 0.56 en términos de las relaciones existente entre incendios y partículas de 51-150 μm de lado muestreadas cinco años después de la ocurrencia de incendios. Este rango de tamaño se aproxima con los diámetros de partículas incluidos en la clase definida en este trabajo de 0.0064-0.05 mm^2 , mostrando valores de R^2 máximos de 0.4 en lagos de la FVTM con 5km de proximidad del fuego a los lagos y a tres años de haber ocurrido incendios (Figura 5.10). En la PY y alrededores las regresiones no fueron significativas y los valores de R^2 para este tamaño de partícula fueron muy pequeños (Figura 5.11). Es probable que en las zonas estudiadas en este trabajo los procesos de mezcla de sedimento dentro de los lagos, aspecto que no fue tomado en cuenta, hayan jugado un papel preponderante en el desfaseamiento de la relación lineal entre incendios y partículas de carbón (Whitlock, 1996; Duffin *et al.*, 2008).

Estimación cuantitativa del material carbonizado: ¿Área o cantidad de partículas?

La fragmentación de las partículas ha representado uno de los principales problemas tafonómicos del material carbonizado, esto debido a que la mayoría de los métodos para reconstruir incendios del pasado se basa en el conteo de las mismas para calcular su concentración en los sedimentos (número de partículas / unidad de volumen) (Finsinger & Tinner, 2005). Para disminuir el efecto de la fragmentación al analizar las partículas de

carbón se ha propuesto trabajar con el área de las partículas en vez de sólo el número de partículas y procesar las muestras de forma independiente a las muestras de polen (Millsaugh & Whitlock, 1995), como se realizó en este estudio. También se plantea en el presente estudio calcular el volumen de las partículas de material carbonizado a partir del área, utilizando una fórmula que demostró minimizar el error por fragmentación (Weng, 2005). El uso de área de partículas y volumen de partículas calculado a partir del área son aproximaciones que brindan significativamente mejores interpretaciones que sólo el número de partículas (Ali *et al.*, 2009). Con este trabajo también se pretende impulsar el uso del área de partículas de carbón en estudios paleoecológicos en México para lograr interpretaciones del fuego más precisas y que permitan estandarizar la forma de trabajo, para poder utilizar los datos que se generen en modelos que permitan conocer las dinámicas del fuego en el tiempo en nuestro país.

¿Cuál es el umbral de tamaño de partícula de material carbonizado a partir del cual se derivan mejores inferencias de incendios en los sitios estudiados?

Para determinar el tamaño de partícula que mejor explica los incendios, se utilizó una aproximación similar a la que se usa para identificar los picos de carbón de la señal de fondo en núcleos sedimentarios (Higuera *et al.*, 2007). Esta aproximación se basa en el supuesto teórico de que la distribución de partículas de material carbonizado contenidas en una muestra de sedimento tiene dos componentes: el primero es el “ruido” o señal de fondo, y el segundo es la distribución de las partículas que si indican incendios (Higuera *et al.*, 2010). De manera análoga, en este trabajo se asume que en las muestras modernas hay un componente de carbón primario, que se deposita cuando ocurren incendios, y un componente de carbón secundario que se deposita continuamente (Whitlock, 1996). De esta forma se encontraron los parámetros de ambas distribuciones en cada lago (Figura 5.6 a 5.8, Anexo 3), y los umbrales de tamaño de las partículas que resultaron asociadas con incendios (Tabla 2).

El tamaño más pequeño en la FVTM se encontró en lagos rodeados por Bosque húmedo (0.00576 mm^2), que corresponde a partículas mayores a $70\mu\text{m}$ de diámetro, y la

mayoría de los umbrales en esta zona estuvieron alrededor de 0.01 mm^2 , lo cual corresponde con el umbral utilizado con frecuencia en la bibliografía (100-125 μm de diámetro) determinado a partir de calibraciones de la señal en bosques boreales de Estados Unidos y Canadá (Whitlock, 2001; Higuera *et al.*, 2010). En la PY los umbrales fueron menores que en la FVTM, excepto para pastizales (0.0129 mm^2). En la PY y sus alrededores, los tipos de vegetación son generalmente más húmedos que en la FVTM, y el Bosque húmedo predomina en lagos muestreados hacia Chiapas y norte de Guatemala, lo que podría explicar los tamaños menores de umbral. En estos lagos el umbral es de 0.00909 mm^2 correspondiendo a partículas de 80-100 μm de diámetro. En conclusión, basados en el umbral más pequeño encontrado ambas zonas de estudio, se puede concluir que en lagos de FVTM las partículas $>70 \mu\text{m}$ y en la PY las partículas $>80\mu\text{m}$ son indicadoras de incendios, valores ligeramente superiores a los reportados para África ($>50\mu\text{m}$) y menores que los reportados en zonas de bosques boreales ($>100\mu\text{m}$) (Duffin *et al.*, 2008(Whitlock, 2001)).

¿Cuál es la influencia del ambiente en la señal de partículas de carbón?

Aparte de conocer la relación entre las partículas de material carbonizado y los incendios, se incluyeron en este estudio variables ambientales como la precipitación media anual, la temperatura media anual, la altitud y la vegetación. Como se esperaba, las variables ambientales y la vegetación se encuentran en estrecha relación con los incendios (Bowman *et al.*, 2009). Las ordenaciones generadas con el Análisis de Factores Múltiples son una herramienta para explorar los datos, con la posibilidad de incluir variables con diferentes unidades. Así, fue posible observar la ordenación de grupos de variables en la cual se reflejó el grado de variabilidad dentro de cada uno de ellos (Figura 5.12 y 5.13).

Dentro de los grupos de variables, la que resultó con mayor variabilidad fueron las partículas $<0.0064 \text{ mm}^2$ que, como se mencionó, también son responsables de la forma de la distribución de tamaños observada para las partículas en la mayoría de los lagos. La vegetación, como variable categórica, estuvo relacionada más con la altitud y la zona de estudio que con las variables de precipitación y temperatura medias anual, una observación que corresponde a la división biogeográfica existente entre la PY y la FVTM (Rzedowski,

2006). Las variables climáticas mostraron su mejor asociación con los incendios que con las demás variables (Figura 5.14), por lo que se revisó la relación partículas de material carbonizado-incendios tomando como variable de referencia la vegetación, y el clima sólo como variable suplementaria. Así, la hipótesis estadística planteada le dio más peso a la vegetación alrededor de los lagos que al clima. Se observó que los lagos de la FVTM tienen vegetación menos conservada que en la PY, e incluso hay presencia de lagos rodeados por zonas de agricultura, mientras que las zonas más conservadas en la PY y sus alrededores corresponden a Bosque húmedo (Figura 5.15). A partir de estas observaciones se concluye que la vegetación juega un papel fundamental en la mediación de la relación de las partículas de material carbonizado con los incendios.

El ARP generó una ordenación de los datos de partículas de material carbonizado en función de los incendios, pero considerando la vegetación y el clima. Esta ordenación tiene un valor de $R^2=0.78$, el cual es significativo (Figura 5.16 y 5.17). El vector más largo de las variables de incendios (*i2.5*), indica la variable que mejor explica la base de datos de material carbonizado. Este vector representa los incendios ocurridos dos años antes de tomar la muestra de sedimento y a 5 km de proximidad al lago. A partir de esta observación se concluye que el radio de influencia de los incendios en términos del material carbonizado en lagos de México se encuentra en 78.5 km^2 , un área inferior a la que ha sido determinada para latitudes más altas (7 km de radio para un área de 153.9 km^2) (Whitlock, 1996). Sin embargo, más que la proximidad, se sugiere que la intensidad de los incendios produciría una mejor relación estadística con la señal de las partículas de carbón (Duffin *et al.*, 2008). Así, se hace necesario en trabajos futuros determinar la intensidad de los incendios mediante análisis más detallados de la información satelital disponible.

La ordenación del ARP también permitió identificar las variables de incendios mejor explicada para cada lago. Cada vector de incendios muestra ciertos lagos a su alrededor que son aquellos en los que el material carbonizado presente explica mejor el fuego ocurrido a cierto tiempo del muestreo y a cierta distancia (Figura 5.17). Con esta herramienta es posible especificar un área de influencia para los lagos incluidos en este estudio, que puede utilizarse como referencia al realizar una reconstrucción de los incendios por medio de núcleos sedimentarios.

7. CONCLUSIONES

Con este trabajo se logró conocer algunas de las características del material carbonizado de sedimentos lacustres como principal indicador de incendios ocurridos alrededor de cuerpos de agua en la FVTM y PY y alrededores. De este estudio exploratorio se derivan las siguientes conclusiones:

- 1) En material sedimentario lacustre, las partículas de material carbonizado con tamaños mayores a $70\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$ de lado en la Faja Volcánica Transmexicana y en la Península de Yucatán y sus alrededores, respectivamente, indican incendios ocurridos alrededor de los cuerpos de agua.
- 2) En términos de la distancia entre los eventos de fuego y su representación en el material carbonizado presente en los sedimentos lacustres, se pudo determinar que los incendios ocurridos dentro de un radio de 5 km alrededor del cuerpo de agua serán los que mejor representados estén. Así, en la interpretación de los registros fósiles de incendios en el centro, sureste de México y norte de Centroamérica, debe tenerse en cuenta que los eventos de fuego representados en el material sedimentario representan en términos del espacio un área aproximada de 78.5 km^2 .
- 3) En términos de la temporalidad de los incendios representados en las partículas de material carbonizado de la interfase agua-sedimento, esta corresponde a dos años. Es decir, el centímetro superficial del material sedimentario lacustre contiene información sobre incendios ocurridos dentro de los dos años anteriores a la colecta del mismo. Sin embargo, dado que los procesos de promediado de tiempo (*sensu* Fürsich & Aberhan, 1990) cambian de acuerdo al contexto climático, y el sedimento se compacta a medida que se produce la depositación posterior de otros materiales, este dato no es informativo en términos de secuencias sedimentarias fósiles.
- 4) Las relaciones lineales número de incendios-partículas de material carbonizado, mostraron valores máximos de R^2 de 0.4 para los lagos de la Faja Volcánica Transmexicana, considerando incendios ocurridos dentro de tres años a 5 km de proximidad, y R^2 menores a 0.1 para lagos de la Península de Yucatán. Así, es evidente que esta relación es menos compleja en el centro de México que en el sur.

Así, es necesario desarrollar modelos que integren la complejidad del contexto paisajístico regional de manera que esta relación se puede expresar sistemáticamente mediante una expresión matemática. De acuerdo a la evidencia derivada del ajuste de modelos lineales, estos modelos variarán en complejidad, probablemente siguiendo los patrones biogeográficos reflejados en la vegetación.

- 5) Como factor principal en la relación carbón-incendios se identificó el papel de la vegetación que rodea a los lagos, ya que influye en la cantidad de partículas encontradas y en el tamaño a partir del cual se pueden interpretar como señal de incendios. De igual manera, la cobertura forestal afecta los procesos de deposición secundaria, jugando un papel preponderante en términos de la cantidad y tamaño de las partículas que componen el ruido de la señal.
- 6) Para lograr una efectiva calibración del material carbonizado que sea aplicable a las condiciones ambientales del país hay algunos factores que se deben considerar con más detalle. Por ejemplo, tomar en cuenta variables limnológicas de los cuerpos de agua, involucrar un análisis más profundo de las imágenes satelitales de manera que se pueda conocer la intensidad de los incendios ocurridos alrededor de los lagos y el área afectada por los mismos. En cuanto a las partículas de carbón, tomar en cuenta la forma de las partículas y relacionarlas con el tipo de vegetación podría ayudar a identificar patrones que al momento de reconstruir eventos de fuego del pasado se relacionen mejor con las interpretaciones de otros indicadores como el polen.
- 7) El esfuerzo por calibrar los indicadores paleoecológicos, como el material carbonizado lacustre, en nuestro país es primordial para lograr interpretaciones del pasado con mayor confiabilidad, de tal forma que logremos conocer como han sido los regímenes de incendios a lo largo del tiempo y su efecto e interacción con los patrones climáticos y biogeográficos.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Ali, A.A., Higuera, P.E., Bergeron, Y. & Carcaillet, C. (2009) Comparing fire-history interpretations based on area, number and estimated volume of macroscopic charcoal in lake sediments. *Quaternary Research*, **72**, 462-468.
- Bautista, F., Batllori-Sampedro, E., Palacio, G., Ortíz-Pérez, M. & Castillo-González, M. (2005) Integración del conocimiento actual sobre los paisajes geomorfológicos de la Península de Yucatán. *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales*. (ed. por F. Bautista, G. Palacio.), p. 282. Universidad Autónoma de Campeche y Universidad Autónoma de Yucatán, Campeche, México.
- Becue-Bertaut, M., Pages, J. (2008) Multiple factor analysis and clustering of a mixture of quantitative, categorical and frequency data. *Computational Statistics & Data Analysis*, **52**, 3255-3268.
- Beltrán, E. (1959) Situación, problemas, perspectivas. *Los recursos naturales del sureste y su aprovechamiento*. Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables, México D.F.
- Benaglia, T., Chauveau, D., Hunter, D. & Young, D. (2009) mixtools: An R package for analyzing finite mixture models. *Journal of Statistical Software*, **32**, 1-29.
- Birks, H.J.B. & Birks, H.H. (1980) *Quaternary palaeoecology*. University Park Press, Baltimore.
- Bolker, B.M. (2008) *Ecological Models and data in R*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Bowman, D.M.J.S., Balch, J.K., Artaxo, P., Bond, W.J., J.M., C., Cochrane, M.A., D'Antonio, C.M., DeFries, R.S., Doyle, J.C., Harrison, S.P., Johnston, F.H., Keeley, J.E., Krawchuk, M.A., Kull, C.A., Marston, J.B., Moritz, M.A., Prentice, C., Roos, C.I., Scott, A.C., Swetnam, T.W., Werf, G. & Pyne, S.J. (2009) Fire in the Earth System. *Science*, **324**, 481-484.
- Bradley, R.S. (1999) *Paleoclimatology*. Academic Press, Burlington.
- Clark, J.S. (1988) Particle motion and the theory of charcoal analysis: source area, transport, deposition, and sampling. *Quaternary Research*, **30**, 67-80.
- Clark, J.S., Lynch, J., Stocks, B.J., Goldammer, J.G. (1998) Relationships between charcoal particles in air and sediments in west-central Siberia. *The Holocene*, **8**, 19-29.
- CNA (1997) *Diagnóstico de la Región XII, Península de Yucatán*. Comisión Nacional del Agua. Gerencia Regional de la Península de Yucatán, México.

- CNA (2012) *Atlas del agua en México 2012*. Comisión Nacional del Agua. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Mexico.
- CONAFOR (2013) *Programa de protección contra incendios forestales*. Disponible en: www.conafor.gob.mx (accessed Marzo-2013).
- Conserva, M.E., and Byrne, R. (2002) Late Holocene Vegetation Change in the Sierra Madre Oriental of Central Mexico. *Quaternary Research*, **58**, 122-129.
- Correa-Metrio, A., Bush, M.B., Pérez, L., Schwalb, A. & Cabrera, K.R. (2011) Pollen distribution along climatic and biogeographic gradients in northern Central America. *The Holocene*, **21**, 681-692.
- Day, M. (1996) Conservation of karst in Belize. *Journal of Cave and Karst Studies* **58**: 139-144.
- Delcourt, H.R. & Delcourt, P.A. (1991) *Quaternary Ecology: A paleoecological perspective*. Chapman & Hall, Cornwall, UK.
- Duffin, K.I., Gillson, L. & Willis, K.J. (2008) Testing the sensitivity of charcoal as an indicator of fire events in savanna environments: quantitative predictions of fire proximity, area and intensity. *The Holocene*, **18**, 279-291.
- Escofier, B., Pages, J. (1994) Multiple factor analysis (AFMULT package). *Computational Statistics & Data Analysis*, **18**, 121-140.
- Finsinger, W. & Tinner, W. (2005) Minimum count sum for charcoal-concentration estimation in pollen slides: accuracy and potential errors. *The Holocene*, **15**, 293-297.
- Fürsich, F.T. & Aberhan, M. (1990) Significance of time-averaging for paleocommunity analysis. *Lethaia*, **23**, 143-152.
- Gámez, N., Escalante, T., Rodríguez, G., Linaje, M. & Morrone, J.J. (2012) Caracterización biogeográfica de la Faja Volcánica Transmexicana y análisis de los patrones de distribución de su mesofauna. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, **83**, 258-272.
- García-Calderón, N.E., Krasilnikov, P., Valera, M.A., Torres, E. (2007) Suelos. *Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana* (ed. por I. Luna, Morrone, J.J., Espinosa, D.). CONABIO-UNAM, México, D.F.
- García, E. (1998) Climas (Clasificación de Köppen, modificado por García), Escala: 1:1000000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

- Gardner, J.J., Whitlock, C. (2001) Charcoal accumulation following a recent fire in the Cascade Range, northwestern USA, and its relevance for fire-history studies. *The Holocene*, **11**, 541-549.
- Gomez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T., Ferrari, L. (2005) Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **57**, 227-283.
- Green, M. (1985) Charcoal analysis for paleoenvironmental interpretation: a chemical assay. *Quaternary Research*, **23**, 313-326.
- Hernández, M.E., Carrasco, G. (2007) Rasgos climáticos más importantes. *Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana* (ed. por I. Luna, Morrone, J.J., Espinosa, D.), pp. 57-72. CONABIO-UNAM, México, D.F.
- Higuera, P.E., Peters, M.E., Brubaker, L.B. & Gavin, D.G. (2007) Understanding the origin and analysis of sediment-charcoal records with a simulation model. *Quaternary Science Reviews*, **26**, 1790-1809.
- Higuera, P.E., Gavin, D.G., Bartlein, P.J. & Hallett, D.J. (2010) Peak detection in sediment-charcoal records: impacts of alternative data analysis methods on fire-history interpretations. *International Journal of Wildland Fire*, **19**, 996-1014.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G. & Jarvis, A. (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, **25**, 1965-1978.
- Husson, F., Josse, J., Le, S. & Mazet, J. (2013) *FactoMineR: Multivariate exploratory data analysis and data mining with R*.
- INEGI (1994) Uso de suelo y vegetación. Datos vectoriales, Escala: 1: 1000000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
- Kelly, R.F., Higuera, P.E., Barrett, C.M. & Feng Sheng Hu (2011) A signal-to-noise index to quantify the potential for peak detection in sediment-charcoal records. *Quaternary Research*, **75**, 11-17.
- Legendre, P. & Legendre, L. (1998) *Numerical Ecology*. Elsevier Scientific, Oxford.
- Long, C.J., and Whitlock, C. (2002) Fire and vegetation history from the coastal rain forest of the western Oregon Coast Range. *Quaternary Research*, **58**, 215-225.
- Lopez-Ramos, E. (1973) Estudio geológico de la Península de Yucatán. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, **25**

- Lozano-Garcia, M.S., Sosa-Najera, M.S., Sugiura, Y. & Caballero-Miranda, M. (2005) 23,000 yr of vegetation history of the Upper Lerma, a tropical high-altitude basin in Central Mexico. *Quaternary Research*, **64**, 70-82.
- Lozano-Garcia, M.S., Caballero-Miranda, M., Ortega-Guerrero, B., Rodríguez, A. & Sosa-Najera, M.S. (2007) Tracing the effects of the Little Ice Age in the tropical lowlands of eastern Mesoamerica. *PNAS*, **104**, 16200-16203.
- Lozano-Garcia, M.S., Caballero-Miranda, M., Ortega-Guerrero, B., Sosa-Najera, M.S., Rodríguez, A. & Schaaf, P. (2010) Late Holocene palaeoecology of Lago Verde: evidence of human impact and climate change in the northern limit of the neotropics during the late formative and classic periods. *Vegetation History and Archaeobotany*, **19**, 177-190.
- Lugo-Hupb, J., Aceves-Quesada, J.F. & Espinasa-Pereña, R. (1992) Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **10**, 143-150.
- Lynch, J.A., Clark, J.S., Stocks, B.J. (2004) Charcoal production, dispersal, and deposition from the Fort Providence experimental fire: interpreting fire regimes from charcoal records in boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, **34**, 1642-1656.
- MacDonald, G.M., Larsen C.P.S., Szeicz J.M., Moser, K.A. (1991) The reconstruction of Boreal Forest Fire History from lake sediments: a comparison of charcoal, pollen, sedimentological, and geochemical indices. *Quaternary Science Reviews*, **10**, 53-71.
- Maderey-R, L.E., Torres-Ruata, C. (1990) Hidrografía, Escala: 1:400000. Instituto de Geografía, UNAM.
- Marshall, J. (2006) Geomorphology and physiographic provinces of Central America. *Central America: geology, resources and hazards* (ed. por B. Alvarado), pp. 75-122. Taylor and Francis Group, London.
- McMichael, C.H., Correa-Metrio, A. & Bush, M.B. (2012) Pre-Columbian fire regimes in lowland tropical rainforests of southeastern Peru. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **342-343**, 73-83.
- Melgar, W. (2003) *Estado de la diversidad biológica de los árboles y bosques de Guatemala*. FAO. Servicio de Desarrollo de Recursos Forestales. Dirección de Recursos Forestales, Roma.
- Millsbaugh, S.H. & Whitlock, C. (1995) A 750-year history based on lake sediment records in central Yellowstone National Park, USA. *The Holocene*, **5**, 283-292.
- Millsbaugh, S.H., Whitlock, C., Bartlein, P.J. (2000) Variations in fire frequency and climate over the last 17,000 years in central Yellowstone National Park. *Geology*, **28**, 211-214.

- Miranda, F. & Hernández, E. (1963) Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, **28**, 29-179.
- Morán-Zenteno, D.J. (1984) *Geología de la República Mexicana*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- NASA-FIRMS (2012) *MODIS Active Fire Detections. Data set*. Disponible en: <http://earthdata.nasa.gov/firms> (accessed 20/02/2013 2013).
- Oksanen, J., Blanchet, G., Kindt, R., Legendre, P., O'Hara, B., Simpson, G.L., Solymos, P., Stevens, M.H.H. & Wagner, H. (2009) *vegan: Community Ecology Package*. The R Project for Statistical Computing. <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- Patterson, W., Edwards, K. & Maguire, D. (1987a) Microscopic charcoal as a fossil indicator of fire. *Quaternary Science Reviews*, **6**, 3-23.
- Patterson, W.A., K.J., E. & A.C., S. (1987b) Microscopic charcoal as a fossil indicator of fire. *Quaternary Science Reviews*, **6**, 3-23.
- Pérez, L., Lorenschat, I., Bugja, R., Brenner, M., Scharf, B. & Schwalb, A. (2010) Distribution, diversity and ecology of modern freshwater ostracods (Crustacea), and hydrochemical characteristics of Lago Petén Itzá, Guatemala. *Journal of Limnology*, **69**, 146-159.
- Pérez, L., Lorenschat, J., Massaferró, J., Pailles, C., Sylvestre, F., Hollwedel, W., Brandorff, G.O., Brenner, M., Islebe, G., Lozano-García, M.S., Scharf, B. & Schwalb, A. (2013) Bioindicators of climate and trophic state lowland and highland aquatic ecosystems of the northern Neotropics. *Revista de Biología Tropical*, **61**, 603-644.
- Peters, M.E., and Higuera, P.E. (2007) Quantifying the source area of macroscopic charcoal with a particle dispersal model. *Quaternary Research*, **67**, 304-310.
- Priego, A.G., Isunza, E., Luna, N., Pérez, J.L. (2007) Mapa de Cuencas Hidrográficas de México, Escala: 1:250000. INEGI-INE-CONAGUA.
- Power, M.J., Bush, M.B., Behling, H., Horn, S.P., Mayle, F.E. & Urrego, D.H. (2010) Paleofire activity in tropical America during the last 21 ka: a regional synthesis based on sedimentary charcoal. *PAGES News*, **18**, 73-75.
- Power, M.J., Marlon, J., Ortiz, N., Bartlein, P.J., Harrison, S.P., Mayle, F.E., Ballouche, A., Bradshaw, R.H.W., Carcaillet, C., Cordova, C., Mooney, S., Moreno, P.I., Prentice, I.C., Thonicke, K., Tinner, W., Whitlock, C., Zhang, Y., Zhao, Y., Ali, A.A., Anderson, R.S., Beer, R., Behling, H., Briles, C., Brown, K.J., Brunelle, A., Bush, M., Camill, P., Chu, G.Q., Clark, J., Colombaroli, D., Connor, S., Daniau, A.L., Daniels, M., Dodson, J., Doughty, E., Edwards, M.E., Finsinger, W., Foster, D.,

- Frechette, J., Gaillard, M.J., Gavin, D.G., Gobet, E., Haberle, S., Hallett, D.J., Higuera, P., Hope, G., Horn, S., Inoue, J., Kaltenrieder, P., Kennedy, L., Kong, Z.C., Larsen, C., Long, C.J., Lynch, J., Lynch, E.A., McGlone, M., Meeks, S., Mensing, S., Meyer, G., Minckley, T., Mohr, J., Nelson, D.M., New, J., Newnham, R., Noti, R., Oswald, W., Pierce, J., Richard, P.J.H., Rowe, C., Sanchez Goi, M.F., Shuman, B.N., Takahara, H., Toney, J., Turney, C., Urrego-Sanchez, D.H., Umbanhowar, C., Vandergoes, M., Vanniore, B., Vescovi, E., Walsh, M., Wang, X., Williams, N., Wilmshurst, J. & Zhang, J.H. (2008) Changes in fire regimes since the Last Glacial Maximum: an assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data. *Climate Dynamics*, **30**, 887-907.
- R Core Team (2013) *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.
- Rasband, W.S. (2005) *ImageJ version 1.32j*. National Institute of Health, USA.
- Renssen, H., Seppa, H., Heiri, O., Roche, D.M., Goosse, H. & Fichet, T. (2009) The spatial and temporal complexity of the Holocene thermal maximum. *Nature Geosci*, **2**, 411-414.
- Rzedowski, J. (1998) Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. *Diversidad biológica de México: orígenes y distribución* (ed. por T.P. Ramammorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa), pp. 129-145. Instituto de Biología, UNAM, México.
- Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. Page 504 pp. en. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México D.F.
- Sadori, L. & Giardini, M. (2007) Charcoal analysis, a method to study vegetation and climate of the Holocene: The case of Lago di Pergusa (Sicily, Italy). *Geobios*, **40**, 173-180.
- Scott, A.C. (2010) Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **291**, 11-39.
- Sheskin, D.J. (2003) *Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures*. CHAPMAN & HALL/CRC.
- Suárez-Mota, M., Téllez-Valdés, O., Lira-Saade, R., Villaseñor, J.L. (2013) Una regionalización de la Faja Volcánica Transmexicana con base en su riqueza florística. *Botanical Sciences*, **91**, 93-105.
- Torres-Rodríguez, E., Lozano-García, S., Figueroa-Rangel, B.L., Ortega-Guerrero, B. & Vázquez-Castro, G. (2012) Cambio ambiental y respuestas de la vegetación de los últimos 17,000 años en el centro de México: el registro del lago de Zirahuén *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **29**, 764-778.

- Velasco, M., Arellano, J., Silva-Pineda, A., Yussim, S. (2007) Aspectos geológicos y paleontológicos. *Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana* (ed. por I. Luna, Morrone, J.J., Espinosa, D.), pp. 25-38. Mexico, D.F., CONABIO-UNAM.
- Vidal-Zepeda, R. (2005) *Las regiones climáticas de México*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Weng, C. (2005) An improved method for quantifying sedimentary charcoal via a volume proxy. *The Holocene*, **15**, 298-301.
- Whitlock, C., and Larsen, C.P.S. (2001) Charcoal as a Fire Proxy. *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Volume 3 Terrestrial, algal, and siliceous indicators* (ed. por J.P. Smol, Birks, H.J.B., Last, W.M.), pp. 75-97. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Whitlock, C., and Millspaugh, S. (1996) Testing the assumptions of fire-history studies: an examination of modern charcoal accumulation in Yellowstone National Park, USA. *The Holocene*, **6**, 7:15.
- Whitlock, C., Anderson, R.S. (2003) Fire history reconstructions based on sediment records from lakes and wetlands. *Ecological Studies* (ed. por T.T. Veblen, Baker, W.L., Montenegro, G., Swetnam, T.W.), pp. 3-31. Springer-Verlag, New York.
- Whitlock, C., Skinner, C.N., Bartlein, P.J., Minckley, T.A., Mohr, J.A. (2004) Comparison of charcoal and tree-ring records of recent fires in the eastern Klamath Mountains California, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, **34**, 2110-2121.
- Wilson, E.M. (1980) Physical geography of the Yucatan Peninsula. *Yucatan: a world apart* (ed. por E.H. Moseley y E.D. Terry), pp. 5-40. The University of Alabama Press, Tuscaloosa.
- Young, D., Benaglia, T., Chauveau, D., Hunter, D., Elmore, R., Hettmansperger, T., Thomas, E. & Xuan, F. (2014) *Package "mixtools". Tools for analyzing finite mixture models*.
- Zar, J.H. (1999) *Biostatistical Analysis*, 4th edn. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.

9. ANEXOS

ANEXO 1. Datos ambientales y de ubicación de los lagos muestreados para este trabajo.

Tabla A1. Datos de localización y variables ambientales: Precipitación Media Anual (PMA) y Temperatura Media Anual (TMA) de los cuerpos de agua incluidos en este trabajo. Los cuerpos de agua se presentan en orden alfabético.

#	Zona	Nombre	Lat.	Long.	Vegetación	Altitud (m.s.n.m.)	PMA (mm)	TMA (°C)
1	PY	5 Lagos S	16.15	-91.69	Bosque húmedo	1534	2578	20.3
2	PY	5 Lagos B	16.11	-91.68	Bosque húmedo	1534	2687	20.2
3	FVT	Alberca	19.21	-101.46	Bosque de Pino-Encino	1475	1143	18
4	FVT	Alchichica	19.41	-97.4	Matorral	2330	399	13.6
5	FVT	Aljojuca	19.09	-97.54	Agricultura	2379	624	13.2
6	PY	Amarillo	16.98	-91.6	Selva	855	2057	25.6
7	FVT	Atezca	20.81	-98.75	Bosque húmedo	1288	467	20.4
8	PY	Atitlán	14.73	-91.16	Bosque de Pino-Encino	1602	2500	18
9	FVT	Atlangatepec	19.55	-98.16	Bosque de Pino	2487	657	13.6
10	PY	Bacab	17.56	-88.36	Selva	15	1918	25.6
11	PY	Belice	17.31	-88.49	Selva	23	1665	24.6
12	PY	Candelaria	18.18	-91.05	Pastizal	37	1435	26.3
13	PY	Cayucón	18.04	-90.98	Pastizal	42	1520	26.2
14	PY	Celestún	20.86	-90.38	Selva	1	861	26.3
15	PY	Cenote Timul	20.59	-89.36	Selva	15	1079	25.9
16	PY	Chacan Lara	18.48	-89.09	Selva	132	1072	25.4
17	PY	Chichancanab	19.88	-88.77	Selva	3	1120	25.7
18	PY	Cobá	20.5	-87.74	Selva	12	1282	25.7
19	PY	Colon_lake 1	15.83	-91.89	Pastizal	634	2593	19.7
20	PY	Colon_lake 2	15.83	-91.89	Pastizal	634	2593	19.7
21	PY	Colon_lake 3	15.83	-91.9	Pastizal	630	2593	19.7
22	PY	Colon_lake 4	15.83	-91.9	Pastizal	630	2593	19.7
23	PY	Colon_lake 5	15.83	-91.89	Pastizal	630	2593	19.7
24	PY	Crooked_Tree	17.78	-88.53	Pastizal	2	1705	25.6
25	PY	Escondido	16.11	-91.68	Pastizal	1515	2687	20.2
26	PY	Esmeralda	16.12	-91.73	Bosque húmedo	1471	3793	23.6
27	PY	Gemelas	16.09	-91.64	Bosque húmedo	1458	2809	20.1

28	PY	Gloria	16.95	-90.37	Bosque húmedo	131	2452	25.9
29	PY	Golfete	15.67	-88.96	Manglar	19	3019	25.5
30	PY	Güija	14.25	-89.55	Bosque seco	452	2116	22.1
31	PY	Ixlú	16.97	-89.69	Bosque húmedo	129	2091	25.1
32	PY	Izabal	15.46	-89.11	Bosque húmedo	1	2881	24.9
33	PY	Kichayil	16.1	-91.66	Bosque húmedo	1530	2764	20.1
34	PY	Lacandón	17.02	-91.6	Selva	810	2057	25.6
35	PY	Laguna Perdida	17.07	-90.21	Bosque húmedo	76	2260	25.9
36	PY	Las Pozas	16.34	-90.17	Bosque húmedo	154	3161	26
37	PY	Loché	21.42	-88.14	Pastizal	7	1015	25.5
38	PY	Macanché	16.97	-89.63	Bosque húmedo	166	2036	24.9
39	FVT	Metztitlán	20.68	-98.87	Matorral	1255	467	20.4
40	PY	Montebello	16.11	-91.71	Bosque húmedo	1539	2601	20.1
41	PY	Na ha Atrás	16.98	-91.6	Bosque húmedo	829	1928	22.5
42	PY	Na ha Canal	16.98	-91.6	Bosque húmedo	858	1928	22.5
43	PY	Ocotalito	16.95	-91.6	Bosque húmedo	920	1928	22.5
44	PY	Oquevix	16.66	-89.74	Bosque húmedo	157	2578	25
45	FVT	Parangueo	20.43	-101.25	Agricultura	1687	529.5	19.1
46	FVT	Pátzcuaro	19.56	-101.63	Bosque de Pino-Encino	2041	918.8	16.5
47	PY	Peten Itzá	17.01	-89.86	Bosque húmedo	111	2176	25.4
48	PY	Pojoj	16.1	-91.67	Bosque húmedo	1537	2687	20.2
49	FVT	Preciosa	19.37	-97.39	Matorral	2340	403	12.8
50	FVT	Quechulac	19.37	-97.35	Bosque de Pino	2333	403	12.8
51	PY	Rosada	21.34	-89.3	Manglar	1	668	25.7
52	PY	Rosario	16.53	-90.16	Bosque húmedo	115	2908	25.9
53	PY	Sabanita	18.4	-88.57	Selva	30	2908	25.9
54	PY	Sacpuy	16.98	-90.02	Bosque húmedo	122	2908	25.9
55	PY	Salpetén	16.98	-89.68	Bosque húmedo	106	2908	25.9
56	PY	San Francisco Kaná	20.86	-90.12	Selva	6	824	26.2
57	PY	San Francisco Mateos	17.9	-90.66	Selva	53	1578	26
58	PY	San José Aguilar	18.37	-89.01	Selva	125	1187	25.2
59	FVT	San Miguel Tecuitlapa	19.12	-97.54	Agricultura	2368	729	14.5
60	FVT	Tacámbaro	19.21	-101.47	Bosque de Pino-Encino	1517	1143	18
61	FVT	Tecomulco	19.88	-98.42	Agricultura	2547	755	13.5
62	FVT	Teremendo	19.81	-101.45	Bosque de Pino-Encino	2058	665.5	16.8

63	FVT	Toluca Luna	19.11	-99.75	Bosque de Pino	4218	1213	3.8
64	FVT	Toluca Sol	19.11	-99.76	Bosque de Pino	4206	1213	3.8
65	PY	Yalahau	20.66	-89.22	Selva	11	1099	25.9
66	PY	Yalaluch	16.09	-91.65	Bosque húmedo	1148	2764	20.1
67	PY	Yaxhá	17.07	-89.41	Bosque húmedo	164	1762	24.7
68	FVT	Yuriria	20.24	-101.13	Matorral	1730	667.4	19.1
69	FVT	Quila	19.05	-99.31	Bosque de Oyamel	2804	1348	11.3
70	FVT	Tonatihua	19.05	-99.31	Bosque de Pino	2832	1509	10.4
71	FVT	Zempoala	19.06	-99.31	Bosque de Pino	2817	1509	10.4
72	FVT	Zirahuén	19.45	-101.73	Bosque de Encino	2082	1161	16.2

ANEXO 2. Fechas de muestreo de sedimentos en los cuerpos de agua.

Tabla A2. Fecha de muestreo de sedimentos en cuerpos de agua del centro de México. El año de muestreo más antiguo en esta región fue 2010.

#	Nombre	Fecha
3	Alberca	18/06/2011
4	Alchichica	11/06/2011
5	Aljojuca	13/06/2011
7	Atezca	09/06/2011
9	Atlangatepec	15/10/2011
39	Metztlán	10/06/2011
45	Parangueo	15/10/2011
46	Pátzcuaro	19/06/2011
49	Preciosa	11/06/2011
50	Quechulac	12/06/2011
59	San Miguel Tecuitlapa	15/10/2011
60	Tacámbaro	17/06/2011
61	Tecocomulco	10/06/2011
62	Teremendo	21/06/2011
63	Toluca Luna	15/11/2010
64	Toluca Sol	15/11/2010
68	Yuriria	16/06/2011
69	Quila	08/06/2011
70	Tonatihua	08/06/2011
71	Zempoala	08/06/2011
72	Zirahuén	20/06/2011

Tabla A3. Fecha de muestreo de sedimentos en cuerpos de agua del sureste de México. . El año de muestreo más antiguo en esta región fue 2005.

#	Nombre	Fecha	#	Nombre	Fecha
1	5 Lagos S	15/07/2008	32	Izabal	21/11/2005
2	5 Lagos B	15/07/2008	33	Kichayil	15/07/2008
6	Amarillo	15/07/2012	34	Lacandón	15/07/2012
8	Atitlán	09/02/2008	35	Laguna Perdida	27/11/2005
10	Bacab	30/05/2007	36	Las Pozas	23/02/2008
11	Belice	03/12/2005	37	Loché	16/03/2008
12	Candelaria	09/03/2008	38	Macanche	03/02/2006
13	Cayucón	09/03/2008	40	Montebello	15/07/2012
14	Celestún	13/03/2008	41	Na ha Atrás	15/07/2012
15	Cenote Timul	14/03/2008	42	Na ha Canal	15/07/2012
16	Chacan Lara	06/03/2008	43	Ocotalito	15/07/2012
17	Chichancanab	13/12/2005	44	Oquevix	18/02/2008
18	Coba	17/03/2008	47	Petén Itzé	23/11/2005
19	Colon_lake 1	15/07/2008	48	Pojoj	15/07/2008
20	Colon_lake 2	15/07/2008	51	Rosada	08/03/2008
21	Colon_lake 3	15/07/2008	52	Rosario	25/02/2008
22	Colon_lake 4	15/07/2008	53	Sabanita	05/03/2008
23	Colon_lake 5	15/07/2008	54	Sacpuy	19/02/2008
24	Crooked_Tree	07/12/2005	55	Salpetén	20/02/2008
25	Escondido	15/07/2008	56	San Francisco Kaná	13/03/2008
26	Esmeralda	15/07/2012	57	San Francisco Mateos	08/03/2008
27	Gemelas	15/05/2008	58	San José Aguilar	05/03/2008
28	Gloria	21/02/2008	65	Yalahau	15/03/2008
29	Golfete	17/02/2008	66	Yalaluch	15/07/2012
30	Güija	12/02/2008	67	Yaxhá	25/02/2006
31	Ixlú	24/03/2008			

ANEXO 3. Parámetros calculados de las distribuciones de señal de fondo y señal de incendios.

Tabla A4. Parámetros de las distribuciones de partículas de material carbonizado en lagos del centro de México.

#	Señal de fondo		Señal de incendios				
	Umbral	$\lambda 1$	$\mu 1$	$\sigma 1$	$\lambda 2$	$\mu 2$	$\sigma 2$
3	0.00765	0.74552	0.00491	0.00197	0.25448	0.02759	0.02685
4	0.00509	0.63274	0.00334	0.00123	0.36726	0.02938	0.02059
5	0.00843	0.76857	0.00442	0.00250	0.23143	0.02739	0.02032
7	0.00576	0.61047	0.00329	0.00168	0.38953	0.01391	0.00662
9	0.00427	0.49824	0.00330	0.00134	0.50176	0.09441	0.09502
39	0.00639	0.62765	0.00411	0.00164	0.37235	0.12810	0.09441
45	0.00685	0.57423	0.00451	0.00240	0.42577	0.26695	0.22545
46	0.00592	0.71455	0.00368	0.00159	0.28545	0.03690	0.03392
49	0.02069	0.33557	0.00323	0.00149	0.66443	0.02093	0.01715
50	0.00629	0.63720	0.00435	0.00160	0.36280	0.03193	0.02814
59	0.00584	0.77150	0.00374	0.00183	0.22850	0.07249	0.15077
60	0.00543	0.72220	0.00350	0.00132	0.27780	0.02882	0.02456
61	0.00786	0.81735	0.00457	0.00219	0.18265	0.08608	0.11519
62	0.00829	0.67894	0.00441	0.00258	0.32106	0.04008	0.02855
63	0.05112	0.85210	0.02246	0.01662	0.14790	0.16806	0.16665
64	0.00636	0.88442	0.00369	0.00140	0.11558	0.20678	0.16987
68	0.00661	0.72707	0.00371	0.00165	0.27293	0.08579	0.05760
69	0.00714	0.66379	0.00438	0.00187	0.33621	0.02534	0.01624
70	0.01235	0.84741	0.00477	0.00295	0.15259	0.02291	0.00574
71	0.00440	0.55597	0.00356	0.00138	0.44403	0.03601	0.05765
72	0.00546	0.59482	0.00435	0.00194	0.40518	0.11539	0.19852
73	0.01003	0.68575	0.00615	0.00259	0.31425	0.30106	0.21234

Tabla A5. Parámetros de las distribuciones de partículas de material carbonizado en cuerpos de agua del sureste de México.

Lago	Umbral	Señal de fondo			Señal de incendios		
		$\lambda 1$	$\mu 1$	$\sigma 1$	$\lambda 2$	$\mu 2$	$\sigma 2$
8	0.00847	0.71764	0.00482	0.00212	0.28236	0.04914	0.03168
30	0.00489	0.75289	0.00316	0.00097	0.24711	0.01120	0.00514
12	0.00705	0.80986	0.00426	0.00226	0.19014	0.14735	0.29372
13	0.00815	0.71413	0.00632	0.00176	0.28587	0.21544	0.25407
19	0.00581	0.48892	0.00401	0.00111	0.51108	0.05069	0.03249
20	0.01204	0.53078	0.00642	0.00266	0.46922	0.02799	0.00773
21	0.01000	0.67612	0.00496	0.00327	0.32388	0.02939	0.01691
22	0.00711	0.69286	0.00449	0.00199	0.30714	0.04550	0.04397
23	0.00645	0.57818	0.00438	0.00166	0.42182	0.02914	0.02060
24	0.00549	0.80864	0.00341	0.00107	0.19136	0.01673	0.00903
25	0.00620	0.68729	0.00431	0.00178	0.31271	0.09352	0.12213
37	0.00641	0.48242	0.00437	0.00215	0.51758	0.13629	0.14430
6	0.00861	0.71811	0.00488	0.00246	0.28189	0.10504	0.08786
10	0.00451	0.71934	0.00274	0.00116	0.28066	0.06774	0.05528
11	0.00639	0.72410	0.00356	0.00170	0.27590	0.02950	0.01954
14	0.06181	0.40733	0.00467	0.00157	0.59267	0.10822	0.09487
15	0.00834	0.68763	0.00539	0.00275	0.31237	0.17807	0.22405
16	0.00654	0.50291	0.00442	0.00188	0.49709	0.02910	0.01944
17	0.01018	0.51555	0.00628	0.00338	0.48445	0.02148	0.01001
18	0.00927	0.78285	0.00472	0.00243	0.21715	0.12662	0.08722
34	0.00369	0.57252	0.00307	0.00073	0.42748	0.02461	0.02740
53	0.00802	0.71521	0.00443	0.00176	0.28479	0.04756	0.02382
56	0.00719	0.72131	0.00426	0.00240	0.27869	0.43120	0.37468
57	0.00545	0.65810	0.00461	0.00214	0.34190	0.32561	0.52586
58	0.00620	0.67748	0.00349	0.00153	0.32252	0.04998	0.02970
65	0.00704	0.59223	0.00471	0.00207	0.40777	0.03248	0.02756
29	0.00468	0.56641	0.00309	0.00109	0.43359	0.03381	0.02103
51	0.00682	0.86416	0.00374	0.00158	0.13584	0.08095	0.06813
1	0.00656	0.49404	0.00519	0.00205	0.50596	0.10569	0.12559
2	0.00624	0.66242	0.00316	0.00240	0.33758	0.03825	0.03533
26	0.00842	0.77648	0.00507	0.00224	0.22352	0.17227	0.17008

27	0.00569	0.61427	0.00404	0.00212	0.38573	0.34094	0.37451
28	0.03506	0.96306	0.01229	0.00930	0.03694	0.11107	0.10056
31	0.00563	0.80351	0.00384	0.00149	0.19649	0.29917	0.34498
32	0.01049	0.64917	0.00475	0.00249	0.35083	0.02045	0.00486
33	0.01776	0.89890	0.00767	0.00541	0.10110	0.04666	0.05082
35	0.00781	0.69325	0.00459	0.00220	0.30675	0.04981	0.04019
36	0.00582	0.62682	0.00453	0.00181	0.37318	0.10499	0.16830
38	0.00921	0.62226	0.00519	0.00246	0.37774	0.04065	0.02233
40	0.01615	0.83291	0.00791	0.00482	0.16709	0.04903	0.04147
41	0.00921	0.91077	0.00435	0.00212	0.08923	0.11980	0.08681
42	0.00599	0.69048	0.00320	0.00163	0.30952	0.09716	0.06340
43	0.00475	0.68987	0.00360	0.00174	0.31013	0.19287	0.34838
44	0.00713	0.63053	0.00444	0.00200	0.36947	0.11938	0.09327
47	0.00785	0.85421	0.00442	0.00196	0.14579	0.04369	0.04733
48	0.01484	0.57265	0.00842	0.00501	0.42735	0.03669	0.01945
52	0.00737	0.73051	0.00485	0.00256	0.26949	0.26606	0.36509
54	0.00998	0.73580	0.00542	0.00279	0.26420	0.04537	0.03215
55	0.00694	0.79950	0.00386	0.00166	0.20050	0.02541	0.01599
66	0.00790	0.73830	0.00534	0.00206	0.26170	0.05891	0.07895
67	0.00671	0.72829	0.00424	0.00147	0.27171	0.02747	0.01745