

Evaluación de combustibles y su disponibilidad en incendios forestales: un estudio en el Parque Nacional La Malinche

Julio César Wong González*
María de Lourdes Villers Ruiz**

Recibido: 31 de enero de 2006
Aceptado en versión final: 23 de junio de 2006

Resumen. Estudios sobre peligro y combate de incendios forestales consideran la interacción entre los factores meteorológicos y las características de los combustibles. Por ello, se analizó la humedad de los combustibles muertos sobre el suelo, la cual depende de su diámetro y de la humedad relativa principalmente. Se analizaron combustibles de 0.6 a 2.5 y de 2.6 a 7.5 cm de diámetro en las comunidades donde predominan especies de los géneros: *Quercus*, *Alnus*, *Abies* y *Pinus* del Parque Nacional Malinche, Tlaxcala, México. Los resultados demuestran: a) que la humedad de los combustibles varió de acuerdo con las condiciones atmosféricas en los diferentes sitios y horarios, b) que los combustibles con mayor diámetro tuvieron una menor relación entre la superficie de exposición al medio y su volumen ($120 \text{ m}^2/\text{m}^3$) y que los de menor diámetro la relación aumentó ($235 \text{ m}^2/\text{m}^3$), teniendo estos últimos una mayor probabilidad de incendiarse. Durante la temporada de incendios en los meses de febrero, marzo y abril, la humedad de los combustibles en *Alnus jorullensis* y *Pinus montezumae* fue mayor a 25% que es aquella que impide la combustión, conocida como humedad de extinción. En *Quercus crassipes*, *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa*-*Pinus teocote*, la humedad de los combustibles fue menor a 25% por lo que fueron las comunidades más vulnerables a incendios.

Palabras clave: Combustibles forestales, incendios forestales, tiempo atmosférico, Parque Nacional Malinche.

Fuels assessment and its availability in forest fire: a study in the Malinche National Park

Abstract. Studies of forest fire danger and control considers the interaction between the weather factors and fuels characteristics. The fuels moisture was evaluated in relation on its diameter and the relative humidity. Fuels from 0.6 to 2.5 and from 2.6 to 7.5 cm of diameter were analyzed in the communities where dominate genera was: *Quercus*, *Alnus*, *Abies* and *Pinus* at National Park Malinche, Tlaxcala, Mexico. The results show: a) the fuels moisture content varied according

* Departamento de Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510 México, D. F. E-mail: wg_jc@yahoo.com.mx

** Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510 México, D. F. E-mail: villersruiz@yahoo.com.mx

to the atmospheric conditions in different places and hourly, *b*) the fuels with greater diameter had a smaller relation between the exposition surface and its volume (120 m²/m³) and for the smaller diameter the relation enlarged (235 m²/m³), having a greater probability of ignition. During the fires season in the months of February, March and April, the fuels moisture content in *Alnus jorullensis* and *Pinus montezumae* was greater to 25% where the combustion is not produced, this is the humidity of extinction. In *Quercus crassipes*, *Pinus hartwegii* and *Abies religiosa*-*Pinus teocote*, the fuels moisture was smaller to 25% these communities were more vulnerable to fires hazard.

Key words: Forest fuel, forest fires, weather, Malinche National Park.

INTRODUCCIÓN

La ocurrencia y el comportamiento de los incendios forestales están influidos principalmente por factores como: características de los combustibles, clima, tiempo atmosférico y topografía del lugar (DeBano, 1998). Se considera como combustible todo material vegetal inflamable, tanto de los estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo, así como de la biomasa muerta que se encuentra sobre el suelo. Los combustibles se pueden dividir en vivos y muertos; los combustibles muertos, que se encuentran situados sobre el suelo, son los que se estudian en este trabajo y por el diámetro que presentan se dividen en delgados (hojas y ramillas finas), medianos (ramillas y ramas) y gruesos (ramas gruesas y troncos) como se muestra en la Tabla 1. Los combustibles delgados arden más fácilmente que los gruesos y su inflamabilidad está en función principalmente de su contenido de humedad, por lo tanto es imposible que la madera arda mientras esté húmeda (Rodríguez, 1994).

Los principales atributos de los combustibles forestales comprenden cantidad, tamaño y forma, así como su distribución o arreglo horizontal y vertical sobre la superficie, su contenido de sustancias químicas, la densidad de la madera y el contenido de humedad que presentan (Porrero, 2001).

El contenido de humedad de un combustible es la cantidad de agua, expresada como un porcentaje del peso que tiene con respecto al peso seco del mismo. Los combustibles muertos tienen la propiedad de ser materiales higroscópicos, es decir, poseen la capacidad de adsorber humedad del aire, por lo que su contenido de humedad está determinado por la humedad relativa (Echenique y Robles, 1993). La humedad de los combustibles muertos depende de su tamaño y grosor, es decir, existe una relación directa entre la superficie del combustible y el volumen de agua que presentan, esto es, a mayor superficie expuesta al ambiente mayor cantidad de humedad absorberá de éste. Esta relación determina

Tabla 1. Clasificación de combustibles, modificado de Rodríguez *et al.* (2002)

Clase	Diámetro*	Tipo de combustible	
1	Menor a 0.6 cm	hojas, ramillas finas	delgados
2	De 0.6 a 2.5 cm	ramillas	medianos
3	De 2.6 a 7.5 cm	ramas	
4	Mayor a 7.5 cm	ramas gruesas, troncos	gruesos

*Originalmente el diámetro de los combustibles se estableció en medidas inglesas, aquí se expone el correspondiente en el sistema métrico.

el tiempo de retardo de los combustibles (Fosberg, 1977), que es el tiempo que tardan en perder o ganar aproximadamente dos tercios (66%) de la diferencia entre el contenido de humedad inicial y el del ambiente, bajo condiciones de secado estándar con una humedad relativa de 20% y una temperatura de 27° C (Fosberg, 1971). Se ha determinado que, en general, cuando los combustibles muertos tienen un contenido de humedad por debajo del 25% estarán disponibles para arder. Si el porcentaje de humedad de los combustibles es más alto, normalmente la combustión no se produce, por lo tanto, se define como humedad de extinción a aquélla que impide la combustión (Vélez, 2000).

Las variables del clima y tiempo atmosférico que determinan en parte el contenido de humedad de los combustibles y que están estrechamente relacionadas son: *a*) precipitación y humedad relativa, *b*) temperatura, *c*) viento y *d*) radiación solar. Estas variables y los combustibles, determinan en cierta medida el comportamiento del fuego y la inflamabilidad de los combustibles (Bessie y Johnson, 1995). Conforme el día avanza la temperatura asciende y la humedad relativa desciende progresivamente teniendo como resultado una pérdida en el contenido de humedad de los combustibles muertos incrementando la probabilidad de incendios. Cuando llueve o hay neblina la humedad relativa es del orden de 100%, este porcentaje varía durante el día y de un lugar a otro. En ambientes secos, la humedad llega a alcanzar niveles de 20% o menos, una humedad relativa del 40% es comúnmente el valor que representa el punto de peligro de incendio (García y García, 1987).

El contenido de humedad de los combustibles y la humedad relativa son de los factores más importantes en la probabilidad de que ocurra un incendio no premeditado y determinan su comportamiento una vez producido. Por lo tanto, su estudio es de gran importancia para suministrar información dirigida a propuestas referentes al control y

combate de los incendios forestales, así como la disponibilidad de estos materiales para incendiarse. Asimismo, la caracterización de los combustibles y su humedad es importante para implementar modelos de simulación del comportamiento del fuego. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue analizar la relación que existe entre la humedad de los combustibles y su disponibilidad, así como su relación con los incendios forestales, en cuatro tipos de comunidades vegetales en el Parque Nacional Malinche.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área en estudio

El Parque Nacional Malinche se ubica en la zona centro-oriente de México y forma parte de la Cordillera Volcánica Transmexicana. La estructura volcánica abarca poco más de 25 km de diámetro y se eleva aproximadamente de los 2300 a los 4461 msnm. Se localiza entre los 19°06'04'' y 19°20'06'' de latitud norte y los 97°55'41'' y 98°10'52'' de longitud oeste. La vegetación del parque corresponde a bosques con elementos templados, entre los que sobresalen los compuestos por los géneros *Quercus*, *Alnus*, *Abies*, y *Pinus*. De acuerdo con Peña del Valle (2003), la comunidad de *Abies* presenta una superficie de 544 ha, la de *Abies-Pinus* 1341 ha y la de *Pinus* 13582 ha. La comunidad de *Alnus-Pinus* cuenta con una superficie de 514 ha, y en la de *Quercus-Pinus* es de 3787 ha. La zona de agricultura de temporal abarca una gran superficie dentro del parque con 23225 ha.

Trabajo de campo

Con base en el mapa de uso del suelo y vegetación propuesto por Peña del Valle (*op. cit.*), se seleccionaron seis tipos de comunidades vegetales cuyas especies más representativas fueron: *Quercus crassipes*, *Alnus jorullensis*, *Abies religiosa*, *Abies religiosa-Pinus teocote*, *Pinus hartwegii* y *Pinus montezumae*.

En cada comunidad se establecieron tres círculos de muestreo con un diámetro de 35.6 m (0.1 ha) y separados a una distancia de 50 m, modificado de Brown (1974). De acuerdo con la clasificación establecida de los combustibles (Tabla 1), se consideraron para este trabajo dos clases según su diámetro: clase 2 (de 0.6 a 2.5 cm) y clase 3 (de 2.6 a 7.5 cm), ya que estas clases de combustibles son comúnmente utilizadas por el Sistema Nacional de Peligro de Incendios Forestales de Estados Unidos (NFDRI de sus siglas en inglés), para evaluar el comportamiento y peligro de incendios (Haines y Frost, 1978). Por círculo se midieron 50 piezas de combustibles por clase durante cada muestreo y a cada pieza se le registró su diámetro, peso y longitud, la cual se acotó a una medida promedio de 30 cm, y el peso se obtuvo utilizando una balanza digital con una capacidad de 1 000 g y una sensibilidad de 0.1 g. El muestreo de combustibles se realizó cada 30 días durante el período entre septiembre 2003 y mayo 2004, teniendo un total de ocho muestreos. La clase 1 (menor a 0.6 cm) así como la clase 4 (mayor a 7.5 cm) no fueron consideradas, ya que de acuerdo con Porrero (2001) la humedad de los combustibles delgados llega a estar más rápidamente en equilibrio con el ambiente que los más gruesos, por lo que se requiere establecer una metodología distinta para su monitoreo.

Relación superficie/volumen

Debido a que existe una relación entre el volumen de los combustibles y la cantidad de agua que pueden contener, la cual es importante para la disponibilidad de incendiarse, se calculó la relación superficie/volumen de las dos clases de combustibles estudiadas. Se utilizaron las siguientes fórmulas para el cálculo de volumen (1) y superficie (2):

$$V = \pi r^2 h \quad (1)$$

$$S = 2 \pi r h + 2 \pi r^2 \quad (2)$$

donde:

V = volumen

S = superficie

$\pi = 3.1416$

r = radio

h = altura o longitud

Análisis de datos meteorológicos

Se seleccionaron cinco estaciones meteorológicas correspondientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) cercanas al Parque (Tlaxcala, Apizaco, Huamantla, Teolocho y Zitlaltepec), de las cuales se analizó la temperatura y precipitación mensual y diaria para el período de septiembre 2003 a mayo 2004 (SMN, 2000). Asimismo, se analizaron las variables temperatura y humedad relativa mensual y diaria de cinco estaciones automáticas Vantage Pro-Davis (Figura 1), que fueron instaladas aproximadamente a una altitud de 3 000 msnm en diferentes laderas del volcán (Villers, 2001).

Trabajo de laboratorio y análisis de datos

Para calcular la humedad de los combustibles a partir de su peso registrado en campo, se obtuvo en laboratorio el contenido de humedad base (CH %) de las dos clases de combustibles. En cada comunidad se colectaron diez muestras de combustibles leñosos por clase y fueron secadas en un horno a una temperatura de 60° C (Norum y Fischer, 1980). El contenido de humedad se calculó de acuerdo con Echenique y Robles (1993) a partir de la fórmula (3):

$$CH \% = \frac{PI - PA}{PA} \times 100 \quad (3)$$

donde:

CH % = contenido de humedad base expresado en porcentaje

PI = peso inicial del combustible (g)

PA = peso seco del combustible (g)

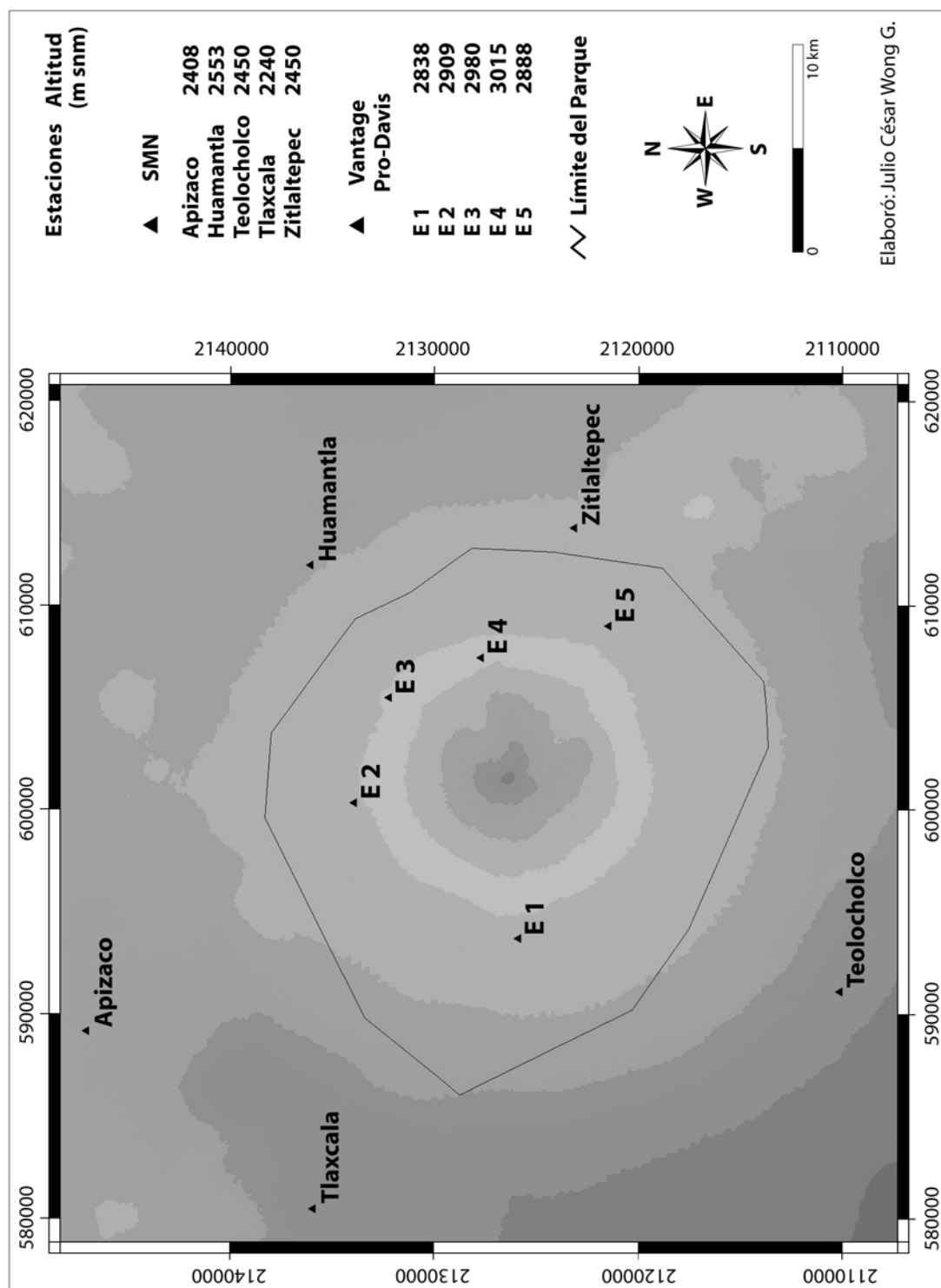


Figura 1. Estaciones meteorológicas en el Parque Nacional La Malinche.

Utilizando los valores de humedad base de las muestras de laboratorio, se calculó el contenido de humedad de los combustibles registrados en campo (CHc %) de cada clase. Para lo cual se utilizó la fórmula (4):

$$\text{CHc \%} = \frac{\text{PC} \times \text{CH \%}}{\text{PI}} \quad (4)$$

donde:

CHc % = contenido de humedad en campo expresado en porcentaje

PC = peso de combustibles de campo (g)

CH % = contenido de humedad base expresado en porcentaje

PI = peso inicial del combustible (g)

Para comparar la humedad de los combustibles entre comunidades, se aplicó el análisis de varianza *Kruskal-Wallis* (Wackerly *et al.*, 2002) con un nivel de significancia de 0.05 y una ji-cuadrada establecida en la literatura de $X^2_{0.05} = 3.8414$. La comparación se realizó entre comunidades similares: *Pinus montezumae* y *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa* y *Abies religiosa-Pinus teocote*; y la comunidad de *Quercus crassipes* se comparó con la de *Alnus jorullensis*, ya que ambas son comunidades de plantas latifoliadas aunque con una diferencia en la anatomía de su madera.

Análisis de incendios forestales

Con la base de datos de incendios forestales reportados, proporcionada por la Coordinación de Ecología (Gobierno del Estado de Tlaxcala, 2004), se estableció que los meses en que se presenta la mayoría de los incendios en el parque son a partir de diciembre y hasta el mes de abril. Se analizó tanto el número como la superficie afectada por incendio del período septiembre 2003 a mayo 2004. Las coordenadas de los incendios forestales reportados, se ubicaron en el mapa de uso del suelo y vegetación desarrollado por Peña del Valle (2003), para identificar las áreas dañadas. Finalmente se

relacionaron los meses cuando ocurrieron los incendios, con los combustibles de cada clase y su disponibilidad a incendiarse, esto es, si contenían valores por debajo del 25% de humedad de extinción señalado por Vélez (2000).

RESULTADOS

Relación superficie/volumen de los combustibles

La relación entre la superficie y el volumen en las dos clases de combustibles, fue inversamente proporcional a su diámetro, sin importar el tipo de comunidad vegetal a la que pertenecieran. En la clase 2 (de 0.6 a 2.5 cm) el promedio de la relación fue de 235 m²/m³ y para la clase 3 (de 2.6 a 7.5 cm) fue de 117 m²/m³. Debido a la alta relación superficie/volumen, los combustibles de diámetro pequeño tendrán una mayor superficie de intercambio de energía y humedad en relación con su volumen, lo que les hará perder con rapidez su contenido de humedad y secarse con facilidad, por lo que estarán más disponibles para la combustión. Por el contrario, los combustibles con un mayor diámetro (clase 3) tardarán más tiempo en perder o ganar humedad y por lo tanto arderán con mayor dificultad.

Tiempo atmosférico y condiciones locales

A partir del análisis de temperatura y precipitación mensual y diaria de las estaciones del SMN, se estableció que durante los meses de diciembre y enero se presentaron las temperaturas más bajas de hasta 11.3° C en promedio. Las máximas temperaturas se registraron en mayo con un valor promedio de 17° C. La precipitación promedio de 131 mm a partir de octubre en Teolocholco y Apizaco comenzó a disminuir notoriamente hasta el mes de diciembre. Los valores mínimos reportados de 0 y 1 mm, corresponden a los meses de diciembre y febrero, respectivamente. En el mes de mayo se presentaron los máximos niveles de hasta

181 mm. Debido a una nevada registrada el día 31 de enero de 2004, la precipitación indicada en este mes aumentó en promedio 21 mm en todas las estaciones.

En cuanto a la humedad relativa, el comportamiento entre las cinco estaciones automáticas fue muy variable, así como entre los diferentes meses cuando se llevó a cabo el trabajo de campo. En diciembre, la humedad registrada alcanzó valores del 28 al 38% y para febrero el porcentaje se incrementó entre un 59 y 83%. Durante el mes de abril, la humedad descendió en promedio a un 20%, mientras que en el mes de mayo se registró un aumento significativo entre el 68 y 81% en todas las estaciones. Se encontró que existe una relación inversa entre la humedad relativa y la temperatura, así como grandes variaciones

durante las diferentes horas del día y entre las diferentes laderas del parque. La ladera norte resultó ser la más húmeda entre las 06:00 y las 15:00 hrs, mientras que en la ladera sur se registraron los valores más bajos de humedad y las temperaturas máximas durante el día (Figura 2). De acuerdo con los resultados obtenidos, conforme el día avanza la temperatura asciende y la humedad relativa descende progresivamente, lo cual se relaciona con una pérdida en el contenido de humedad de los combustibles, lo que incrementa el peligro de incendios.

Humedad de los combustibles

El contenido de humedad de los combustibles de la clase 2, presentó una variación promedio

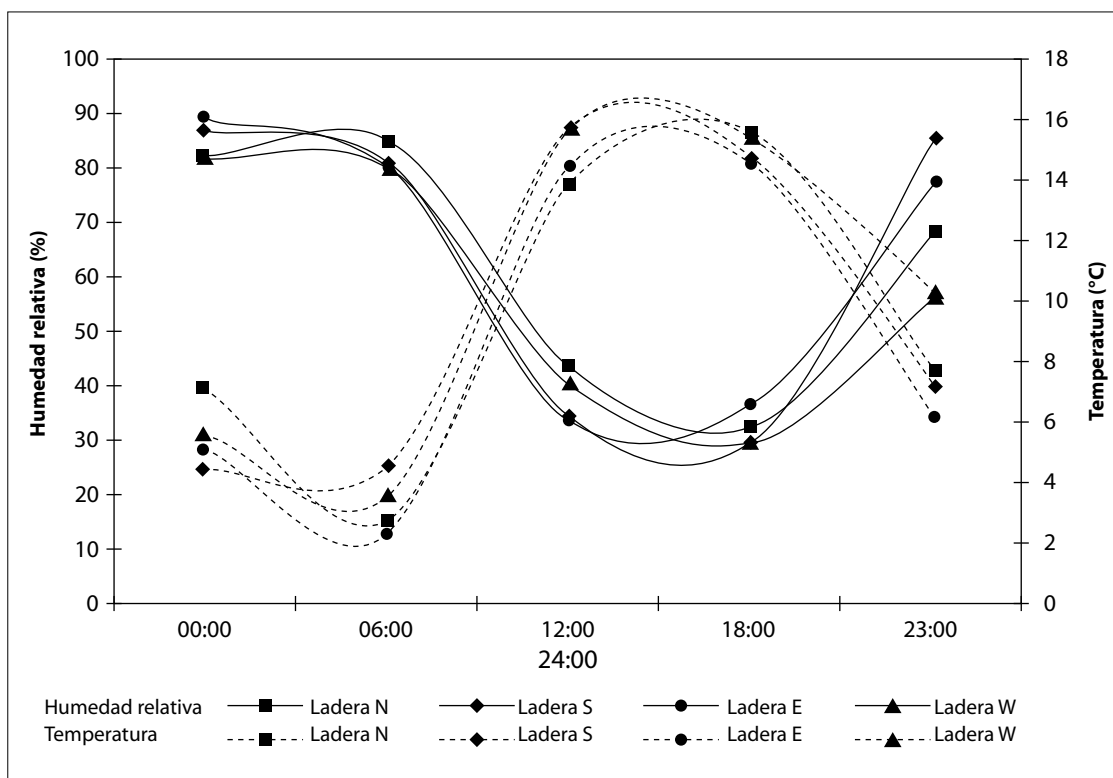


Figura 2. Humedad y temperatura en diferentes horas del día y laderas, estaciones Vantage Pro-Davis.

entre comunidades del 7% durante todos los meses excluyendo la de *Pinus montezumae*, ya que en esta comunidad localizada en la ladera N, la humedad en los combustibles se mantuvo siempre por arriba del 30% (Figura 3). Durante septiembre y hasta abril, la humedad de los combustibles se mantuvo en un rango entre 16 y 25% con una variación de 3% entre los meses, para cada una de las comunidades. A partir de abril los combustibles tuvieron un incremento de humedad significativo, registrándose posteriormente en mayo los máximos porcentajes, en promedio de 36%, lo cual puede estar asociado a la precipitación registrada en este mes. En la comunidad de *Pinus hartwegii*, que se encuentra en la ladera sur, caracterizada por ser más seca y cálida, se encontraron los combustibles más secos.

Para la clase 3 se presentó una mayor variación en la humedad de los combustibles de 15% entre las comunidades y de 8% entre los meses de septiembre a abril (Figura 4). Igual que la clase anterior, la comunidad de *Pinus montezumae* fue la que registró de manera general los niveles más altos de humedad. Los combustibles más secos corresponden a la comunidad de *Pinus hartwegii* con valores promedio de 14%. En septiembre, la humedad de los combustibles fue en promedio de 53% y a partir de este mes se presentó una disminución notable hasta diciembre donde se registraron los valores más bajos de contenido de humedad de 17% en promedio. Del mismo modo que la clase anterior, el contenido de humedad se incrementó aproximadamente en un 40% en mayo en todas las comunidades.

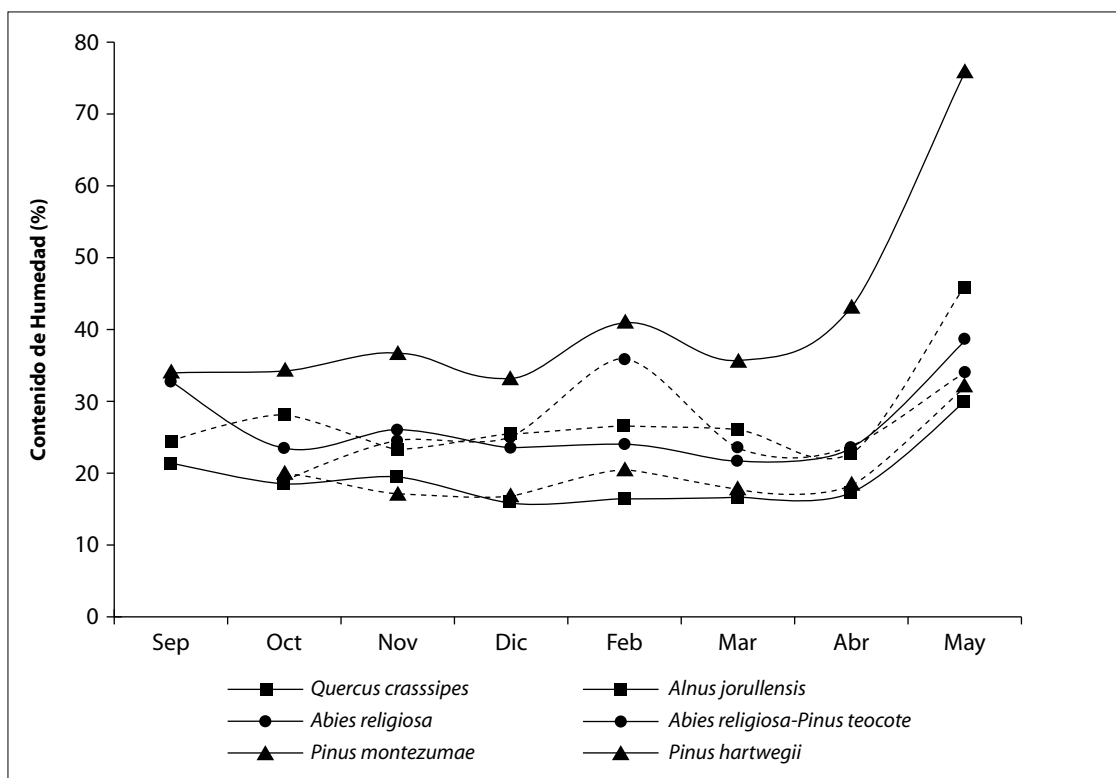


Figura 3. Humedad de los combustibles clase 2.

Los combustibles de la clase 2 en las comunidades *Pinus montezumae*, *P. hartwegii* y *Abies religiosa*-*Pinus teocote* presentaron en febrero un ligero aumento en el contenido de humedad. Asimismo, para la clase 3, el incremento fue aproximadamente del 10% en todas las comunidades. Este aumento en el contenido de humedad de ambas clases fue ocasionado por la nevada registrada el 31 de enero de 2003, que incrementó el porcentaje de humedad relativa del aire, la cual fue absorbida por los combustibles durante los primeros días de febrero.

Comparación entre comunidades

Al analizar la diferencia de humedad del 7% de los combustibles de la clase 2, entre pares de comunidades similares, es decir, *Quercus*

crassipes con *Alnus jorullensis*, *Pinus montezumae* con *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa* con *Abies religiosa*-*Pinus teocote*, se obtuvo que únicamente en las comunidades de *Abies* no hubo diferencia significativa y si para el resto de las comunidades que se relacionaron (Tabla 2). En las comunidades de *Quercus*, *Alnus* y *Pinus* la vegetación presenta una mayor riqueza de especies arbóreas (Flores y Mora, 2005) por lo que consecuentemente se tiene una mayor variación de combustibles. Las dos comunidades de *Abies* no presentaron una diferencia significativa entre sí, ya que el valor de H fue menor que el valor de $\chi^2_{0.05} = 3.8414$ con una p mayor a 0.05.

En los combustibles de la clase 3, todos los valores calculados de H fueron mayores a la $\chi^2_{0.05} = 3.8414$, por lo cual difieren significativa-

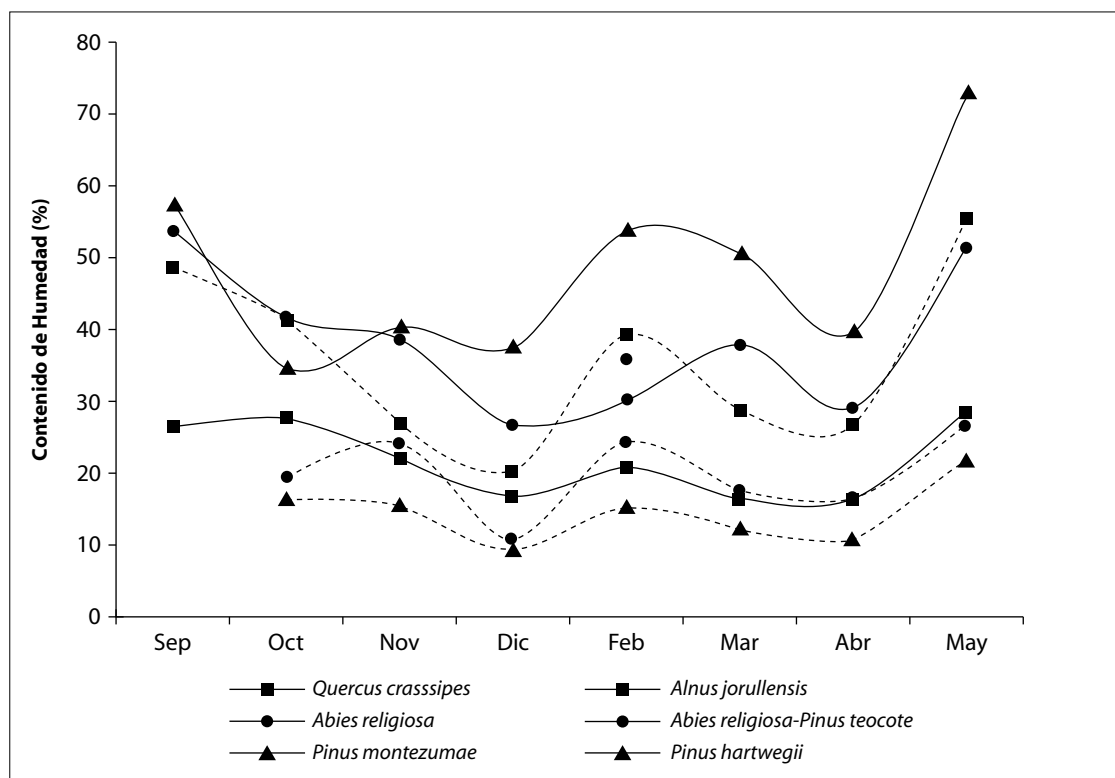


Figura 4. Humedad de los combustibles clase 3.

mente (Tabla 2). Las diferencias de humedad en los combustibles de esta clase fue del 15%, como se señaló con anterioridad.

Ocurrencia de incendios forestales

Con el fin de relacionar el porcentaje de humedad de los combustibles y su disponibilidad a incendiarse con la presencia de los incendios durante el período en estudio, se analizó un total de 127 registros de incendios en el parque, los cuales sucedieron entre enero y abril de 2004. Los meses con el mayor número de incendios fueron marzo con 55 y abril con 49. En enero se registró un mínimo de cuatro incendios, seguido de febrero con 19. En mayo no se presentaron incendios, lo cual está relacionado con el incremento en la precipitación y por consecuencia en la humedad relativa que se presentó en ese mes, de esta manera se elevó la humedad de los combustibles y por lo tanto se dificultó la posibilidad de que pudieran arder. Como se puede observar en la Figura 5, el mayor número de incendios reportados se distribuye en la parte oeste-noroeste del volcán cercano a las poblaciones de San Pablo del Monte, San Isidro Buen Suceso, Papalotla, San Luis Teolocholco y Tlaxcala. En las porciones sur y suroeste correspondientes al estado de Puebla, no se contó con el registro de incendios.

Siguiendo un gradiente altitudinal, la mayoría de los incendios se encuentran entre los 2600 y los 3000 msnm, donde se lleva a cabo una intensa actividad agrícola. Los incendios en las partes superiores a los 3000 m fueron pocos y están relacionados con fogatas mal apagadas, ya que la fecha de registro de estos incendios corresponde con el período vacacional de semana santa en abril.

Las comunidades de *Pinus* fueron las más afectadas por los incendios en donde los pastizales dominan los estratos bajos. Con porcentajes mínimos se encuentran también las comunidades de *Quercus-Pinus* y *Abies-Pinus* que, en suma, representan el 3% de superficie afectada. El 41% se distribuye en los bosques de *Pinus* y *Quercus* colindantes con agricultura de temporal. En la zona de agricultura de temporal se concentra el mayor número de incendios, lo que representa un 55% del total de superficie dañada, ya que tradicionalmente el agricultor tiene la costumbre de realizar quemas de los residuos agrícolas para preparar la cosecha, pero que en ocasiones se salen de control afectando las áreas boscosas (Gobierno de los Estados de Tlaxcala y Puebla, 2001). En algunos casos, la presencia de incendios durante el período de febrero a mayo se debe a la aplicación de fuego a la vegetación favoreciendo con ello la regeneración de

Tabla 2. Valores calculados de ji-cuadrada (X^2)

Comunidad Vegetal	Combustibles clase 2			Combustibles clase 3		
	X^2 (H)	gl	Nivel sig.	X^2 (H)	gl	Nivel sig.
<i>Quercus crassipes</i> con <i>Alnus jorullensis</i>	6.893	1	0.009 *	5.600	1	0.018*
<i>Abies religiosa</i> con <i>Abies religiosa-Pinus teocote</i>	0.013	1	0.908	10.500	1	0.001*
<i>Pinus montezumae</i> con <i>Pinus hartwegii</i>	10.500	1	0.001 *	10.500	1	0.001*

*Nivel de significancia menor a 0.05, las comunidades son diferentes. gl = grados de libertad.

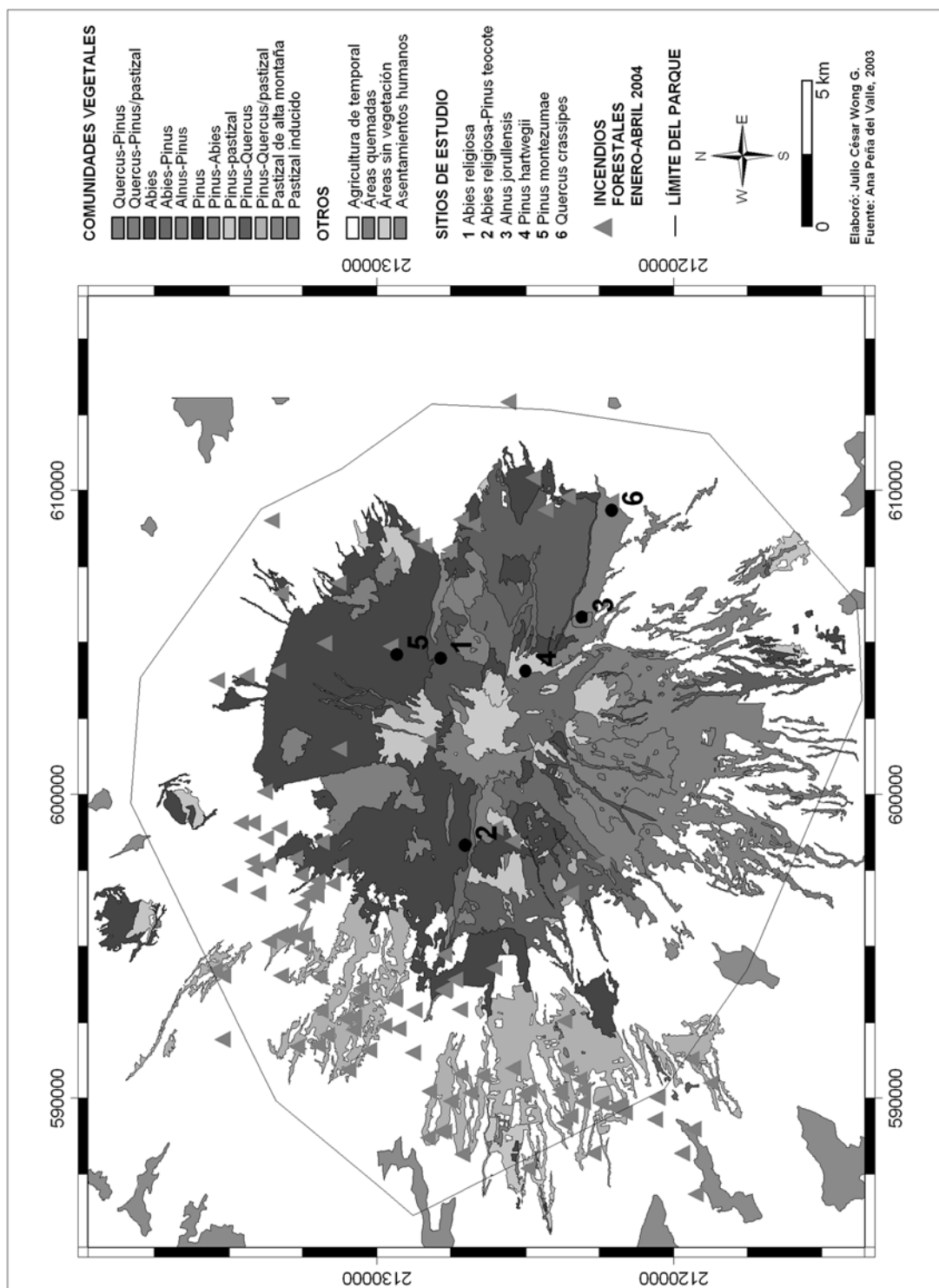


Figura 5. Localización de sitios de estudio e incendios forestales enero-abril 2004.

pastos para la ganadería. En las comunidades de *Quercus-Pinus*-pastizal, *Abies* y *Pinus-Abies*, no hubo registro de incendios.

Relación entre los incendios con la humedad de los combustibles

Tomando en cuenta que el porcentaje de humedad de los combustibles al que pueden arder es igual o menor al 25% (Porrero, 2001), se encontró que durante los meses de febrero, marzo y abril, cuando sucedieron los incendios, los combustibles de la clase 2 en las comunidades *Quercus crassipes*, *Abies religiosa*, *A. religiosa-Pinus teocote* y *Pinus hartwegii*, presentaron una humedad igual o menor del 25%, por lo que se encontraban disponibles para la combustión (Tabla 3). Estos porcentajes mínimos permanecieron en la mayoría de los meses con excepción de mayo. En las comunidades de *Alnus jorullensis* y *Pinus montezumae* la humedad de los combustibles fue mayor al 25%.

Durante los meses de marzo y abril la humedad se mantuvo por debajo de este umbral para la mayoría de las comunidades, lo que incrementó su disponibilidad para la combustión en más de la mitad de ellas, siendo abril el más crítico en casi todas las comunidades con

excepción de *Pinus montezumae*. La humedad de los combustibles en marzo fue menor en comparación con febrero, lo cual se ve reflejado en el número de incendios reportados (19 en febrero y 55 en marzo). En marzo y abril, el contenido de humedad fue similar, así como el número de incendios. La humedad de los combustibles en todas las comunidades en mayo fue de al menos 30%, y no se reportó ningún incendio para este mes. En septiembre, octubre, noviembre y diciembre no se registraron incendios, sin embargo, en algunas comunidades existía la probabilidad de que los combustibles se incendiaran ya que su humedad estaba por debajo del 25%, principalmente la comunidad de *Quercus crassipes* y *Pinus hartwegii*. Aun cuando la Coordinación de Ecología (Gobierno del Estado de Tlaxcala, 2004) no reportó incendios en diciembre de 2003, de acuerdo con el registro general de incendios, éstos se han reportado para algunos años durante ese mes. En *Pinus montezumae*, durante todo el período de estudio, la humedad de los combustibles fue superior al 25%, siendo la comunidad menos probable de incendiarse.

La humedad de los combustibles cuyo diámetro correspondió a la clase 3, se mantuvo igual o por debajo del 25% durante los tres

Tabla 3. Contenido de humedad, combustibles clase 2

Comunidad vegetal	Humedad (%)							
	Sep	Oct	Nov	Dic	Feb*	Mar*	Abr*	May
<i>Quercus crassipes</i>	21	19	20	16	16	17	17	30
<i>Alnus jorullensis</i>	25	28	24	26	27	26	23	46
<i>Abies religiosa</i>	33	24	26	24	24	22	24	39
<i>Abies religiosa-Pinus teocote</i>	sd	19	25	25	36	24	24	34
<i>Pinus montezumae</i>	34	35	37	33	41	36	43	76
<i>Pinus hartwegii</i>	sd	20	17	17	20	18	18	32

* Meses con incendios forestales.

sd = sin dato.

Negrita = inferior a 25%, disponibles para incendiarse.

meses de incendios para la mitad de las comunidades (Tabla 4). En el mes de diciembre, los combustibles se encontraban disponibles para la combustión con excepción de los que se encontraban en las comunidades de *Abies religiosa* y *Pinus montezumae*. Es importante recordar que el porcentaje de ocurrencia de incendios en diciembre es mínimo, por lo cual, el hecho de que no se presenten los incendios se debe a una causa diferente al contenido de humedad en los combustibles como la falta de una fuente de calor que inicie la combustión o debido a las condiciones atmosféricas registradas durante ese mes. En septiembre y octubre, la mayoría de los combustibles obtuvieron valores por arriba del 25%, exceptuando en el mes de octubre a *Abies religiosa*-*Pinus teocote* y *Pinus hartwegii*. La humedad de los combustibles en mayo fue mayor de 25%, sin tomar en cuenta la comunidad de *Pinus hartwegii*. Las comunidades de *Abies religiosa*, *Alnus jorullensis* y *Pinus montezumae* presentaron durante todo el período de estudio una humedad superior al 25%, con excepción de diciembre en la comunidad de *Alnus*. En *Pinus hartwegii* la humedad en todos los meses fue menor al 25%, sin embargo, la ocurrencia de incendios se presentó únicamente en tres meses.

DISCUSIÓN

Además del efecto de las condiciones atmosféricas sobre el contenido de humedad de los combustibles; la pérdida o ganancia de humedad depende también de la relación superficie/volumen que presentan. De acuerdo con Rodríguez *et al.* (2002) y Vélez (2000), cuanto mayor sea la relación superficie/volumen los combustibles tendrán una mayor superficie a través de la cual perderán con rapidez su contenido de humedad y arderán con facilidad. Debido a que en los combustibles de la clase 2 la relación fue 235 m²/m³ y para la clase 3 fue de 120 m²/m³, los primeros arderán con facilidad. Consecuentemente, Porrero (2001) reportó para ramillas de 1.3 cm de diámetro una relación de 308 m²/m³, en acículas de pino de 5 600 m²/m³ y en pastos de 6 000 m²/m³; por lo tanto, la relación superficie/volumen aumenta conforme el diámetro del combustible disminuye.

Las diferencias significativas en la humedad de los combustibles entre *Pinus hartwegii* y *P. montezumae* así como en *Quercus crassipes* y *Alnus jorullensis* se relaciona a factores tales como las propiedades químicas, grado de descomposición, densidad y estructura de la madera, que son características propias de

Tabla 4. Contenido de humedad, combustibles clase 3

Comunidad vegetal	Humedad (%)							
	Sep	Oct	Nov	Dic	Feb*	Mar*	Abr*	May
<i>Quercus crassipes</i>	27	28	22	17	21	17	17	29
<i>Alnus jorullensis</i>	49	41	27	21	40	29	27	56
<i>Abies religiosa</i>	54	42	39	27	30	38	30	52
<i>Abies religiosa</i> - <i>Pinus teocote</i>	sd	20	24	11	25	18	17	27
<i>Pinus montezumae</i>	57	35	41	38	54	51	40	73
<i>Pinus hartwegii</i>	sd	17	16	10	16	13	11	22

* Meses con incendios forestales.

sd = sin dato.

Negrita = inferior a 25%, disponibles para incendiarse.

los combustibles. Como lo menciona Robles y Echenique, (1983) la madera presenta diferencias importantes entre las especies de coníferas (*Abies* y *Pinus*) y latifoliadas (*Quercus* y *Alnus*) como son el tamaño de las células, la presencia y cantidad de vasos propios de las latifoliadas, la densidad de la madera, entre otros. La madera de latifoliadas es más compleja que la de coníferas, ya que en su estructura hay una mayor especialización y variedad en sus elementos, así mismo, la madera no sólo es diferente en la misma especie, sino entre las distintas partes de un mismo árbol (Barajas *et al.*, 1979; King y Linton, 1962; y Simard, 1968).

Otro factor que puede ocasionar cambios en el contenido de humedad de los combustibles es la orientación de cada uno de los sitios (Countryman, 1978), ya que las laderas situadas al norte (umbría) son más húmedas y frías, mientras que las situadas al sur (solana) son más secas y cálidas. En una montaña, a la misma altitud puede haber grandes oscilaciones entre la solana y la umbría, y entre el día y la noche (García y García, 1987). Debido a que en la ladera sur se registra menor humedad relativa, los combustibles estarán más secos que los situados en la ladera norte, tal es el caso de la comunidad estudiada de *Pinus hartwegii* que se encuentra en la ladera sur donde ambas clases de combustibles registraron los menores contenidos de humedad. Por el contrario, en la comunidad de *Pinus montezumae* localizada en la ladera norte, la humedad de los combustibles fue la máxima. Esto demuestra evidentemente que existe un efecto de la ladera en la humedad de los combustibles en el Parque. De acuerdo con Nelson (2001) y Wong (2005), la orientación y la humedad relativa tienen un efecto decisivo en la disponibilidad de los combustibles. Cabe recordar que durante el período en estudio, ocurrió en el parque una nevada el 31 de enero de 2004, la cual cubrió gran parte del volcán incrementando la humedad relativa y por consiguiente la humedad de los combustibles de ambas clases, sin embargo, este tipo de evento atmosférico es poco frecuente en el parque.

Con base en el registro de incendios forestales, se ha reportado que la mayoría de los incendios en el Parque son de tipo superficial y afectan principalmente a los bosques de *Pinus*, y que el mayor número se manifiesta entre los 2 600 y 3 200 msnm donde existe una gran dinámica de uso agropecuario (Villers *et al.*, 2001). En lo reportado en este estudio, se encontró que durante la temporada de incendios en 2004, la comunidad de *Pinus* fue la más afectada y el mayor número se presentó en la zona de agricultura de temporal. En los meses cuando ocurrieron los incendios, la humedad de los combustibles en ciertas comunidades fue mayor al 25%, pero no mayor del 30%. Se ha reportado que la humedad de extinción puede variar significativamente de un lugar a otro, por el tipo de combustible y por el tipo de clima. Para algunas herbáceas, la humedad de extinción en el estado de Washington en Estados Unidos, es en promedio del 40%, en particular para las localidades de Cascades y Puget Sound es del 30% y en la parte oriental del estado de Washington del 25% (NOAA, 1998).

CONCLUSIONES

Dado que la humedad relativa desciende progresivamente durante el día presentando sus valores más bajos entre las 12 y las 15 horas, la humedad de los combustibles dentro de este horario puede ser mínima, facilitando la posibilidad de que ocurra un incendio. Por lo tanto, es importante que se tomen en cuenta estas consideraciones del tiempo atmosférico de cada sitio en los incendios.

Además de las condiciones atmosféricas, la humedad de los combustibles también varía entre diferentes comunidades vegetales. En la clase 2 (de 0.6 a 2.5 cm) así como en la clase 3 (de 2.6 a 7.5 cm), los máximos porcentajes de humedad corresponden a la comunidad de *Pinus montezumae*, razón por la cual es menos probable de que ocurra un incendio en esta comunidad de manera natural o inducida en el parque. Asimismo, para las dos clases

diamétricas, en la comunidad de *Pinus hartwegii* se presentaron los valores más bajos en contenido de humedad, no obstante, en esta comunidad durante el período en estudio no ocurrieron incendios. Las comunidades de *Pinus* que cubren gran parte de superficie del parque (13 582 ha) se encuentran colindantes con la zona de agricultura, por lo que debido a su localización, y aunado a los bajos contenidos de humedad de los combustibles, la ocurrencia de un incendio puede ser muy alta.

Es fundamental tener en cuenta la localización de los sitios sobre las diferentes laderas, ya que el contenido de humedad de los combustibles puede variar de manera significativa, como en la ladera norte donde la humedad fue mayor que en la ladera sur. Sin embargo, para corroborar esto se deben considerar otros parámetros, como la radiación, viento y la pendiente, que igualmente alteran la humedad de los combustibles. La variación de humedad en los combustibles, también depende de la relación superficie/volumen que presentan, ya que los combustibles con un mayor diámetro presentan una menor relación superficie/volumen y en aquéllos con menor diámetro la relación aumenta, por lo tanto, en estos últimos la probabilidad de incendiarse será mayor. La densidad y el estado de descomposición, así como las sustancias químicas de la madera, son factores igualmente importantes que intervienen en el contenido de humedad de los combustibles.

Durante la temporada de incendios en el Parque Nacional Malinche se pudo observar que las comunidades de *Alnus jorullensis* y *Pinus montezumae* tienen una menor probabilidad de quemarse. Por el contrario, las comunidades *Quercus crassipes* y *Pinus hartwegii*, pueden ser las más vulnerables a los incendios por presentar contenidos de humedad en los combustibles menores a 25%. El resto de las comunidades presentaron una humedad muy cercana a la humedad de extinción. En el período en estudio, abril resultó ser el mes más

crítico para la ocurrencia de incendios, ya que en las dos clases diamétricas de combustibles los porcentajes de humedad fueron inferiores a 25% en gran parte de las comunidades. La evaluación de la humedad de los combustibles, permite tener una mejor determinación en las estrategias de prevención, control y combate de incendios forestales, así como en la modelación del comportamiento del fuego.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer al CONACYT por el apoyo financiero proporcionado para el proyecto Comportamiento del fuego y evaluación de riesgos a incendios en áreas forestales de México: un estudio en el volcán Malinche (CONACYT, 38607-V) del cual este estudio formó parte. Asimismo, agradecemos a los doctores Ernesto Alvarado y Dante Arturo Rodríguez Trejo y a la maestra Josefina Barajas Morales por sus invaluable observaciones en los aspectos metodológicos. También agradecemos especialmente a los Ingenieros del Área de Instrumentación Meteorológica del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Manuel García Espinosa, Wilfrido Gutiérrez López y Jorge Escalante González por la instalación de cinco estaciones meteorológicas Davis en el Parque Nacional Malinche. Asimismo, se les agradece a los revisores anónimos sus valiosos comentarios.

REFERENCIAS

- Barajas, J., R. Echenique y T. Carmona (1979), *La madera y su uso en la construcción*, núm. 3, Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos, Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Madera, Xalapa, México.
- Bessie, W. and A. Johnson (1995), "The relative importance of fuels and weather on fire behavior in subalpine forests", *Ecology*, vol. 76, no. 3, Canada, pp. 747-762.

- Brown, J. (1974), "Handbook for inventorying downed woody material", *usDA Forest Service. General technical report*, U.S., pp. 1-24.
- Countryman, C. (1978), "Radiation and wildland fire", *Forest Service*, U.S. Department of Agriculture, Berkeley, California, pp. 1-17.
- DeBano, L. (1998), *Fire's Effects on Ecosystems*, John Wiley and Sons, Inc.
- Echenique, R. y F. Robles (1993), "La madera y la humedad", en *Ciencia y Tecnología de la Madera 1*, Universidad Veracruzana, Textos universitarios, México, pp. 61-77.
- Flores, G. y M. Mora (2005), *La vegetación del Parque Nacional Malinche*, trabajo preliminar desarrollado por el proyecto CONACYT 38607-V título: "Comportamiento del fuego y evaluación de riesgos a incendios en áreas forestales de México: un estudio en el volcán Malinche".
- Fosberg, M. A. (1971), "Moisture content calculations for the 100-hour timelag fuel in fire danger rating. *Forest Service, u.s. Department of Agriculture, usDA Forest Service*, Research note, pp. 1-7.
- Fosberg, M. A. (1977), "Forecasting the 10-Hour timelag fuel moisture", *usDA Forest Service*, Research paper RM-187, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, Colorado, pp. 1-10.
- García de Pedraza, L. y M. García (1987), *La meteorología y los incendios forestales*, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España.
- Gobierno del Estado de Tlaxcala (2004), *Base de incendios forestales 1990-2004 del Parque Nacional Malinche*, México [cd-rom].
- Gobierno de los Estados de Tlaxcala y Puebla (2001), *Programa Integral de Manejo del Parque Nacional Malinche*, México.
- Haines D. and J. Frost (1978), "Weathering effects on fuel moisture sticks: corrections and recommendations. North Central Forest Experiment Station", *Forest Service u.s.*, Department of Agriculture, pp. 1-7.
- King, A. R. and M. Linton (1962), "Moisture variation in forest fuels: the rate of response to climate change", *Aust. J. Appl. Sci.* vol. 14, no. 1, pp. 38-49.
- Nelson, R. Jr. (2001), "Water relations of Forest Fuels", en Jonson, E. and K. Miyanishi, *Forest fires, behavior and ecological effects*, Academic Press, pp. 79-149.
- NOAA (1998), "Fuel Moisture", u.s. [<http://www.wrh.noaa.gov/sew/fire/olm/fuelmoisture.htm>].
- Norum, R. A. and W. C. Fischer (1980), *Determining the moisture content of some dead forest fuel using a Microwave Oven*, Research Note INT-277, usDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- Peña del Valle Isla, A. (2003), *Captura de carbono: un estudio en el Parque Nacional Malinche, Tlaxcala-Puebla*, tesis de Maestría en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Porrero, M. (2001), *Incendios forestales, investigación de causas*, Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Robles, F. y R. Echenique (1983), *Estructuras de madera*, Limusa, México.
- Rodríguez, D. (1994), *La lucha contra el fuego, Guía para la prevención, presupresión y supresión de incendios forestales*, Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Rodríguez, D., M. Rodríguez, F. Fernández y S. Pyne (2002), *Educación e incendios forestales*, Mundi-Prensa, México.
- Simard, A. (1968), *The moisture content of forest fuels – I, A review of the basic concepts*, Forest Fire Research Institute, Ottawa, Ontario.
- SMN (2000), *Extractor rápido de información climática ERIC II*, México [cd-rom].
- Vélez, R. (2000), *La defensa contra los incendios forestales*, McGraw-Hill, España.

Villers, L. (2001), *Comportamiento del fuego y evaluación de riesgos a incendios en áreas forestales de México: un estudio en el volcán Malinche*, Proyecto CONACYT 38607-V.

Villers, L., A. Peña del Valle y M. Arellano (2001), "Recurrencia de los incendios forestales en El Volcán Malinche y la presencia del fenómeno de El Niño 1998", en *México en su unidad y diversidad territorial*, XVI Congreso Nacional de Geografía, Mérida, pp. 162-175.

Wackerly, D., W. Mendenhall III y R. Scheaffer (2002), *Estadística matemática con aplicaciones*, Thomson, 6ª. ed., México.

Wong, J. (2005), *Humedad de los combustibles leñosos y su relación con variables atmosféricas. Su importancia en los incendios forestales, en el Parque Nacional Malinche, Tlaxcala*, tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México.