



## MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO DEL FUEGO EN UNA QUEMA CONTROLADA EN UN RODAL DE PINO-ENCINO

### FIRE BEHAVIOR MONITORING OF A PRESCRIBED BURN IN A PINE-OAK FOREST STAND

**J. G. Flores Garnica; J. Xelhuantzi Carmona; Á. A. Chávez Durán**

INIFAP, Centro de Investigación Regional Pacífico Centro, Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco. Jalisco, MÉXICO.  
Correo-e: flores.german@inifap.gob.mx

#### RESUMEN

Si en un incendio forestal, es posible conocer las condiciones en que el fuego, tiene un comportamiento moderado, entonces podría ser usado en forma controlada para el logro de objetivos específicos. De acuerdo con esto, el presente texto muestra cómo se monitoreó la influencia de factores ambientales en el comportamiento del fuego, bajo la implementación de una quema controlada en un rodal de pino-encino. Los parámetros del comportamiento del fuego que se evaluaron fueron velocidad de propagación, altura de llama y longitud de llama. En cuanto a los factores que influyen en el comportamiento del fuego, se evaluaron duración de la quema, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura. Se concluyó que la humedad relativa tuvo mayor influencia en el comportamiento del fuego. No obstante, en algunos momentos las características de la llama (altura y longitud) tuvieron un comportamiento errático en referencia a la humedad relativa, lo cual puede ser causado por la variación en la disponibilidad y continuidad de los combustibles. En general, el aumento de temperatura estuvo asociado con una disminución de la humedad relativa, integración que influye claramente en la primera etapa de la quema. Sin embargo, debido a la ligera velocidad del viento, este factor no tuvo influencia importante.

Recibido: 29 de mayo, 2009  
Aceptado: 5 de septiembre, 2009  
doi: 10.5154/r.rchscfa.2009.05.017  
[http:// www.chapingo.mx/revistas](http://www.chapingo.mx/revistas)

**PALABRAS CLAVE:** altura de llama, longitud de llama, velocidad de propagación del fuego, combustibles forestales.

#### ABSTRACT

If it is possible to know under what conditions a forest fire result in a moderate behavior, then it could be used in a controlled way to achieve specific goals. Accordingly, this study monitored how environmental factors influence fire behavior, when a prescribed burn was applied in a pine-oak forest stand. The parameters of fire behavior evaluated were rate of spread, flame height and flame length. In relation to the factors that influence fire behavior, burn elapsed time, relative humidity, wind speed and temperature were evaluated. It was concluded that relative humidity had a major influence on fire behavior. However, at times flame height and length showed erratic behavior in relation to relative humidity, which could be caused by variations in fuel availability and continuity. In general, an increase in temperature was associated with a decrease in relative humidity. This integration clearly influences the first stage of the burn. However, due to low wind speed, this factor had no significant influence.

**KEY WORDS:** flame height, flame length, rate of fire spread, forest fuels.

#### INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales en México se ven impactados por varios factores, uno de los cuales es el fuego, que provoca una serie de cambios a varios niveles (ecológico, social, político y económico) en un tiempo corto (González, 2001; De Bano, 1976), durante el cual puede afectar grandes extensiones de bosque (Flores y Benavides, 1994a; Johnston, 1971) causando pérdidas económicas, de biodiversidad y en ocasiones cobra vidas humanas. No obstante, debe considerarse que no todos los incendios son iguales

#### INTRODUCTION

Mexico's forest ecosystems are impacted by several factors, such as fire, which in a short period causes a series of changes at several levels (ecological, social, political, and economic) in a short time (González, 2001; De Bano, 1976), and it can affect large forest areas (Flores and Benavides, 1994a; Johnston, 1971), resulting in economic and biodiversity losses and, occasionally, the loss of human life. However, it should be taken into account that not all fires are the same, and, therefore, they do not always have

y, por lo tanto, no siempre tienen el mismo impacto (Williams *et al.*, 1994), llegando incluso a propiciar efectos favorables al ecosistema (Flores y Benavides, 1994b). Para poder estimar el impacto del fuego, debe entenderse cómo se manifiesta en diferentes condiciones ambientales. A esto se le denomina "comportamiento del fuego" (Finney, 1996), y se evalúa a través de varios parámetros, como velocidad de propagación, altura de llama, intensidad de calor, etc. (Campbell *et al.*, 1996). De esta forma, si es posible conocer bajo qué condiciones el fuego tiene un comportamiento moderado (Anderson, 1970), este puede ser usado en forma prescrita para el logro de objetivos específicos (fomento de la regeneración (Van Lear y Waldrop, 1991), disminución de combustibles, fomentar condiciones de hábitat para fauna (Flores y Benavides, 1994a). Sin embargo, debe remarcarse la escasa información que existe sobre estudios del comportamiento del fuego en quemas prescritas en México, lo cual hace difícil la recomendación de su uso. Debido a esto, el objetivo general de la investigación que aquí se explica fue monitorear el comportamiento del fuego y su relación con algunos factores ambientales, bajo la implementación de una quema prescrita en un rodal forestal de pino-encino. El trabajo se desarrolló en un bosque templado de Chihuahua, y se espera que sus resultados puedan usarse como apoyo a las estrategias de prevención y control de incendios forestales.

the same impact (Williams *et al.*, 1994), moreover, some of them could result in favorable effects to the ecosystem (Flores and Benavides, 1994b). In order to estimate a fire's impact, we must understand its reactions under different environmental conditions must be understood. This is called "fire behavior" (Finney, 1996), and it is evaluated by means of various parameters, such as rate of spread, flame height, heat intensity, etc. (Campbell *et al.*, 1996). Therefore, if it is possible to know under what conditions a fire has moderate behavior (Anderson, 1970), it could be used in a prescribed way to achieve specific goals, such as regeneration stimulation (Van Lear and Waldrop, 1991), fuel reduction, and fauna habitat conditions enhancement (Flores and Benavides, 1994a). However, it should be emphasized that there are few published studies on fire behavior in prescribed burns in Mexico, which makes it difficult to recommend their usage. Because of this, the general objective of the research outlined here was to monitor fire behavior and its relationship to several environmental factors, through a prescribed burn in a pine-oak forest stand. This work was carried out in a temperate forest in Chihuahua, and it is expected that its results can be used to support forest fire prevention and control strategies.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

En el noroeste del estado de Chihuahua, México, se seleccionó un área representativa de las condiciones de un rodal de pino-encino (Figura 1). Específicamente, se trabajó en el paraje "El Vallecito", que se ubica en el predio "El Largo y Anexos", cercano a la población de ciudad Madera, Chihuahua, cuyas coordenadas son: latitud 19° 06' 55" y longitud 108° 10' 25.3".

### Descripción de parcela

Para evaluar el comportamiento del fuego, se llevó a cabo una quema prescrita, para lo cual se delimitó una parcela experimental de 100 por 200 m (20,000 m<sup>2</sup>) (Figura 2), ubicada a 2,473 m, con una pendiente promedio del 10 % y exposición sur.

Con fines del muestreo, la parcela se dividió en tres cuadrantes de 50 m por 50 m (Figura 2). En cada cuadrante se ubicó un sub-sitio circular, con un radio de 13.82 m (aproximadamente 600 m<sup>2</sup>), para el inventario dasométrico. Se delimitó también un sub-sitio circular (200 m<sup>2</sup>) para la caracterización de árboles de entre 0.3 y 2 m de altura y arbustos (Figura 2). El material combustible leñoso en el suelo forestal fue evaluado a través de la técnica de intersecciones planares (Brown *et al.*, 1982), para lo cual

## MATERIALS AND METHODS

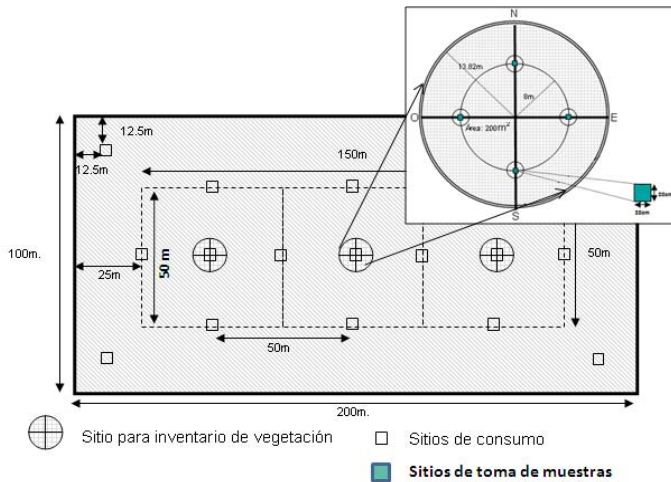
### Study area

At the northeast of the state of Chihuahua, Mexico, a representative area of the conditions of a pine-oak stand was selected (Figure 1). Specifically, the WORK was conducted in a spot called "El Vallecito", which is located on the "El Largo y Anexos" property, near the town of Madera,



FIGURA 1. Rodal forestal de Pino-encino donde se ubicó la parcela de evaluación del comportamiento del fuego.

FIGURE 1. Pine-oak forest stand where the plot for the fire behavior study is located.



**FIGURA 2. Parcela experimental, donde se ubican los cuadrantes usados para la evaluación del comportamiento del fuego.**

**FIGURE 2. Experimental plot, where the quadrants used for the fire behavior assessment were located.**

se consideraron cuatro líneas (15 m cada una) orientadas hacia el norte, sur, este y oeste a partir del centro de cada cuadrante. A ocho metros de cada una de estas orientaciones (a partir del centro del sitio) se establecieron cuadros de 30 por 30 cm, donde se evaluaron herbáceas y se tomaron muestras de material combustible (hojarasca y humus). Para evaluar el consumo de combustible, después de la quema, se instaló una varilla de acero marcando la profundidad inicial de la hojarasca en diecisiete cuadros de consumo (30 x 30 cm) (Figura 2). Después de la quema se midió la profundidad de hojarasca remanente, con lo que se estimó la cantidad de material combustible consumido.

**Evaluación de combustible muerto**

El material combustible muerto se dividió en material leñoso y no-leñoso. Dentro del primero se midieron desde ramillas hasta troncos tirados en el suelo en el transecto que se marcó. Los combustibles leñosos en el suelo se tipificaron según su diámetro en cuatro clases (con base en Brown *et al.*, 1982): a) 0 cm a 0.6 cm (combustibles de una hora); b) 0.6 cm a 2.5 cm (10 horas); c) 2.5 cm a 7.5 cm (100 horas); y d) mayores de 7.5 cm (1000 horas). Los combustibles de una hora se midieron en un transecto de 2 m; los de 10 horas se midieron en una longitud de 4 m; mientras que los combustibles de 2.5 cm a 7.5 cm se midieron en un transecto de 6 m. Finalmente, los combustibles mayores a 7.5 cm se midieron en la longitud total del transecto de 15 m. En el muestreo de material leñoso caído se registró el número de piezas leñosas intersectadas por un plano imaginario, definido por el transecto de 15 m, que precisa verticalmente el plano de muestreo.

Para el muestreo del combustible no leñoso se consideraron la capa de hojarasca y la capa de humus.

Chihuahua, whose coordinates are: latitude 19° 06' 55" and longitude 108° 10' 25.3".

**Plot description**

In order to evaluate fire behavior, a prescribed burn was carried out, for which an experimental plot of 100 by 200 m (20,000 m<sup>2</sup>) (Figura 2) was delimited, located at 2,473 m, with an average grade of 10 % and southern exposure.

For sampling purposes, the plot was divided into three quadrants of 50 m by 50 m (Figure 2). A circular sub-site, with a radius of 13.82 m (approximately 600 m<sup>2</sup>), was located in each quadrant for the dasometric inventory. A circular sub-site (200 m<sup>2</sup>) was also delimited for the characterization of trees of between 0.3 and 2 m in height, and bushes (Figure 2). Woody fuel material on the forest floor was evaluated using the planar intersect technique (Brown *et al.*, 1982), for which four lines were established (15 m each one), oriented towards the north, south, east and west from the center of each quadrant. At eight meters, in each one of these directions (from the center of the site), 30-by-30 cm squares were established, where grasses were evaluated and samples of fuel material taken of combustible material (litter and humus). In order to assess fuel consumption, after the burn, a steel nail was used to mark the initial litter depth in seventeen consumption squares (30 x 30 cm) (Figure 2). After the burn, the depth of the remaining litter was measured, from which the amount of combustible material consumed was estimated.

**Evaluation of dead fuel**

The dead fuel material was divided into woody and non-woody material. Within the first, everything from twigs to downed trees lying on the floor was measured on the marked-off transect. The woody fuels in the soil were categorized according to their diameter into four classes (based on Brown *et al.*, 1982): a) 0 cm to 0.6 cm (1-hour fuels); b) 0.6 cm to 2.5 cm (10 hours); c) 2.5 cm to 7.5 cm (100 hours); and d) over 7.5 cm (1000 hours). The 1-hour fuels were measured on a 2-m transect, those of 10 hours were measured along a 4-m length, while fuels of 2.5 to 7.5 cm were measured on a 6-m transect. Finally, the fuels over 7.5 cm were measured along the total length of the 15-m transect. In the sampling of fallen woody material, the number of woody pieces intersected by an imaginary plane was recorded, defined by the 15-m transect, which fixes the sampling plane vertically.

For the sampling of non-woody fuel, the litter and humus layers were used. The litter and humus samples were taken from the 30-by-30 cm squares. These samples were dried in the laboratory to evaluate their dry weight and, based on this, estimate the corresponding fuel loads (t/ha).

Las muestras de hojarasca y de humus se tomaron de los cuadros de 30 por 30 cm. Estas muestras fueron secadas en laboratorio para evaluar su peso seco y con esto estimar las cargas de combustibles (t/ha) correspondientes.

### Evaluación de combustible vivo

Dentro de este rubro se consideran los arbustos, pastizal, regeneración y arbolado adulto. Los arbustos fueron medidos en altura y diámetro. Se tomó también el número de tallos por clase diamétrica. El arbolado adulto (diámetro mayor a los 7.5 cm) se midió dentro del sub-sitio circular (600 m<sup>2</sup>). Se evaluaron la altura y el diámetro y se determinó la especie. Para evaluar la regeneración se realizó un conteo de los árboles pequeños en el sitio circular de 5 m<sup>2</sup>. A efecto de estimar su altura, se escogió un árbol representativo por especie y se midió su altura.

### Quema prescrita

La quema prescrita se llevó a cabo durante el mes de mayo del 2005, para lo cual se cumplió con la normatividad correspondiente (Ley Forestal, LEGEPA, NOM-015-SEMARNAT/SAGAR-1997). Con base en esto, se atendieron aspectos como plan de contingencia, especificación de tipo de quema, organización de brigadas, brechas cortafuego, etc. Durante la quema prescrita se tomaron fotografías y videos, con el objetivo de monitorear el comportamiento del fuego y tener un registro gráfico del mismo. Finalmente, se estimó la velocidad de propagación del fuego en cuatro transectos de 25 m, repartidos a lo largo del sitio; además, cada 50 m fue estimada la altura alcanzada por las llamas (Figura 3). Para esto se usaron palos marcados cada 50 cm.

Los parámetros del comportamiento del fuego que se evaluaron durante la quema fueron: a) Velocidad de propagación; b) Altura de llama; y c) Longitud de llama. En cuanto a los factores que influyen en el comportamiento

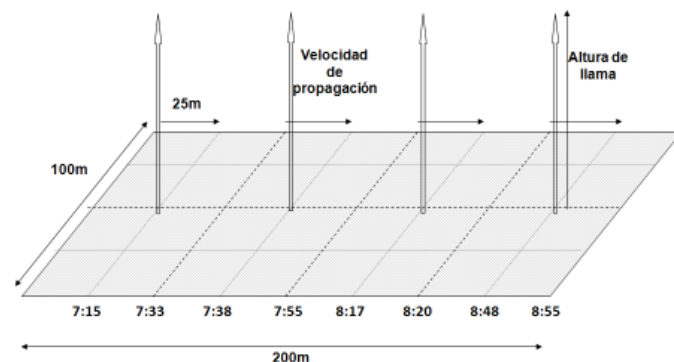


FIGURA 3. Esquema de las áreas, dentro de la parcela, que se utilizaron para evaluar el comportamiento del fuego. Se muestra la hora de evaluación cada 25 metros.

FIGURE 3. Diagram of the areas, within the plot, used to evaluate fire behavior. Evaluation time is shown every 25 meters.

### Evaluation of live fuel

Shrubs, pasture, regeneration and adult trees fall under this heading. Bushes were measured for height and diameter. The number of stems by diametric class was also taken. The adult trees (diameter greater than 7.5 cm) were measured within the circular sub-site (600 m<sup>2</sup>). Their height and diameter were measured and their species determined. In order to evaluate regeneration, a count was made of the small trees in the 5-m<sup>2</sup> circular site. In order to estimate their height, a tree representative of each species was selected and its height measured.

### Prescribed burn

The prescribed burn was carried out in May, 2005, thereby complying with the corresponding regulations (Forestry Law, LEGEPA, NOM-015-SEMARNAT/SAGAR-1997). Based on this, issues such as a contingency plan, burn type specification, firebreaks, etc. were addressed. During the prescribed burn, photographs and videos were taken in order to monitor fire behavior and have a visual record of the it. Finally, the rate of fire spread was estimated along four 25-m transects, located along the site; in addition, the height reached by the flames was estimated every 50 m (Figure 3). This was done using marked poles (marks were located at every 50 cm).

Fire behavior parameters evaluated during the burn were: a) rate of spread; b) flame height; c) flame length. Regarding the factors that influence fire behavior, the following were evaluated during the burn: a) elapsed time; b) relative humidity; c) wind speed and direction; d) temperature.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Charcterization of the vegetation

In the pine-oak forest there was a dominance of *Pinus duranguensis*, which showed signs of disturbance apparently due to tree harvesting. A great amount of woody debris covering a large part of the area was observed. The overall density was 838 tree/ha. Table 1 shows the density of each tree species found on the plot. It also shows the height proportion of each species, crown area and diameter, the resulting dimensions correspond, in general, to younger individuals. This explains the tree density found on this plot. It should also be emphasized that this type of vegetation can only produce small amounts of fue due to its low crown density. Regarding plot regeneration, it was very limited, which was favorable for setting the prescribed burn. As stated, the highest density corresponds to *Pinus duranguensis*.

### Fuel estimation

The average fuel load, in the case of fuels with a one-

del fuego, durante la quema se evaluaron: a) Duración de la quema; b) Humedad relativa; c) Velocidad y dirección del viento; d) Temperatura.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización de la vegetación

En el bosque de pino-encino hubo una dominancia de *Pinus duranguensis*, presentando indicios de perturbación, aparentemente por aprovechamiento de árboles. Se observó gran cantidad de residuos leñosos cubriendo gran parte del área. La densidad general fue de 838 árboles·ha<sup>-1</sup>. El Cuadro 1 presenta la densidad de cada una de las especies arbóreas encontradas en la parcela. Asimismo, se muestra la proporción de alturas por especies, el área de copa y el diámetro del arbolado, donde se aprecia que las dimensiones corresponden, en general, a individuos jóvenes. Esto explica la densidad de arbolado que se presenta en esta parcela. También debe remarcarse que este tipo de vegetación puede producir poca cantidad de combustibles, ya que su densidad de copa es menor. En cuanto a la regeneración de la parcela, resultó escasa, lo cual fue favorable para la implementación de la quema prescrita. Como se observa, la mayor densidad corresponde a *Pinus duranguensis*.

### Estimación de combustibles

La carga promedio de combustibles, en el caso de combustibles con tiempo de retardo de una hora, fue de aproximadamente 190 kg·ha<sup>-1</sup>, siendo ésta la menos abundante (Cuadro 2). Los combustibles de 10 horas de tiempo de retardo presentaron aproximadamente 2.5 t·ha<sup>-1</sup>, mientras que los de la clase de 100 horas de retardo sumaron la cantidad de 4.57 t·ha<sup>-1</sup>. Como se mencionó anteriormente, se encontraron varios restos de aprovechamientos madereros en el área, lo cual se refleja en una carga cercana a las 25 t·ha<sup>-1</sup> de combustibles pesados firmes (>7.5 cm de diámetro) y 2.8 t·ha<sup>-1</sup> de

hour time lag, was approximately 190 kg·ha<sup>-1</sup>, with this being the least abundant (Table 2). The 10-hour time lag fuels presented approximately 2.5 t·ha<sup>-1</sup>, while those in the class of 100 hours of time lag added the amount of 4.57 t·ha<sup>-1</sup>. As previously mentioned, several debris of timber harvesting were found in the area, which is reflected in a load approximately of the 25 t·ha<sup>-1</sup> of firm heavy fuels (>7.5 cm in diameter) and the 2.8 t·ha<sup>-1</sup> of rotten fuels (>7.5 cm in diameter). The fine fuel load (litter and humus) was, on average, 27.91 t·ha<sup>-1</sup>.

### Atmospheric conditions and fire behavior

During the process of the prescribed burns, two aspects were evaluated: 1) atmospheric conditions; and 2) fire behavior. Regarding the flame characteristics evaluated (height and length), erratic behavior was observed in reference to relative humidity (RH) (Figure 4). It is important to note that the burn was set in the early hours of the morning (7:15 to 8:55 a.m.). In the first 15 minutes, a decrease in flame dimensions, although the relative humidity remained constant. This could be due to the reduced fuel availability and continuity within the plot. Subsequently, a decrease in relative humidity occurred (7:33), which resulted in an increase in flame dimensions. After this, the RH remained constant for more than a half hour, when flame height and length reached their maximum dimensions. However, at about 7:55 a marked decrease in these dimensions was observed. This can be explained by the decrease in heavy and medium fuels, more than by their relationship to relative humidity. Eventually RH remained more constant (around 60 %), resulting, at first, a slight increase in flame dimensions. This was followed by a significant decrease in flame dimensions, with which is due to that some areas (inside the plot) were dominated by the *Quercus sideroxyla*, whose litter was very compacted and did not burn easily. In addition, it should be considered that environmental factors do not act isolated from each one, there fore the wind could affect flame length at different RH levels.

CUADRO 1. Estadísticos promedio de las características generales de la vegetación presente en la parcela ubicada en un rodal de pino-encino.

TABLE 1. Statistical averages for the general characteristics of the vegetation present in the plot located in a pine-oak stand.

Especies Asociadas	Densidad (Núm·ha <sup>-1</sup> )	Altura (m)	Diámetro (cm)	Área de copa (m)	Regeneración (Núm·ha <sup>-1</sup> )
<i>Pinus duranguensis</i>	367	9	16.61	4.4	5.56
<i>Quercus sideroxyla</i>	325	6.2	12.6	2.89	33.36
<i>Pinus leiophylla</i>	85	7.2	14	3.7	—
<i>Pinus ayacahuite</i>	51	6.9	12.86	3.9	16.68
<i>Pinus engelmannii</i>	9	7.6	14	1.28	—
<i>Pinus chihuahuana</i>	9	3.4	7	1.5	5.56
<i>Juniperus deppeana</i>	9	3.2	8	3.3	5.5

**CUADRO 2. Características de los transectos muestreados, y sus correspondientes cargas de combustibles (t·ha<sup>-1</sup>) que se presentaron en la parcela donde se aplicó la quema prescrita (condición de pino-encino).**

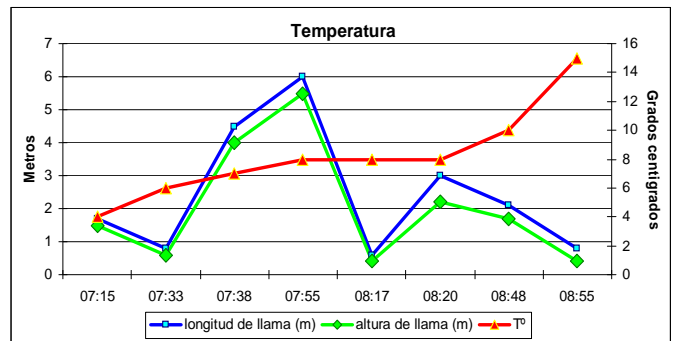
**TABLE 2. Characteristics of the sampled transects, and their corresponding fuel loads (t·ha<sup>-1</sup>) that appeared in the plot where the prescribed burn was applied (pine-oak condition).**

Sitio	Transecto	Elevación	Exposición	Pendiente	1 h	10 h	100 h	1000 F	1000 P	Total
1	Norte	2473	ESTE	15	0	1.89	0	0	0	1.89
1	Sur	2473	ESTE	15	0.07	2.52	1.67	0	0	4.26
1	Este	2473	ESTE	15	0.07	0.94	3.34	15.48	0	19.84
1	Oeste	2473	ESTE	15	0.03	1.26	1.67	0	0	2.96
2	Norte	2484	ESTE	10	0.20	3.13	3.32	57.98	0	64.63
2	Sur	2484	ESTE	10	0.26	0.63	4.98	0	0	5.87
2	Este	2484	ESTE	10	0.10	3.76	6.64	0	0	10.50
2	Oeste	2484	ESTE	10	0.46	5.32	11.62	13.63	0	31.03
3	Norte	2476	ESTE	10	0.20	1.25	8.30	108.62	0	118.37
3	Sur	2476	ESTE	10	0.10	5.01	9.96	100.29	33.58	148.95
3	Este	2476	ESTE	10	0.62	2.50	1.66	0	0	4.79
3	Oeste	2476	ESTE	10	0.16	1.25	1.66	0	0	3.08

combustibles podridos (>7.5 cm de diámetro). La carga de combustibles ligeros (hojarasca y humus) fue, en promedio, de 27.91 t·ha<sup>-1</sup>.

**Condiciones atmosféricas y comportamiento del fuego**

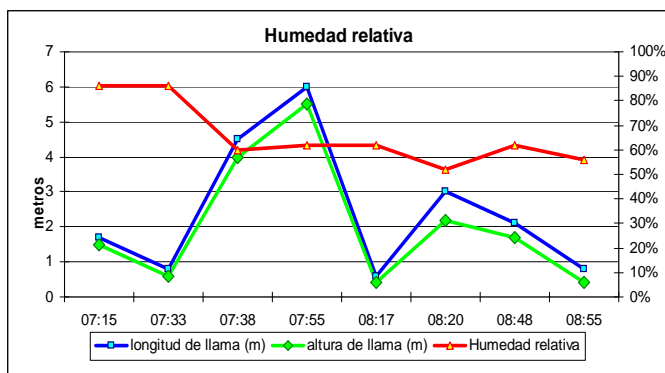
Durante el proceso de las quemas prescritas se evaluaron dos aspectos: 1) condiciones atmosféricas; y 2) comportamiento del fuego. En cuanto a las características de la llama que se evaluaron (altura y longitud), se observó que existe un comportamiento errático en referencia a la humedad relativa (HR) (Figura 4). Es importante hacer notar que la quema se hizo en las primeras horas de la mañana (7:15 a 8:55 a.m.). En los primeros 15 minutos se observó una disminución de las dimensiones de la llama, aunque la humedad relativa permanece constante. Una explicación sencilla podría ser la disponibilidad y continuidad de los



**FIGURA 5. Variaciones en el comportamiento del fuego en relación a cambios de la temperatura.**

**FIGURE 5. Variations in fire behavior in relation to temperature changes.**

Although the temperature remained relatively constant, in the first hour of the burn, 15 minutes after the burn started there was an increase in the flame (Figure 5), which can be linked more to fuel availability and environmental relative humidity (Villers, 2006). Between 7:55 and 8:20, the temperature tended to define approximately and asymptote, at the midpoint of which the flame had its smallest dimensions. After this, the flame began to grow, as a result of a relative humidity decreased. As in the case of RH, after 8:20 the flames once again began to decrease, mainly due to the fine fuel load and distribution conditions.



**FIGURA 4. Variaciones en el comportamiento del fuego en relación a cambios de la humedad relativa.**

**FIGURE 4. Variations in fire behavior in relation to changes in relative humidity.**

combustibles dentro de la parcela. Posteriormente ocurrió una disminución en la humedad relativa (7:33 horas), por lo que se propicia un aumento en las dimensiones de la llama. Seguido a esto, la HR permaneció constante por más de media hora, y es cuando la altura y longitud de la llama alcanzó su máxima dimensión. No obstante, alrededor de las 7:55 horas se observó una disminución marcada en estas dimensiones. Esto puede explicarse por la disminución de combustibles medianos y pesados, más que por su relación con la HR. Eventualmente la HR permaneció más constante (alrededor del 60 %), propiciándose, primeramente, un ligero incremento en las dimensiones de la llama. Esto seguido de una disminución importante, teniendo como explicación que en algunas áreas, dentro de la parcela, dominaba el *Quercus sideroxyla*, cuya hojarasca se encontraba muy compactada y no se quemaba con facilidad. Además, se debe considerar que los factores ambientales no operan aisladamente, por lo que el viento pudo influir en la longitud de la llama en distintos niveles de HR.

Aunque la temperatura se mantuvo relativamente constante en la primera hora de la quema, 15 minutos después del inicio se propició un aumento de la llama (Figura 5), el cual puede estar más asociado a la disponibilidad de combustibles y a la humedad relativa del ambiente (Villers, 2006). Entre las 7:55 y las 8:20 horas la temperatura tendió a definir aproximadamente una asíntota, a mitad de la cual la llama tuvo sus menores dimensiones. Después de esto la llama empezó a crecer, producto más bien de la disminución de la humedad relativa. Al igual que en el caso de la HR, después de las 8:20 horas las llamas empezaron nuevamente a decrecer, lo cual se debió principalmente a las condiciones de distribución y cargas de combustibles ligeros.

La Figura 6 presenta las variaciones de la velocidad del viento a lo largo de la quema. En la primera hora la velocidad del viento fue de alrededor de los 2 km·h<sup>-1</sup>. Debido a esto, como se observó, el viento no tuvo un papel importante en las variaciones de las dimensiones de la llama en la primera hora de la quema. No obstante, después de las 8:17 la velocidad del viento se incrementó hasta casi llegar a los 6 km·h<sup>-1</sup>, lo cual puede explicar más el ligero incremento en las dimensiones de las llamas. Lo anterior no se asocia bien en relación con la humedad relativa y la temperatura. Después de las 8:40 horas el viento disminuyó, con la misma respuesta de las dimensiones de las llamas. Aunque esta disminución ocurre un poco antes (8:20), lo cual nuevamente puede explicarse porque la distribución y cargas de combustibles en la parcela no fueron homogéneas.

De acuerdo con la Figura 7, la velocidad de propagación del fuego tuvo un comportamiento muy similar al de la altura y longitud de llama. Inicialmente la respuesta de la velocidad de propagación del fuego presentó una respuesta más lógica a las variaciones ambientales, ya que a un decremento de la humedad relativa y a un aumento de la temperatura y de la velocidad del viento correspondió un incremento en la velocidad

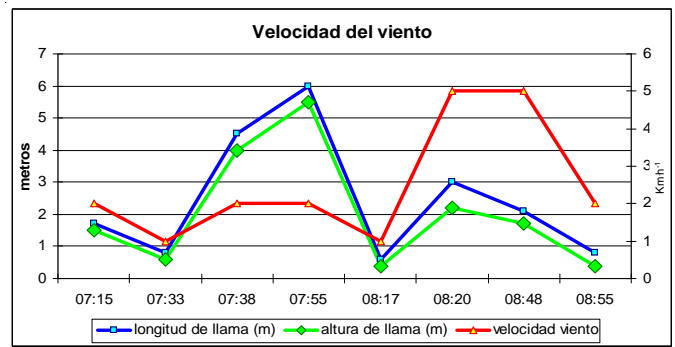


FIGURA 6. Variaciones en el comportamiento del fuego en relación a cambios de la velocidad del viento.

FIGURE 6. Variations in fire behavior in relation to changes in wind speed.

increased until reaching almost 6 km·h<sup>-1</sup>, which can further explain the slight increase in flame dimensions. This does not correspond well with relative humidity and temperature. After 8:40, the wind decreased, as did the flame dimensions. Although this drop-off occurred a little earlier (8:20), it can be again explained by the fact that the fuel loads and distribution in the plot were not homogenous.

According to Figure 7, the rate of fire spread had a behavior very similar to that of flame height and length. Initially, the rate of fire spread presented a more logical response to environmental variations, since a decrease in relative humidity along with an increase in temperature and wind speed corresponded to an increase in rate of spread. However, after 7:55 a.m., the spread was influenced more by fuel availability and distribution. The high moisture content of the fuel, evidenced by the great amount of white smoke in some areas during the burn, should also be taken into account.

As seen in Table 3, the environmental parameter that showed greater correlation with fire behavior was relative humidity, whereas wind velocity, which was relatively low, had a low correlation. However, it is important to point out that all the parameters showed a relatively low correlation, which should not necessarily be generalized for any time of the day; instead, these results should be restricted only to the described conditions relating to time of day, vegetation type and season. However, as one of the significant results of this study, it can be said that, under the conditions described, the environmental parameters analyzed have no significant correlation to fire behavior; therefore, other factors, such as fuel loads, should be considered.

Based on the above, a multiple regression analysis was carried out, whose results are shown in Table 4, was carried out. As can be seen, there was a considerable

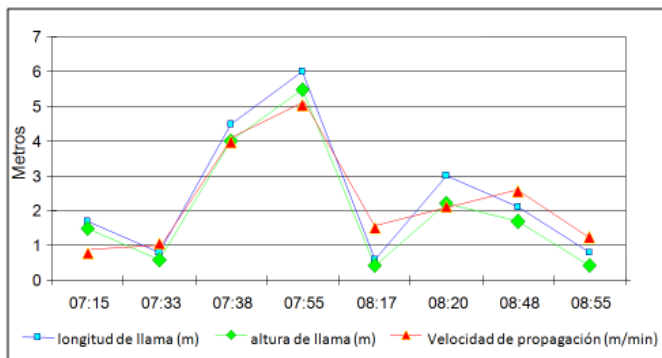


FIGURA 7. Variaciones en la velocidad de propagación del fuego durante la quema controlada en un bosque de pino-encino.

FIGURE 7. Variations in rate of fire spread during the controlled burn in a pine-oak forest.

de propagación. Sin embargo, después de 7:55 a.m. la propagación fue influida más bien por la distribución y disponibilidad del combustible. También debe considerarse el alto contenido de humedad de los combustibles, lo cual se evidenció por la gran cantidad de humo blanco que se desprendía en algunas áreas durante la quema.

Como se observa en el Cuadro 3, el parámetro ambiental que mayor correlación manifestó en relación al comportamiento del fuego fue la humedad relativa, mientras que la velocidad del viento, que fue relativamente baja, tuvo una correlación baja. Sin embargo, es importante señalar que todos los parámetros manifestaron una correlación relativamente baja, lo cual no necesariamente se debe generalizar para cualquier hora del día, sino que estos resultados se deben restringir tan sólo para las condiciones descritas referentes a hora del día, tipo de vegetación y época del año. No obstante, como uno de los resultados relevantes de este trabajo, se puede decir que, bajo las condiciones descritas, los parámetros ambientales analizados no tienen una correlación importante en el comportamiento del fuego, por lo que deberán considerarse otros factores, como lo son las cargas de combustibles.

De acuerdo con lo anterior, se realizó un análisis de

CUADRO 3. Coeficientes de correlación correspondientes a los tres parámetros ambientales con los que se relacionó el comportamiento del fuego.

TABLE 3. Correlation coefficients for the three environmental parameters related to fire behavior

Parámetro	Longitud de llama	Altura de llama	Velocidad de propagación
Humedad relativa	0.1058	0.0647	0.351
Temperatura	0.0502	0.0301	0.068
Viento	0.0137	0.032	0.202

increase in correlation (r squared) for both flame height and length. However, these correlation values are still considered low. In the case of rate of fire spread, the correlation obtained through multiple regression was very similar to the correlation obtained for relative humidity. The corresponding models are as follows:

$$FH = 14.8562 - 0.1311RH - 0.439T - 0.0752S$$

$$FL = 13.4519 - 0.1169RH - 0.4205T - 0.1156S$$

$$RS = 12.2259 - 0.1116RH - 0.278T - 0.162S$$

Where:

**FH**= Flame height

**FL**= Flame length

**RS**= Rate of fire spread

**RH**= Relative humidity

**T**= Temperature

**S**= Wind speed

Due to the spatial variation in the fuel loads (Figure 8), it was not possible to analyze, in the same way as the environmental parameters, fuel influence on fire behavior. This implies that an analysis right across the plot, as was done with the environmental parameters, would not be sufficient; instead, one must consider the variations in fuel loads over the entire surface of the plot (Flores and Omi, 2003) where the prescribed burn was applied the fore, one could associate fire behavior in different section of the study plot. However, this analysis goes beyond the objectives of this work. Nevertheless, it was considered important to illustrate such variation (Figure 8), which enables one to see that there are considerable variations, which may account for the fire behavior reported in this study; therefore, it is recommended that this analysis be followed-up in future studies.

## CONCLUSIONS

Under the study area condition, from the three environmental factors analyzed, the relative humidity factor had the greatest influence on fire behavior. However, at times flame height and length had an erratic behavior in relation to relative humidity, which coincides with the findings reported by Anderson (1989). A simple explanation could be linked to fuel availability and continuity within the site. Therefore, it can be concluded that fire behavior was influenced as much by variations in relative humidity as the availability of fuels, mainly fine fuels, which have better ignitability



regresión múltiple, cuyos resultados se muestran en el Cuadro 4. Como se observa, hubo un aumento considerable de la correlación ( $r$  cuadrada) en los casos de la altura de llama y la longitud de llama. Sin embargo, estos valores de correlación aún se consideran bajos. En el caso de la velocidad de propagación del fuego, la correlación obtenida a través de la regresión múltiple fue muy similar a la correlación obtenida en relación a la humedad relativa. Los modelos correspondientes son los siguientes:

$$ALL = 14.8562 - 0.1311HR - 0.439T - 0.0752V$$

$$LOLL = 13.4519 - 0.1169HR - 0.4205T - 0.1156V$$

$$VP = 12.2259 - 0.1116HR - 0.278T - 0.162V$$

Donde:

**ALL**= Altura de llama

**LOLL**= Longitud de llama

**VP**= Velocidad de propagación del fuego

**HR**= Humedad relativa

**T**= Temperatura

**V**= Velocidad del viento

Debido a la variación espacial de las cargas de combustibles (Figura 8), no fue posible analizar, de la misma forma que los parámetros ambientales, la influencia de los combustibles en el comportamiento del fuego. Esto implica que no sería suficiente un análisis a lo largo de la parcela, como se hizo con los parámetros ambientales, sino que se requiere de considerar las variaciones de las cargas de combustibles en toda la superficie de la parcela (Flores y Omi, 2003) donde se aplicó la quema prescrita. De esta forma se podría asociar el comportamiento del fuego en cada una de las porciones de dicha parcela. Sin embargo, este análisis va más allá de los propósitos del presente trabajo. No obstante, se considera importante ilustrar dicha

**CUADRO 4. Estadísticos del análisis de correlación múltiple correspondientes a los tres parámetros ambientales con los que se relaciono el comportamiento del fuego.**

**TABLE 4. Statistical analysis of multiple correlation corresponding to the three environmental parameters related to fire behavior.**

Variable	Correlación	f-value	p-value
Altura de llama	0.391347	0.8573	0.5317
Longitud de llama	0.359083	0.7470	0.5780
Velocidad de propagación	0.385804	0.8375	0.5396

conditions. It should also be considered that the spatial distribution of these fuels may not have been sufficiently homogenous to maintain the same behavior over the entire plot. On the other hand, it should be taken into account that the moisture content of the fuels may have affected fire behavior in this burn. Since the burn was conducted early in the morning, it is clear that the moisture content of the fuels was high, which is a relevant factor, especially in those areas of the plot where the bed of fine fuels (litter and humus) had been deep.

In general, an increase in temperature was associated with a decrease in relative humidity; therefore, it was concluded that this relationship clearly influences the first stage of burning. On the other hand, since the wind speed remained relatively low, it did not have a significant influence on fire behavior. This also happened with slope, as it was the same over the entire plot; as a result, it was not a determining factor in the variations of the fire parameters evaluated.

The operational repercussions of these findings are very important because they can be used in fire management planning for places similar to the study area. Moreover, the methodology could serve as the basis for fire behavior assessments in other conditions and ecosystems. This would allow that the information generated will be both comparable and compatible. However, it is clear that several additional elements could be included to improve this type of evaluation in future studies, for example: a) the generation of maps showing the variation in the spatial distribution of forest fuels over the entire burn area; b) the use of wireless heat sensors; c) the taking of aerial photographs and videos, preferably from vertical viewpoints; d) the evaluation and, where appropriate, calibration of estimates made with fire behavior simulation systems.

Based on the experience gained in this work, several issues were found that could improve its operability. In addition, some points were identified that would give continuity to the study of fire behavior in Mexico's ecosystems. Based on the above, some of the most important recommendations are as follows: 1) use a video camera to monitor fire behavior, locating it where fuel loads and types are different. Thus, the various flame heights generated could be analyzed, thereby facilitating data corroboration back at the office; 2) adapt formats for data collection so that weather and fire behavior are recorded over short periods, at least every 10 minutes; and 3) prior to applying the controlled burn, it is important to draw a map to define the distribution of fuel loads and its relationship to fire behavior.

*End of the English Version*

variación (Figura 8), lo cual permite apreciar que se presentan variaciones considerables, las cuales pueden corresponder al comportamiento del fuego que se reporta en este estudio, por lo que se recomienda dar seguimiento a este análisis en futuros trabajos.

## CONCLUSIONES

Bajo las condiciones del área de estudio de los tres factores ambientales analizados, fue la humedad relativa el factor que tuvo mayor influencia en el comportamiento del fuego. No obstante, en algunos momentos las características de la llama (altura y longitud) tuvieron un comportamiento errático en referencia a la humedad relativa, lo cual coincide con lo reportado por Anderson (1989). Una explicación sencilla podría ser la disponibilidad y continuidad de los combustibles dentro de la parcela. De esta forma, se puede concluir que el comportamiento del fuego fue influido tanto por las variaciones en la humedad relativa como por la disponibilidad de combustibles, principalmente combustibles ligeros, los cuales tienen mayores condiciones de ignitabilidad. También se debe considerar que, posiblemente, la distribución espacial de estos combustibles no fue lo suficientemente homogénea como para mantener el mismo comportamiento a lo largo de la parcela. Por otra parte, debe tomarse en cuenta que la humedad de los combustibles pudo afectar el comportamiento del fuego en esta quema. Considerando que se quemó temprano por la mañana, es claro que el contenido de humedad de los combustibles era alto; lo cual es un factor relevante, principalmente en aquellas áreas de la parcela donde la cama de combustibles finos (hojarasca y humus) haya sido profunda.

En general, el aumento de temperatura estuvo asociado con una disminución de la humedad relativa, por lo que se concluye que esta relación influye claramente en la primera etapa de la quema. Por otra parte, debido a que la velocidad del viento se mantuvo relativamente baja, éste no tuvo una influencia importante en el comportamiento del fuego. Lo mismo puede decirse de la pendiente, ya que ésta fue homogénea en todo el terreno, por lo que no un factor determinante en las variaciones de los parámetros del fuego evaluados.

Las repercusiones operativas de estos resultados son muy importantes, ya que pueden usarse para la planeación en el manejo del fuego en lugares similares al área de estudio, pero la metodología puede servir de base para evaluaciones del comportamiento del fuego en otras condiciones y ecosistemas. Esto permitiría que la información generada pueda ser tanto comparable como compatible. No obstante, es claro que existen varios aspectos que podrían incluirse para mejorar este tipo de evaluaciones en futuros trabajos, por ejemplo: a) la generación de mapas que muestren la variación de la

distribución espacial de combustibles forestales a lo largo del área a quemar; b) uso de sensores de calor inalámbricos; c) toma de fotos y videos en vistas aéreas, preferentemente verticales; d) evaluación y, en su caso, calibración de estimaciones hechas con sistemas de simulación del comportamiento del fuego.

De acuerdo a la experiencia adquirida en este trabajo, se encontraron varios aspectos que podrían mejorar su operatividad. Asimismo, se definieron algunos temas que darían continuidad al estudio del comportamiento del fuego en los ecosistemas de México. Con base en lo anterior, a continuación se señalan algunas de las recomendaciones más importantes: 1) Utilizar cámara de video para el monitoreo del comportamiento del fuego ubicando lugares estratégicos donde la carga y tipos de combustibles son diferentes. De esta manera se podrían analizar las diversas alturas de llama generadas, lo cual facilitaría la corroboración de datos en gabinete; 2) Adecuar formatos de toma de datos de tal manera que se registren el tiempo atmosférico y comportamiento del fuego en periodos cortos, por lo menos cada 10 minutos; 3) Es importante que antes de aplicar la quema controlada se trace un mapa para definir la distribución de cargas de combustible y su relación con el comportamiento del fuego.

## LITERATURA CITADA

- ANDERSON, H. E. 1970. Forest fuel ignitability. *Fire technology*, 6: 312-319.
- ANDERSON, H. E. 1989. Moisture diffusivity and response time in fine forest fuels. *Canadian J. of Forest Research*, 20: 315-325.
- BROWN, J. K., OBERHEU, R. D.; JOHNSTON, C. M. 1982. Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the interior West. USDA, Forest Service General Technical Report INT-129. 48 p.
- CAMPBELL, J.; GREEN, K.; WEINSTEIN, D.; FINNEY, M. A. 1996. Fire growth modeling in an integrated GIS environment. *In: Proc. of the Southern Forestry Geographic Information Systems Conference*. Athens, GA. pp. 133-142.
- De BANO, L. F. 1976. Nutrients lost in debris and runoff water from a burned chaparral watershed. *Conference proceedings of the Fed. Inter-Agency Sediment*, 3: 13-27. USA.
- FINNEY, M. A. 1996. FARSITE. Fire Area Simulator. User's guide and technical documentation. Systems for Environmental Management. Version 2.0. Missoula, MT. USA. 116 p.
- FLORES G., J. G.; BENAVIDES S., J. D. 1994a. Influencia de dos tipos de quemas controladas en bosque de pino en Jalisco. Folleto Técnico Núm. 5 Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Guadalajara, Jalisco, México.
- FLORES G., J. G.; BENAVIDES S., J. D. 1994b. Efecto de las quemas prescritas sobre algunas características del suelo en un rodal de pino. *Revista Terra Vol. 12(4)*: 393-400.
- FLORES G., J. G.; OMI, P. N. 2003 Mapping forest fuels for spatial fire behavior simulations using geomatic strategies. *Agrociencia*, 37(1): 65-72.

- GONZÁLEZ R., A. 2001. Efecto del chamuscado de copa en el crecimiento en diámetro de *Pinus hartwegii* Lindl. Tesis de Maestría en Ciencias. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 98 p.
- JOHNSTON, W. F. 1971. Broadcast burning slash favors black spruce reproduction on organic soil in Minnesota. *The Forest Chronicle*, 47: 33-35.
- VAN LEAR, D. H.; WALDROP, T. A. 1991. Prescribed burning for regeneration. *Forest regeneration manual*. Edited by Duryea, M.L. and Dougherty, P.M. Klumer Academic Publishers. Netherlands. pp. 235-249.
- VILLERS R., M. DE L. 2006. Incendios forestales. *Ciencias*. No. 081. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F, 60-66. <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/644/64408110.pdf>. Año de consulta: 2007.
- WILLIAMS, J. E.; WHELAN, R. J.; GILL, A. M. 1994. Fire and environmental heterogeneity in Southern temperate forest ecosystems: implications for management. *Aust. J. Bot.*, 42: 125-137.