

LIMITACIONES ESPACIALES DE LOS MODELOS DE COMBUSTIBLES FORESTALES AL COMPARAR DOS DISEÑOS DE MUESTREO

José Germán Flores Garnica¹, Alfonso de la Rosa Vázquez² y David Arturo Moreno González¹

RESUMEN

Los modelos de combustibles forestales (MC) son una herramienta práctica, usada en la generación de mapas para simular el comportamiento del fuego. Sin embargo, el mapeo con base en MC ha sido uno de los retos más difíciles que han enfrentado los científicos forestales, debido a que tiene limitantes espaciales, ya que considera que la carga de combustibles es homogénea dentro de un área determinada. Esta situación se puso a prueba al comparar dos tipos de muestreo en el ejido "El Largo y Anexos" del Estado de Chihuahua, donde se supone que los combustibles tienen una distribución estratificada, lo cual contradice al MC. La colecta de datos se dividió en dos fases. En la primera, la información se obtuvo a partir de un inventario forestal con diseño al azar, en el que se establecieron 554 sitios de muestreo de 1000 m² cada uno y se midieron los combustibles con tiempo de retardo de 1 hora (1HR), hojarasca (H) y materia orgánica (MO). En la segunda, se realizó un diseño de muestreo estratificado para los 554 sitios de la fase inicial, mediante un diseño estratificado. De esta forma, se compararon el Muestreo Simple Aleatorio (MSA) y el Muestreo al Azar Estratificado (MAE). Los resultados indican que el MAE fue 674, 276 y 360% más preciso que el MSA para los combustibles de 1HR, H y MO, respectivamente. Las cargas de combustibles fueron mejor evaluadas con el MAE, por lo tanto se rechaza la hipótesis de homogeneidad dentro de los MC.

Palabras clave: Bosque de pino, cargas de combustibles, mapas de riesgo de incendio, modelos de combustibles, muestreo al azar estratificado, muestreo simple aleatorio.

Fecha de recepción: 10 de julio de 2003.

Fecha de aceptación: 23 de febrero de 2005.

¹ Campo Experimental Los Colomos, Centro de Investigación Regional Pacífico Centro, INIFAP. Correo-e: flores.german@inifap.gob.mx

² Dirección General de Investigación Forestal, INIFAP.

ABSTRACT

The fuel model concept (FM) is a practical tool to generate forest fuel maps, which are used to support fire behavior simulations. However, FM mapping has been one of the most difficult challenges that forest scientists have faced. Moreover, this concept has certain spatial limitations because it considers that fuel loading is homogeneous within an area qualified as a given FM. This condition was tested through two sampling methods in "El Largo y Anexos", ejido at Chihuahua state, where supposedly fuels have a stratified distribution, which is opposite to MC. Data collection was divided in two phases. In the first one, data were collected through a random sampling design, where 554 sample plots (1000 m²) were evaluated. The following forest fuels were inventoried: 1 hour lag time fuels (1HR), litter (H), and organic matter (OM). In the second phase data collection was made from the 554 sample plots of the first phase, based on a stratified sampling design. Thus, the two sampling designs were assessed and compared: Random Sampling Design (RSD) and Stratified Random Design (SRD). Results show that, in the case of 1HR, SRD was 674% more precise than RSD. In the case of H and MO, SRD was 276 and 360% respectively more precise compared with RSD. The fact that fuels loadings were better evaluated using a SRD suggest that the hypothesis of fuel homogeneity within a FM must be rejected.

Key words: Pine forest, fuel loadings, fire risk maps, fuel model, stratified random design, random sampling design.

INTRODUCCIÓN

La simulación espacial del comportamiento del fuego es una herramienta muy importante en la toma de decisiones para diversas actividades relacionadas con la prevención y combate de los incendios forestales, así como con la restauración de los ecosistemas sometidos a eventos de ese tipo. Existen varios sistemas que son utilizados con este fin, tales como: FARSITE (Finney, 1998) y EMBYR (Flores, 2001), los cuales se basan en modelos de simulación de la dispersión del fuego (Rothermel, 1983) y requieren de una serie de mapas temáticos, a saber: el de pendiente, densidad de arbolado, exposición, altitud y combustibles (Campbell *et al.*, 1996); entre ellos el mapa de combustibles es el más complicado de generar, pues de hecho representa uno de los mayores retos que han afrontado los científicos forestales (Flores, 2001).

Dado que es difícil describir todas las características físicas de los combustibles presentes en un bosque, se usa una descripción general o un conjunto de valores numéricos de sus propiedades, basados en determinada combinación y proporción del material inflamable, denominada "modelo de combustible" con el cual se predice cierto comportamiento del fuego (Omi, 1997; Keane *et al.*, 1999).

Los modelos de combustibles (MC) se clasifican en cuatro grupos: pastos, arbustos, madera y desperdicios de aprovechamientos (Anderson, 1982). Varios autores han desarrollado diversos modelos, entre ellos se pueden citar a Rothermel (1972), quien propuso los 13 más utilizados; en años posteriores Deeming *et al.* (1977) formularon otros 20 para el Sistema Nacional de Riesgo de Incendios de Estados Unidos. Así mismo, a partir del subsistema FUEL, el cual forma parte del sistema BEHAVE, es posible elaborar un MC para las condiciones específicas de un bosque en particular (Andrews, 1986; Burgan y Rothermel, 1984).

Los MC representan comportamientos del fuego, que están relacionados con la carga y distribución de materiales combustibles de diferente tamaño (Anderson, 1982). La organización de los combustibles muertos en clases de tamaño es una convención estandarizada que se deriva del concepto de "tiempo de retardo", el cual se refiere al tiempo que tarda la humedad de un combustible muerto en equilibrarse con la humedad relativa del ambiente (International Fire Service Training Association, 1998); aquellos que tienen un tiempo de retardo corto alcanzan dicho equilibrio rápidamente y ocurre lo contrario con los de largo tiempo de retorno (Countryman, citado por Omi, 1997). Esta variación permite clasificar los combustibles de la siguiente forma: de 1 hora, de 10 horas, de 100 horas y de 1000 horas.

Keane *et al.* (1999) mencionan que uno de los primeros antecedentes del inventario directo de combustibles se llevó a cabo en 1936, con el mapeo de la resistencia del fuego al control y la velocidad de su propagación; desde entonces se han generado estrategias alternativas para estimar las cargas de combustibles en peso por unidad de área, como soporte a las predicciones del comportamiento del fuego. Una de ellas es la técnica de intersecciones planares, con la que se estima el material leñoso presente en el suelo (Brown *et al.*, 1994). Por otra parte, la colección de muestras y el uso de técnicas de regresión lineal, con base en la relación entre el peso y la profundidad de la cama del material inflamable, han sido utilizadas para estimar las cargas de combustibles del piso forestal (Brown *et al.*, 1982; Flores, 1994).

La ventaja principal de un inventario directo de combustibles es que los mapas se obtienen a partir de condiciones reales; una alternativa derivada de la medición directa son los pares estereoscópicos o fotoseries que representan ciertas condiciones del bosque (Chandler *et al.*, 1983).

Por lo general, la clasificación de un área forestal en los correspondientes MC se basa en dos perspectivas: a) el criterio de expertos; y b) la correlación con parámetros asociados tales como el tipo de vegetación o la densidad (Chuvienco y Congalton, 1989). Aunque estas dos alternativas son prácticas, también resultan ser subjetivas, por lo que no permiten evaluar con precisión la distribución espacial

de los combustibles, debido a que el concepto de MC considera una homogeneidad espacial de cargas de combustibles dentro de toda un área calificada con cierto MC; ésto implica que el comportamiento del fuego sólo variará por cambios en la pendiente, y en la velocidad y dirección del viento. Sin embargo, los bosques presentan una marcada variación de las cargas de combustibles, como respuesta a diversas actividades como son las quemas, las prácticas silvícolas, la recolección de leña, el pastoreo, etc.

No obstante que el uso del concepto de MC tiene sus limitaciones, sobre todo para determinar el comportamiento del fuego en áreas menores a 100 ha, se continua usando en forma indiscriminada (Flores, 2001). Si la uniformidad espacial que se considera en los MC fuese cierta, las cargas de combustibles se podrían determinar mediante un muestreo aleatorio completamente al azar, pero esto no se cumple en la mayoría de los casos (Flores, 2001). De acuerdo con lo anterior, el trabajo aquí expuesto se enfocó en la necesidad de contar con un inventario de combustibles espacialmente adecuado, por lo que el principal objetivo fue estimar la cantidad de material forestal inflamable en toneladas por hectárea (Ton/ha) en el Ejido El Largo y Anexos, en el estado de Chihuahua.

La información que resulte de este proyecto será de utilidad como una estrategia para estimar la distribución espacial de las cargas de combustibles, lo que a su vez permitirá definir áreas de acuerdo a su nivel de riesgo o peligro de incendio, basándose en la carga de combustibles (Pyne *et al.*, 1996). Como consecuencia, el producto final sería la obtención mapas temáticos donde se muestre la distribución de los combustibles y los niveles de riesgo de incendio respectivos; para ello se requerirá de un Sistema de Información Geográfica, el que también apoyará la ejecución de simulaciones del comportamiento del fuego.

En el presente trabajo se considera que, si no se cumple la condición de homogeneidad de cargas de combustibles dentro de un MC dado, la hipótesis nula (H_0) es que la variación espacial de combustibles no es heterogénea, en este caso es estratificada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para probar la hipótesis nula se utilizaron dos diseños de muestreo: I) Muestreo simple aleatorio (MSA); y II) Muestreo al azar estratificado (MAE). El criterio de decisión fue obtener un error de muestreo de alrededor de 10%.

El estudio se llevó a cabo con información obtenida del inventario forestal realizado en los bosques del ejido "El Largo" y anexos, localizado en la región montañosa llamada Mesa del Huracán, al noroeste del estado de Chihuahua (Figura 1), donde las elevaciones varían de 1400 a 2300 msnm. El promedio de temperatura anual es de 8.5 a 12°C, con la mínima registrada de -26°C y la

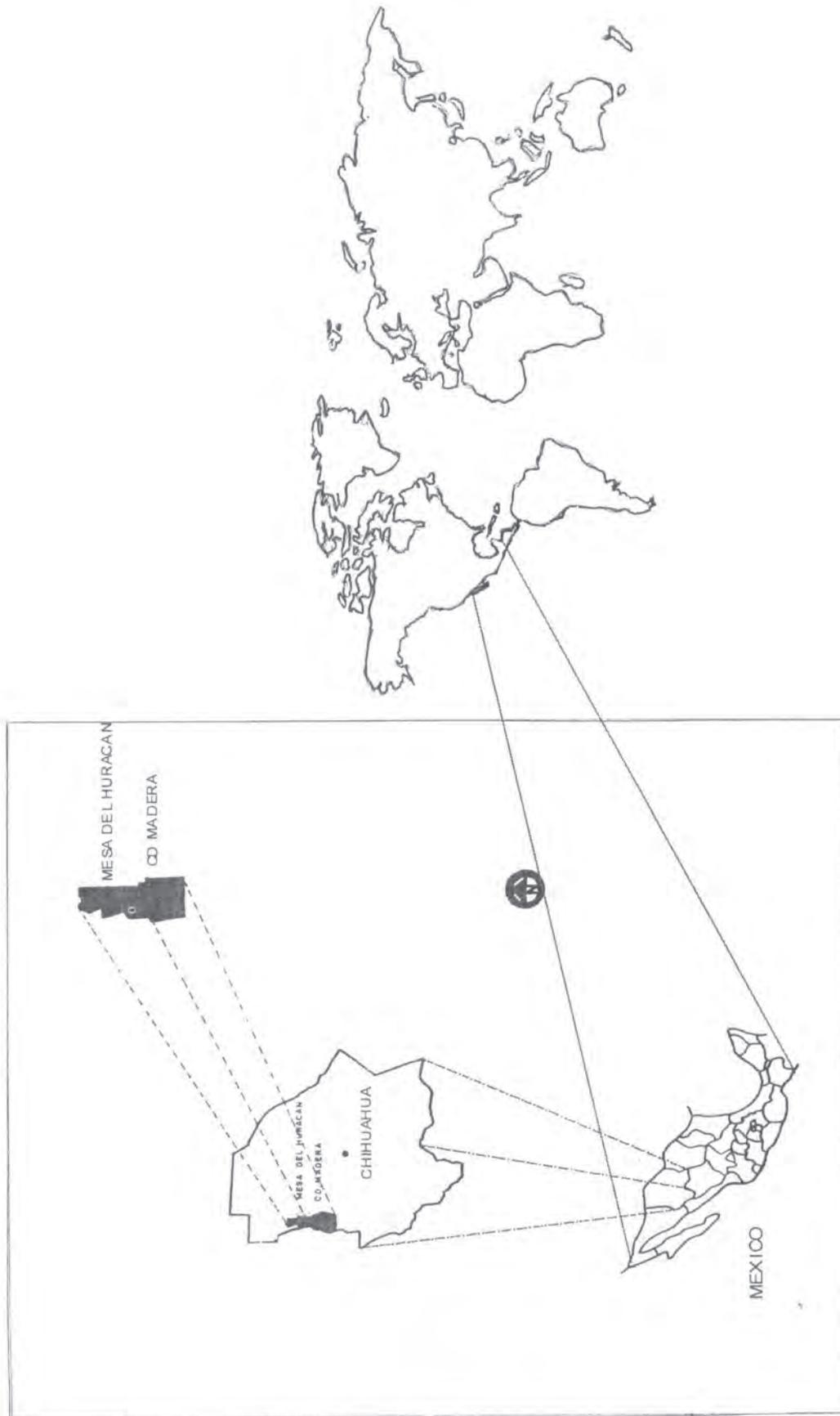


Figura 1. Mesa del Huracán, sitio donde se ubica el ejido "El Largo" y Anexos.

máxima de 38°C. La precipitación anual es de 690 a 1130 mm, con la mayor ocurrencia de lluvias entre julio y septiembre. La temporada más seca se presenta de marzo a junio, periodo en el cual la mezcla de las especies *Pinus durangensis* Martínez, *P. arizonica* Engelm., *P. engelmannii* Carr. y *Quercus sideroxyla* Humb. et Bonpl. contienen una carga particular de combustibles de 1 hora, lo que representa un alto riesgo de incendio. (UCODEFO No 2, 1997).

La colecta de datos fue dividida en dos fases. En la primera se consideró el inventario de campo y en la segunda se efectuó una selección de la base de datos obtenida en la primera fase. Este proceso es similar al muestreo doble por estratificación (Scheaffer *et al.*, 1996).

Fase 1: Inventario de combustibles forestales

El inventario forestal se llevó a cabo en un área de 1200 ha destinadas al manejo para extracción de madera. La distribución de los sitios estuvo basada en un diseño de muestreo al azar simple, obteniendo datos del arbolado y material combustible de 1 hora de tiempo de retardo [1HR], hojarasca [H] y materia orgánica [MO], ya que los combustibles de dimensiones pequeñas tienen más influencia en el comportamiento del fuego (Flores, 2001). Se consideró como MO todo aquel material en inicio de descomposición y descompuesto.

En total se geoposicionaron y muestrearon 554 sitios de 1000 m², distribuidos al azar en 43 rodales definidos por especies, densidad y exposición geográfica. La evaluación de combustibles se fundamentó en las técnicas descritas por Brown *et al.* (1982), por lo que se usó el diseño de sitio de muestreo que se ilustra en la Figura 2. La información se integró en una base de datos.

Fase 2: Selección de sitios muestreados

A partir de la base de datos integrada con los registros de los 554 sitios evaluados en la primera fase, se seleccionaron los sitios de muestreo mediante dos diseños de muestreo: aleatorio simple y al azar estratificado, bajo el criterio de un 10% de error de muestreo.

Muestreo simple aleatorio (MSA).- De acuerdo con Scheaffer *et al.* (1996), este es el diseño de muestreo más simple, en el que "una muestra de tamaño n es obtenida de una población de tamaño N , de tal forma que cada muestra posible tenga la misma oportunidad de ser seleccionada". En el presente estudio se consideró al número total de sitios, obtenidos en la primera fase, como la población (N). Para obtener la muestra, primero se estimó la variabilidad de la población mediante un muestreo preliminar de 25 sitios, lo cual correspondió a $\pm 5\%$ de la población; la selección se hizo al azar con base en una tabla

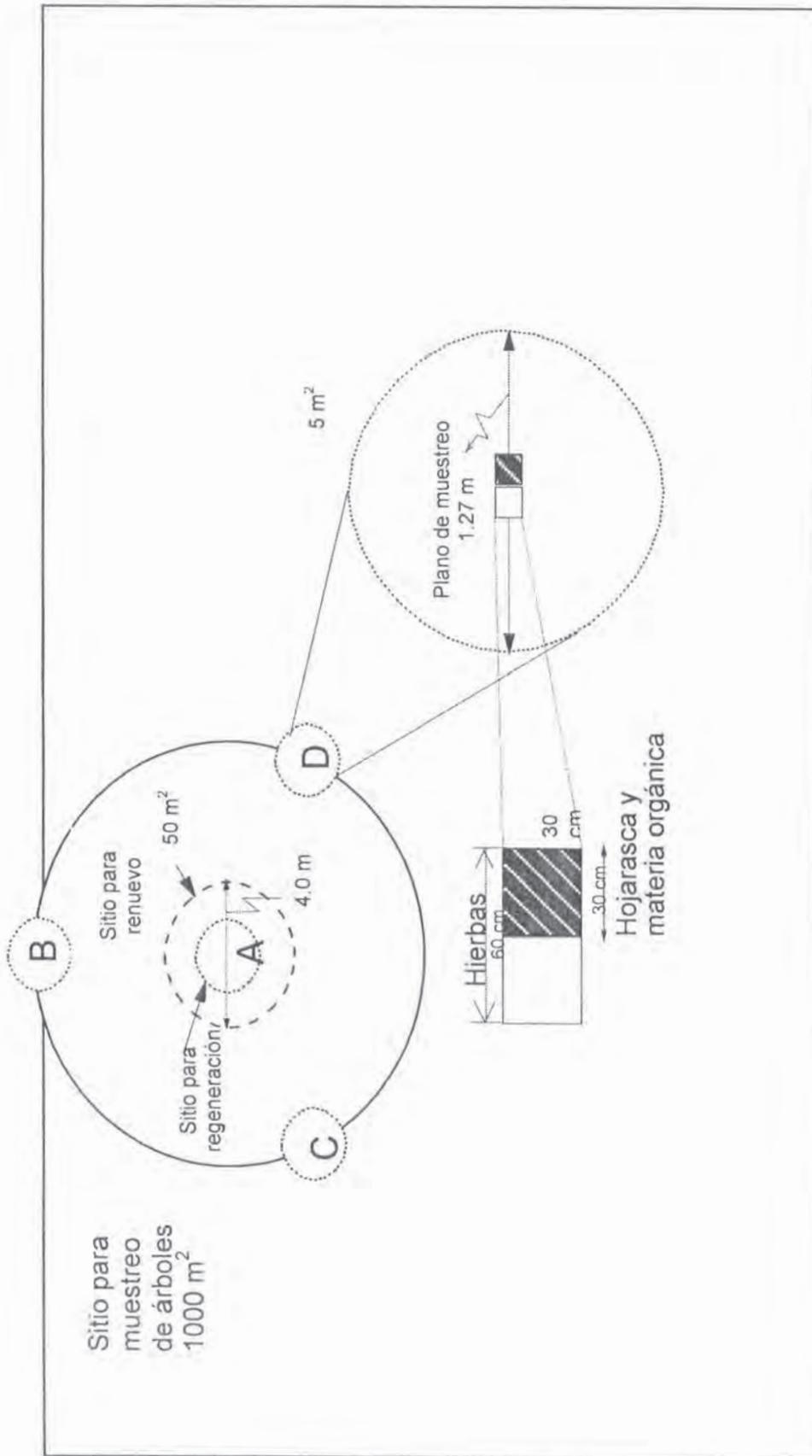


Figura 2. Diseño del sitio de muestreo, adaptado de la propuesta de Brown *et al.* (1982). Los combustibles de 1HR se evaluaron en el plano de muestreo de los sitios B, C y D.

de números aleatorios (Hansen *et al.*, 1993). Una vez conocida la variabilidad y considerando un límite (B) en el error de muestreo de ± 12 Ton/ha, aproximadamente 30% de la mayoría de los valores bajos, con la ecuación 1 se calculó el tamaño de muestra.

$$n = \frac{N\sigma^2}{(N-1)D + \sigma^2} \quad (1)$$

$$D = \frac{B^2}{4} \quad (2)$$

Donde:

n = tamaño de muestra estimado

N = tamaño de la población

σ^2 = varianza de la población

D = varianza del estimador de la media poblacional

B = límite del error de estimación ($p = 0.05$).

La media de la población ($\mu = y$) para cada tipo de muestreo se estimó con la ecuación 3; mientras que con la ecuación 4 se calculó la varianza de y ; por último para el límite del error de muestreo se usó la ecuación 6.

$$\mu = y = \frac{\sum y_i}{n} \quad (3)$$

$$v(Y) = \frac{s^2}{n} \left[\frac{N-n}{N} \right] \quad (4)$$

Donde:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y)^2}{n-1} \quad (5)$$

$$B = 2\sqrt{V(y)} \quad (6)$$

Donde:

μ = media de la población

y = media estimada

s^2 = varianza estimada

y_i = $i^{\text{ésima}}$ observación.

Muestreo al azar estratificado (MAE).- Scheaffer *et al.* (1996) indican que este tipo de muestreo se obtiene al separar los elementos de la población en grupos no sobrepuestos llamados estratos. De acuerdo con Hansen *et al.* (1993), el papel de la estratificación es incrementar la representación de los resultados del muestreo, lo cual dependerá del grado de homogeneidad que se logre dentro de los estratos.

Como criterio de estratificación se usaron los 43 rodales previamente descritos. El cálculo de la varianza de los estratos (s_i^2) se realizó a partir de una muestra de cinco sitios por estrato. Con esta información y la ecuación 7 se determinó el tamaño. El criterio de Neyman (Scheaffer *et al.*, 1996) se utilizó para definir el número de sitios de muestreo por estrato, el cual asigna este número proporcionalmente (w_i) al tamaño del estrato y a su variabilidad.

$$n = \frac{\sum_{i=1}^{I_e} N_i^2 s_i^2 / w_i}{N^2 D + \sum_{i=1}^{I_e} N_i^2 s_i^2} \quad (7)$$

La media de la población ($\mu = y$) para cada tipo de combustibles, se estimó con la ecuación 8, mientras que la varianza de y se obtuvo con la ecuación 9. El límite del error de muestreo se determinó de igual forma que para el MSA.

$$y_{st} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{I_e} N_i y_i \quad (8)$$

$$V(y_{st}) = \frac{I}{N^2} \sum_{i=1}^{I_e} N_i^2 \left(\frac{N_i - n_i}{N_i} \right) \left(\frac{s_i^2}{n_i} \right) \quad (9)$$

Análisis de la información

Con base en la varianza de los estimadores se realizó un análisis de la eficiencia relativa (ER) de los estimadores para comparar tanto el MSA como el MAE. De acuerdo con Scheaffer *et al.* (1996), cuando se tiene un estimador, por ejemplo E1 y E2 para una media μ , se debe escoger aquel con la menor varianza. También es conveniente describir el tamaño relativo de las dos varianzas por medio del análisis de sus radios; a este radio se le conoce como la eficiencia relativa para los dos estimadores. Para definir ER, se usa la varianza mayor como el numerador y la menor como el denominador; así, si ER es >1 , el estimador que corresponde a la varianza del denominador es más eficiente, pero si tal relación es <1 , el estimador correspondiente a la varianza del numerador es más eficiente.

RESULTADOS

Muestreo simple aleatorio (MSA)

Dado que para estimar el tamaño de muestra se requiere un valor de varianza, se realizó un muestreo preliminar de 25 sitios; los resultados se reúnen en el Cuadro 1. El otro elemento que se tuvo que definir fue el límite del error (B), que es necesario para calcular el factor D. Inicialmente se consideró como B un 10% de la media del muestreo preliminar.

Cuadro 1. Valores de medias y varianzas resultantes del muestreo preliminar para la estimación del MSA.

Combustibles Estadísticos	1 Hora	Hojarasca	Materia orgánica
	Media (t/ha)	39.577	65.537
Varianza	2702.03	2539.34	1595.18

El tamaño de muestra obtenido fue muy grande (Cuadro 2), por lo que se decidió probar diferentes valores para el error (B), para ello se usó una muestra de 67 sitios, a partir de las siguientes consideraciones: 1) el valor económico que representa la toma de cada muestra; y 2) para algunos valores de límite, se calculó el tamaño de muestra que representó más de 50% de la población. Esto

asegura un 30% de límite del error para los combustibles de 1HR, 14% para hojarasca y 22% para materia orgánica. Los estadísticos derivados del MSA se resumen en el Cuadro 3.

Cuadro 2. Comparación de los tamaños de muestra resultantes al cambiar el límite del error.

Límite de error (%)	1 Hora	Hojarasca	Materia orgánica
10	305	168	233
20	132	54	87
30	67	26	43
40	41	14	25

Cuadro 3. Estimaciones resultantes a partir de un Muestreo Simple al Azar.

Combustibles Estadísticos	1 Hora	Hojarasca	Materia orgánica
	Media (ton/ha)	31.73	56.80
Varianza (y)	15.3908	21.43995	25.13978
Límite	7.85	9.26	10.03
Error (%)	24.72	16.30	23.06

Como se puede apreciar, el error de muestreo obtenido no es considerado como aceptable, ya que el límite que se estableció como objetivo fue 10%. Probablemente el resultado para hojarasca podría ser útil con base en algunos supuestos relacionados a la media de toneladas por hectárea. En el caso de los combustibles de 1HR y materia orgánica, los porcentajes de error correspondientes no son adecuados para basar las estimaciones. Una solución sería incrementar el tamaño de muestra; sin embargo (como fue demostrado),

se requiere que éste sea muy grande para lograr un error menor a 10%. Los resultados sugieren que se debe aplicar otro tipo de diseño de muestreo.

Muestreo al azar estratificado (MAE).

La estratificación se llevó a cabo utilizando la "regla óptima para la selección de estratos", que se basa en el método de la raíz cuadrada acumulada de la frecuencia (Scheaffer *et al.*, 1996) en los 67 sitios que resultaron en el MSA. Se calcularon cuatro estratos para 1HR, ya que en este tipo de combustibles se presentaron los valores más altos, pero en el caso de hojarasca y materia orgánica se definieron tres estratos (Cuadro 4). El intervalo para cada estrato por tipo de combustible se presenta en el Cuadro 5.

El tamaño de muestra se determinó considerando el mismo número de muestras (n_i) para cada estrato, por lo que se asumieron fracciones de ubicación (w_i) iguales a $\frac{1}{4}$ para 1HR, y a $\frac{1}{3}$ para hojarasca y materia orgánica. De la primera fase se conoce el número de sitios de muestreo que correspondió a cada intervalo (Cuadro 6).

La varianza se calculó mediante un muestreo preliminar de 10 sitios por cada clase; en el caso de la clase >150 de 1HR, sólo fue posible tomar siete muestras. A continuación, se definió un límite de estimación de ± 5 Ton/ha, para obtener el valor de D. Es importante hacer notar que se usó un límite menor que en MSA, porque se trató de utilizar un número similar de muestras, lo que permitió hacer una comparación más realista entre los dos diseños de muestreo probados. Con esta información, se calculó el tamaño de muestra por clase correspondiente a cada tipo de combustibles. La ubicación de las muestras se hizo con base en el criterio de Neyman (Cuadro 7).

Cuando el tamaño de muestra fue menor a 10 sitios, se consideraron las 10 pruebas del muestreo preliminar. Los valores de medias y varianzas por clase, de acuerdo con cada tipo de combustibles se presentan en el Cuadro 8. A partir de la información generada se estimaron los valores medios de Ton/ha para cada tipo de combustible.

Las estadísticas, en el caso del MAE, son mejores que en el MSA (cuadros 3 y 9); aunque el error de muestreo para los combustibles de 1HR es ligeramente mayor que 10%, el intervalo es bastante aceptable. Por otra parte, la precisión de los estimadores de la media de hojarasca y materia orgánica tuvieron valores menores a 10%, lo que significa que se pueden hacer supuestos acerca de la media de la población con un alto nivel de confianza.

Cuadro 4. Frecuencia de toneladas/hectárea usadas para calcular el intervalo de cada estrato, con base en la "regla óptima para la selección de estratos" (Scheaffer *et al.*, 1996).

1 HR				Hojarasca				M. O.			
I	F	RCF	SRCF	I	F	RCF	RCFA	I	F	RCF	RCFA
0	0	0.00	0.00	0	1	1.00	1	0	5	2.24	2.23
10	22	4.69	4.69	10	8	2.83	3.83	10	14	3.74	5.97
20	6	2.45	7.14	20	4	2.00	5.83	20	8	2.83	8.80
30	14	3.74	10.88	30	9	3.00	8.83	30	4	2.00	10.80
40	6	2.45	13.33	40	7	2.65	11.47	40	9	3.00	13.80
50	4	2.00	15.33	50	6	2.45	13.92	50	5	2.24	16.04
60	5	2.24	17.57	60	3	1.73	15.66	60	4	2.00	18.04
70	2	1.41	18.98	70	2	1.41	17.07	70	4	2.00	20.04
80	0	0.00	18.98	80	4	2.00	19.07	80	3	1.73	21.77
90	1	1.00	19.98	90	9	3.00	22.07	90	1	1.00	22.77
100	0	0.00	19.98	100	3	1.73	23.80	100	2	1.41	24.18
110	5	2.24	22.22	110	2	1.41	25.22	110	1	1.00	25.18
120	0	0.00	22.22	120	5	2.24	27.45	120	2	1.41	26.60
130	1	1.00	23.22	130	2	1.41	28.87	130	1	1.00	27.60
140	0	0.00	23.22	140	1	1.00	29.87	140	2	1.41	29.01
150	1	1.00	24.22	150	0	0.00	29.87	150	0	0.00	29.01

continúa...

Cuadro 4, continuación...

160	0	0.00	24.22	160	0	0.00	29.87	160	0	0.00	29.01
170	0	0.00	24.22	170	0	0.00	29.87	170	0	0.00	29.01
180	0	0.00	24.22	180	1	1.00	30.87	180	1	1.00	30.01
190	0	0.00	24.22	190	0	0.00	30.87	190	0	0.00	30.01
200	0	0.00	24.22	200	0	0.00	30.87	200	1	1.00	31.01
210	0	0.00	24.22	210	0	0.00	30.87	210	0	0.00	31.01
220	0	0.00	24.22	220	0	0.00	30.87	220	0	0.00	31.01
230	0	0.00	24.22	230	0	0.00	30.87	230	0	0.00	31.01
240	0	0.00	24.22	240	0	0.00	30.87	240	0	0.00	31.01
250	0	0.00	24.22	250	0	0.00	30.87	250	0	0.00	31.01

I = Intervalo. F = Frecuencia. RCF = Raíz cuadrada de frecuencia. RCFA = RCF acumulada.

Cuadro 5. Intervalos de toneladas por hectárea para cada uno de los estratos, de acuerdo con los tres tipos de combustibles.

Estratos \ Combustibles	Estratos			
	A	B	C	D
1 HR	0-10	10.01-30	30.01-150	>150
Hojarasca	0-30	30.01-70	>70	
Materia orgánica	0-20	20.01-50	>50	

Cuadro 6. Número de sitios de muestreo que corresponden a cada intervalo (Ton/ha), por cada una de las clases de combustibles.

1 HR		Hojarasca		M.O.	
Clases	Muestras	Clases	Muestras	Clases	Muestras
0-10	232	0-30	100	0-20	111
10.01-30	126	30.01-70	210	20.01-50	195
30.01-150	189	>70	244	>50	248
>150	7				
TOTAL	554		554		554

Cuadro 7. Número de muestras por estrato, para cada tipo de combustible, con base al criterio de ubicación de Neyman.

Combustible	A	B	C	D	Total
1 HR	7	12	18	17	54
Hojarasca	15	16	23	---	54
M.O.	16	14	28	---	58

Análisis comparativo

No obstante que el diseño MAE proporcionó mejores estimadores de la media de la población, se evaluó la proporción de tal eficiencia. Para esto se calculó el valor de eficiencia relativa (ER) para cada tipo de combustibles (Cuadro 10).

De acuerdo con los valores de ER, en el caso de los materiales 1-HR, el MAE fue 674% más preciso que el MSA; mientras que para la hojarasca y la materia orgánica correspondió a 276 y 360%, respectivamente (Figura 3). En este caso, la diferencia proporcional entre el MAE y el MSA no es muy remarcable como para el ER; sin embargo, es posible apreciar que el rango de error del MAE es menor que el del MSA.

Cuadro 8. Estadísticos para cada estrato, correspondientes a los tres tipos de combustibles.

1 HR	0-10	10.01-30	30.01-150	>150
Media	2.17	22.2	56.39	183.26
Varianza	0.726778	12.10182	328.517	274.3621
Hojarasca	0-30	30.01-70	>70	
Media	15.04	47.81	90.97	
Varianza	90.0751	97.15129	618.7383	
M.O.	0-20	20.01-50	>50	
Media	7.60	37.87	99.16	
Varianza	28.19639	21.58409	821.9737	

Cuadro 9. Estimadores finales resultantes del muestreo al azar estratificado.

Estadísticos	1HR	Hojarasca	Materia orgánica
Media	27.51	60.90	37.87
Varianza (y)	1.987521	5.698821	5.456453
Límite	2.82	4.77	4.67
% error	10.24	7.84	7.88

Cuadro 10. Eficiencia relativa resultante del diseño de Muestreo Aleatorio Estratificado por tipo de combustible.

Tipo de combustible	Eficiencia relativa
1 HR	7.744
Hojarasca	3.762
M.O.	4.607

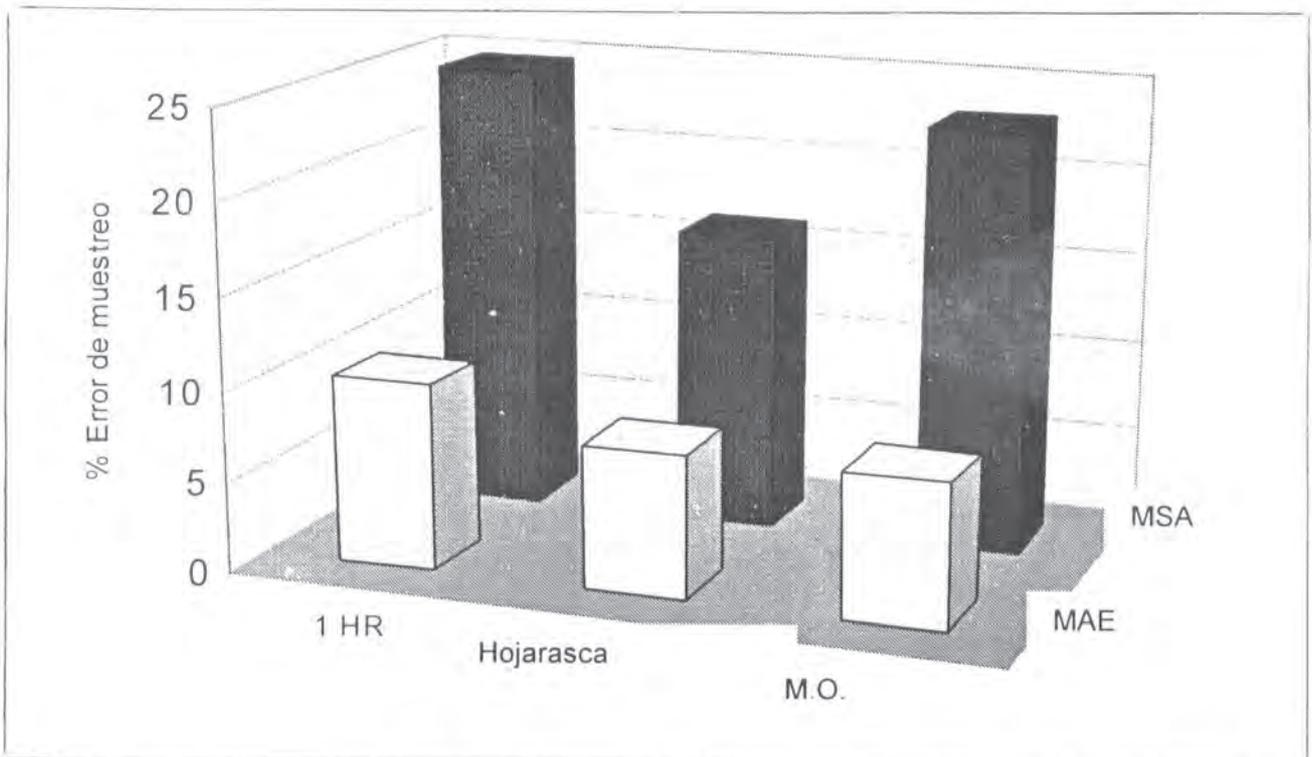


Figura 3. Comparación del error de muestreo resultante entre MAE y MSA, para cada uno de los tipos de combustibles.

DISCUSIÓN

Aunque la información que se usó en este estudio fue generada mediante un diseño de muestreo al azar, la disposición de los sitios a lo largo del área de trabajo fue muy útil para la definición de cierto nivel de estratificación de los materiales forestales inflamables. Esto sugiere que la distribución espacial de las cargas de combustibles es heterogénea, por lo que no es posible considerar que el concepto de MC explique todas las situaciones que se presentan en un bosque, lo que implica que sería más conveniente usar un diseño de muestreo al azar estratificado.

Una ventaja del proceso de muestreo fue que se tuvieron datos de 554 sitios, lo cual permitió utilizar algunos valores tales como: el número original de sitios de muestreo y el intervalo de peso en el que cada sitio se ubicó, lo que es esencial para definir el MAE. No obstante, es importante considerar que el error del muestreo obtenido en la primera fase se mantuvo en todas las estimaciones de la segunda fase. En general, el método seguido en este estudio es muy similar al muestreo doble por estratificación (Scheaffer *et al.*, 1996).

El muestreo simple aleatorio presentó un error muy grande, como resultado de la alta variabilidad de la información, lo que sugiere rechazar la hipótesis nula de que la variación espacial de combustibles no es heterogénea; pese a que los datos de la hojarasca muestran un error de 16%, éste no es un indicador suficiente para establecer que el MSA es una buena alternativa para evaluar las cargas de combustibles. Es importante resaltar que fue indispensable trabajar con un límite de error alto, con el propósito de definir un tamaño de muestra razonable.

La enorme variabilidad de los datos determinó un tamaño de muestra muy grande para usar el MAE. Por lo tanto, dado que se tenía la condición de un límite de error alrededor de 10%, se debía muestrear aproximadamente 55% del total de la población, lo cual no podía ser considerado como un muestreo aceptable. Empero, mediante el uso del MSA fue más sencillo el cálculo del estimador de la media, en comparación con el MAE. Estos resultados apoyan la perspectiva planteada inicialmente, de que la distribución espacial de los combustibles obedece más a un comportamiento homogéneo, que a una estricta homogeneidad dentro de un área calificada como un MC dado.

Es claro que el MAE fue mejor para estimar la media en Ton/ha de los tres tipos de combustibles. Todos los valores de media estimados fueron bajos. También es importante tener presente que el tamaño de muestra más bajo se obtuvo con este diseño de muestreo.

En el caso del MSA el límite de error fue cerca de 30%, mientras que con el MAE varió entre 8 y 11%, lo que indica que con el mismo número de muestras se obtuvo un menor valor en todas las estimaciones. Es decir, no se requiere un mayor número de sitios para determinar de manera adecuada la distribución espacial de las cargas de combustibles. No obstante, el MAE necesita de mayor trabajo, tanto para organizar la información como para la realización de los cálculos.

Como se esperaba, la eficiencia relativa fue mayor en el MAE. Los combustibles de 1 hora mostraron la máxima diferencia, siete veces más, lo que sugiere que este tipo de combustibles tiene una variabilidad espacial superior. Aunque los otros presentaron una diferencia menor, sus incrementos en precisión fueron también considerables, alrededor de 400%. De nueva cuenta los datos sugieren rechazar la hipótesis nula de que la variación espacial de combustibles no es heterogénea. Sin embargo, no se localizaron trabajos similares en la literatura con los que se pudiesen comparar los resultados antes expuestos.

Una limitación de la metodología propuesta es que las estimaciones se hacen en forma puntual por sitio sin que se evalúe la distribución espacial de los combustibles. Una alternativa para corregir esa limitante sería no evaluar directamente la distribución de los combustibles forestales, sino hacerlo con apoyo de otros factores ambientales como: la densidad del arbolado, la exposición o el número de especies (Hudson y Salazar, 1981). Para considerar esta opción, se debe disponer de la información contenida en mapas topográficos, mapas de densidades, modelos de elevación digital, etc. Otra alternativa es la citada por Flores (2003), quien utilizó estrategias de geoestadística para definir la distribución espacial de combustibles forestales, la que a su vez sirvió para apoyar las clasificaciones supervisada, no supervisada y mixta de una imagen de satélite.

Finalmente, el procedimiento que se ilustra en el presente estudio proporciona bases sólidas para desarrollar futuros inventarios de combustibles, basados en un muestreo estratificado. Por lo menos en el área estudiada. Sin embargo, aún hace falta mucho trabajo con el propósito de definir el mejor criterio y estratificación para asociar a la distribución de combustibles forestales, bajo las condiciones de los bosques de México. Por ejemplo, se requiere conocer las cargas de combustibles producidas bajo el dosel de diferentes especies y densidades de arbolado.

Por otra parte, en el caso de México, donde la superficie promedio de los incendios forestales es de 30 ha (SEMARNAT, 2003), el diseño de muestreo debe ser suficiente para captar variaciones espaciales en áreas similares a dicho promedio. Esto no podría ser posible a través del concepto de MC, ya que como se menciona, se considera una homogeneidad de las cargas de combustibles en grandes extensiones.

CONCLUSIONES

Los resultados apoyan la hipótesis inicial acerca de la estratificación en la distribución de los combustibles forestales. Esto fue confirmado para los tres tipos de combustibles, lo cual implica que en muestreos posteriores se debe considerar algún criterio de estratificación, con el propósito de generar estimaciones más precisas de las cantidades de combustibles.

El uso de datos de un inventario previo permitió evaluar la estratificación de los datos, lo cual resultó en una mejor estimación de las cargas de combustibles.

El MAE permite detectar más fácilmente las variaciones espaciales de los combustibles provocadas por diferentes actividades de manejo realizadas en el bosque, como lo son aclareos, podas, aprovechamiento, etc., las cuales dan origen a una estratificación de combustibles.

La estratificación será más clara dependiendo de la escala que se maneje,

entendiendo por escala la dimensión proporcional de los estratos en relación a la superficie total del bosque.

Con base en la comparación básica entre MSA y MAE, se concluye que el concepto de Modelo Combustible tiene limitaciones espaciales en la determinación de la variación de las cargas de combustibles forestales.

REFERENCIAS

- Anderson H., E. 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. USDA, For. Serv. General Technical Report INT-122. 22 p.
- Andrews P., L. 1986. BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System-BURN Subsystem, Part I. USDA, Forest Service. Gen Tech. Rep. INT-194. 130 p.
- Brown D., E., F. Reichenbacher and S. E. Franson. 1994. A classification system and map of the biotic communities of North America. *In*: Proceedings of Biodiversity and management of the Madrean Archipelago: The sky islands of southwestern United States and northwestern Mexico. September 19-23. Tucson, Arizona. USDA, For. Serv. Gen. Tech. Rep. RM-GTR-264. pp. 109-125.
- Brown J., K., R. D. Oberheu and C. M. Johnston. 1982. Handbook for inventorying surface fuels and biomasa in the interior West. USDA, For. Serv. General Technical Report INT-129. 48 p.
- Burgan R., E. and R. C. Rothermel. 1984. BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system-FUEL subsystem. USDA, For. Serv. GTR. INT-167. 126 p.
- Campbell, J., K. Green, D. Weinstein and M. Finney. 1996. Fire growth modeling in an integrated GIS environment. *In*: Proc. of the Southern Forestry Geographic Information Systems Conference. Athens, GA. pp. 133-142.
- Chandler, C., P. Cheney, P. Thomas, L. Trabaud and D. Williams. 1983. Fire in the forestry. Forest fire behaviour and effects, Vol. I. John Wiley & Sons, Inc. USA. 450 p.
- Chuvieco, E. and R. G. Congalton. 1989. Applications of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. *Remote Sensing of Environment* 29: 147-159.
- Deeming, J. E., R. E. Burgan and J. D. Cohen. 1977. The National Fire Danger Rating System-1978. USDA, Forest Service. Gen. Tech. Rep. INT-39. 66p.
- Finney, M. A. 1998. FARSITE: Fire Area Simulator—Model development and evaluation. USDA, For. Serv., Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-4. 47 p.
- Flores G., J. G. 1994. Effects of prescribed fires on a temperate forest stand at Jalisco state, Mexico. School of Agriculture and Forest Sciences. University College of North Wales. Bangor, Wales. UK. 86 p.

- Flores G., J. G. 2001. Modeling the spatial variability of forest fuel arrays. Ph.D. Dissertation. Dept. of Forest Sciences. Colorado State University. Fort Collins, Colorado, USA. 201 p.
- Flores G., J. G. and P. N. Omi. 2003. Mapping forest fuels for spatial fire behavior simulations using geomatic strategies. *Agrociencia* Vol. 37(1): 65-72.
- Hansen, M. H., W. N. Hurwitz and W. G. Madow. 1993. *Sample survey methods and theory*. John Wiley & Sons, Inc. USA. 638 p.
- Hudson J. y M. Salazar. 1981. Las quemas prescritas en los pinares de Honduras. Serie Miscelánea No.1. Escuela Nacional de Ciencias Forestales. Siguatepeque, Honduras. 58 p.
- International Fire Service Training Association. 1998. *Fundamentals of wildland fire fighting*. Third Ed. Fire Protection Publications. Oklahoma State University. Oklahoma, OK, USA. 472 p.
- Keane, R. E., R. E. Burgan and Van Wagtendok. 1999. Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: Integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling. USDA, For. Ser. RMRS. Fire Sciences Laboratory, Fire Modeling Institute. 32 p.
- Omi, P. N. 1997. Forest fire management. F424 Course. University Text. Colorado State University. Fort Collins, Colorado, USA. 117 p.
- Pyne, S. J., P. L. Andrews and R. D. Laven. 1996. *Introduction to wildland fire*. Second edition. John Wiley & Sons, Inc. USA. 769 p.
- Rothermel, R. C. 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA, For. Serv. Research Paper INT-115. 40 p.
- Rothermel, R. C. 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. USDA, For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-143. 161 p.
- Scheaffer, R. L., W. Mendehall III and R. L. Ott. 1996. *Elementary survey sampling*. Fifth Edition. Duxbury Press. Belmont, California. Estados Unidos. 501 p.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2003. Estadísticas de incendios forestales. Temporada 2002. www.conafor.gob.mx. Comisión Nacional Forestal.
- Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal No 2. 1997. Aplicación del inventario forestal continuo (I. F. C.) en los bosques del ejido "El Largo". Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal No. 2. Ciudad Madera, Chihuahua. México. 34 p.