



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.787>

Artículo

Distribución espacial de cargas de combustibles en una parcela de muestreo de pino-encino

Spatial distribution of fuel loads in a pine-oak sample plot

Álvaro Agustín Chávez Durán^{1*}, Abundio Bustos Santana², Héctor Manuel Chávez Durán³, Celia De la Mora Orozco¹, José Germán Flores Garnica¹, Ernesto Alonso Rubio Camacho¹ y Jaqueline Xelhuantzi Carmona¹

Abstract

Forest fires are an ecological factor of high importance in ecosystems. A forest fire requires forest fuel, favorable environmental conditions and a starting factor in order to occur. Forest fuels are considered the core element in fire management since they are the only ones that can be handled and thus, modify their influence on fire behavior. The purpose of the present work is to show the variability and spatial distribution of dead fuel loads in a pine-oak forest plot with a surface area of one hectare. Field evaluations were used as a data collection technique, and geostatistical methods, as analysis tools. The general average of the fuel loads was 54.86 Mg ha^{-1} , with load areas larger than 100 Mg ha^{-1} . Moreover, high spatial variability and independence of the fuel components were identified, with load differences up to $116.61 \text{ Mg ha}^{-1}$ at only 72.11 m of distance. This work is envisioned as an important basis for studies of fuel loads at a highly detailed level. This will allow operational areas and decision makers to streamline the transition process towards fire management.

Key words: Fuels, fire behavior, distribution, fire, independence, fire management, spatial variability.

Resumen

Los incendios forestales son un factor ecológico de gran importancia en los ecosistemas. Para que un incendio forestal ocurra se requiere de material combustible, condiciones ambientales favorables y un factor de inicio. Los combustibles forestales son considerados el elemento núcleo en el manejo del fuego, ya que son los únicos que pueden manipularse y así, modificar su influencia en el comportamiento del fuego. El propósito del presente trabajo fue mostrar la variabilidad y distribución espacial de las cargas de combustibles muertos en una parcela de muestreo de una hectárea, ubicada en un bosque de pino-encino. Se utilizaron evaluaciones de campo como técnica de recolección de datos, y métodos geoestadísticos como herramientas de análisis. El promedio general de las cargas de combustible obtenido fue de 54.86 Mg ha^{-1} , con zonas de cargas superiores a 100 Mg ha^{-1} . Asimismo, se identificó alta variabilidad espacial e independencia de los componentes combustibles, con diferencias de cargas de hasta $116.61 \text{ Mg ha}^{-1}$ a una distancia de tan solo 72.11 m. El presente estudio se visualiza como una base importante en las investigaciones de cargas de combustibles a niveles de gran detalle; cuyos resultados permitirán a las áreas operativas y tomadores de decisiones agilizar el proceso de transición hacia el manejo del fuego.

Palabras clave: Combustibles, comportamiento del fuego, distribución, fuego, independencia, manejo del fuego, variabilidad espacial.

Fecha de recepción/Reception date: 4 de junio de 2020

Fecha de aceptación/Acceptance date: 16 de febrero de 2021

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CIR Pacífico Centro. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. México.

²Tecnológico Nacional de México. Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable. México.

³Universidad de Colima. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México.

*Autor por correspondencia; correo-e: chavez.alvaro@inifap.gob.mx

Introducción

Los incendios forestales son un factor ecológico de gran importancia en los ecosistemas y pueden ocurrir por causas naturales, o por acción antrópica (Flores *et al.*, 2010). En México, del año 2005 a 2020 se registró un total de 126 049 incendios, con una afectación a 5 731 854 ha (Conafor, 2020).

Para que un incendio forestal suceda, se requiere de tres factores básicos: material combustible, condiciones ambientales favorables y un elemento de inicio (Pyne *et al.*, 1996). Los combustibles forestales son el componente núcleo del manejo del fuego, pues es el único susceptible de manipularse (Sullivan, 2009).

Los estudios sobre incendios forestales necesitan de métodos que permitan describir, medir, sintetizar y cartografiar los combustibles. La metodología para estimar su distribución espacial, en general, se agrupan en: evaluaciones de campo, asociaciones, sensores remotos y modelación biofísica (Keane, 2015). Pettinari y Chuvieco (2016) cartografiaron combustibles a nivel mundial mediante sensores remotos y un concepto denominado cama de combustibles, el cual se refiere a una unidad del paisaje, relativamente, homogénea que representan un ambiente único de combustión (Riccardi *et al.*, 2007).

En México, Rentería (2004) cartografió combustibles en el ejido Pueblo Nuevo, en el estado de Durango; mientras que, Rodríguez *et al.* (2011) lo hicieron para zonas de Quintana Roo, Campeche y Yucatán. Por otra parte, Rubio *et al.* (2016) estimaron cargas de combustibles a nivel de operación en el *Campus* Ecológico Iturbide, en el estado de Nuevo León.

La generación de material cartográfico de combustibles forestales es todo un reto. Especialmente, debido a las características de escala y a la complejidad de los procesos que interactúan en los ecosistemas (Keane, 2015). México está en un proceso de transición de políticas públicas hacia programas de manejo del fuego. No obstante, su aplicación implica entre otras cosas la implementación de programas de manejo de combustibles a nivel operativo (Houtman *et al.*, 2013).

En el complejo de combustibles, la importancia de los materiales muertos radica que, en conjunto con los pastos, es en donde generalmente comienzan las igniciones de los incendios. Por esa razón, los programas de manejo de combustibles centran su atención en este tipo de combustibles (Semarnat y Sagarpa, 2007). Sin embargo, el estudio de la distribución espacial de dichos combustibles a niveles de operación ha sido poco estudiada. El propósito del presente trabajo fue mostrar la variabilidad y distribución espacial de las cargas de combustibles muertos en una parcela de muestreo forestal de una hectárea, ubicada en un bosque de pino-encino. Se espera cimentar una base importante para las investigaciones de cargas de combustibles a niveles de gran detalle; ello permitirá, tanto a las áreas operativas como a los tomadores de decisiones agilizar el proceso de transición hacia el manejo del fuego.

Materiales y Métodos

El estudio se llevó a cabo en el Área de Protección de Flora y Fauna Sierra de Quila (Figura 1). Esta zona tiene una superficie de 14 168 ha, y sus coordenadas extremas son 20°14.65' a 20°21.67' de latitud norte y -103°56.79' a -104°7.98' de longitud oeste.



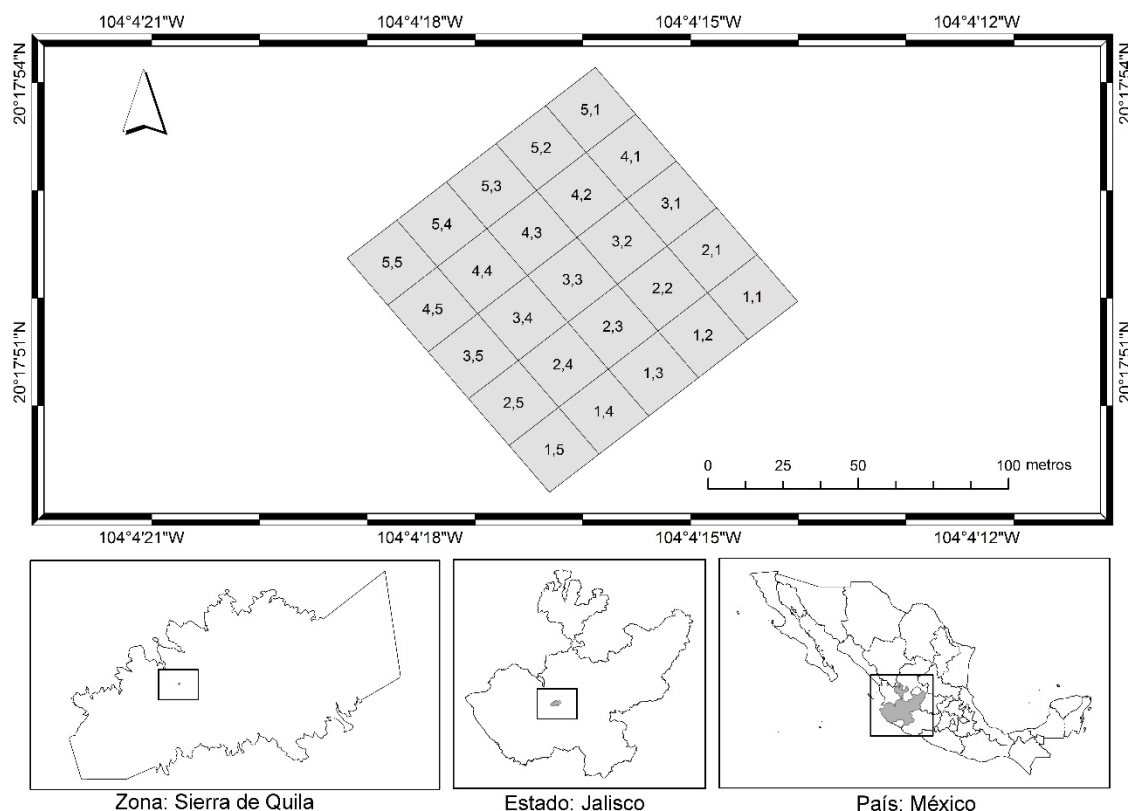
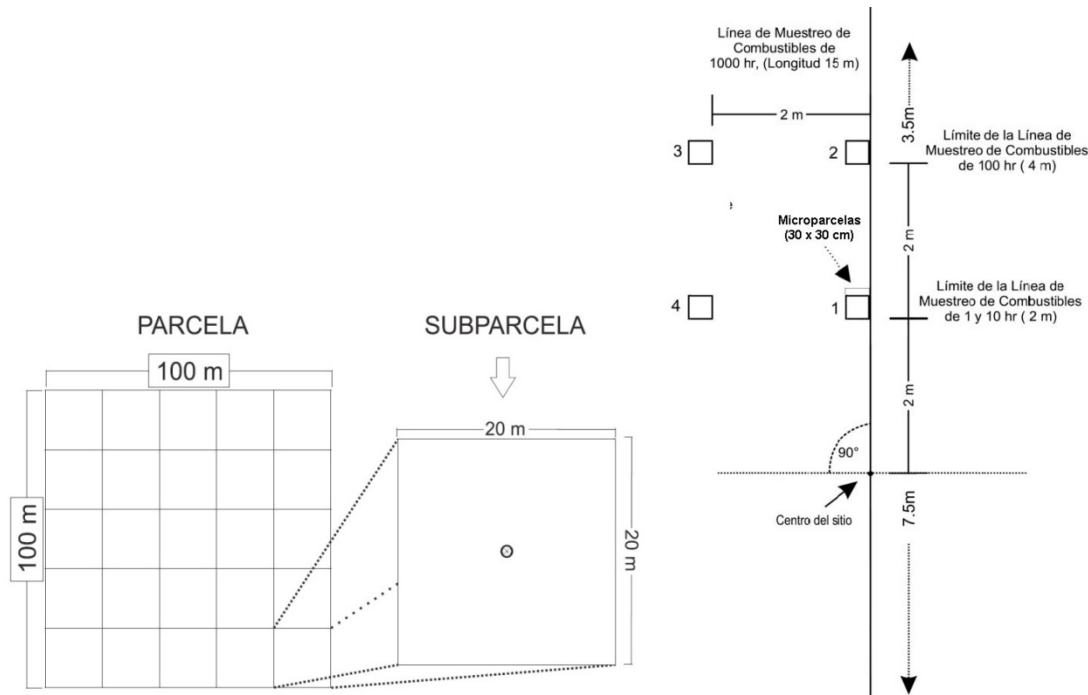


Figura 1. Zona de estudio y ubicación de la parcela de muestreo. El arreglo de las subparcelas está compuesto por el número de fila de la subparcela y el número de columna de la subparcela (n,n).

Se estableció una parcela de muestreo forestal en una zona representativa del bosque de *Pinus-Quercus*, con pendiente de 10 % y orientación noroeste. Sus dimensiones fueron de 100 × 100 m. Las coordenadas de su centroide son 20°17'51.89" de latitud norte y -104°4'16.35" de longitud oeste. Su delimitación se realizó con precisión topográfica, para lo cual se utilizó un teodolito *Sokkisha TM10E* con 5" de precisión. La orientación de la parcela se determinó con respecto a la pendiente. A partir de una de las esquinas se delimitaron subparcelas cuadradas de 20 × 20 m para cubrir un total de 25 (Figura 2a); en cada una de ellas se instalaron cuatro microparcels de 30 × 30 cm y un transecto de 15 m de longitud total como se muestra en la Figura 2b (Rubio *et al.*, 2016).



Adaptado de Rubio *et al.* (2016).

Figura 2. a) Forma y distribución de la parcela de muestreo y b) diseño interior de las subparcelas anidadas.

En el caso de las cargas de combustibles hojarasca (H) y fermentación (F) se midieron las profundidades y porcentajes de coberturas de dichas capas en cada microparcelsa (Figura 2b); posteriormente, el material se recolectó en una bolsa plástica para su traslado al Laboratorio Nacional de Investigación sobre Incendios Forestales, ubicado en el Campo Experimental Altos de Jalisco (INIFAP), donde se sometieron a un proceso de secado, en una estufa semiautomática (de elaboración propia), a una temperatura de 70 °C, hasta que alcanzaron una humedad y peso mínimo constante (Xelhuantzi *et al.*, 2011). Una vez obtenidos los valores de peso seco, se calculó la Carga de Capa Orgánica (CCO), mediante una adaptación de las ecuaciones descritas por Morfín *et al.* (2012).

En el transecto anidado de cada subparcela se contabilizó el Material Leñoso Caído (*MLC*), para lo cual se aplicó el método de intersecciones planares descrito por Brown *et al.* (1982) y la clasificación por tiempo de retardo 1, 10, 100 y 1 000 horas descrita por Fosberg *et al.* (1970) (Figura 2b). En los combustibles de 1, 10 y 100 horas se midió el diámetro de cada elemento mediante un calibrador vernier *Pretul* modelo 21454, para la obtención de los Diámetros Cuadráticos Promedio (*DCP*). A los combustibles de 1 000 horas, se les midió su diámetro con una cinta métrica (Truper® modelo Fh-5m) y se identificó su condición como firme o podrido.

Las estimaciones de carga por unidad de área se realizaron con las ecuaciones descritas por Morfín *et al.* (2012). Para fines prácticos, las cargas de combustibles 1, 10 y 100 horas se reclasificaron como Material Leñoso Fino (*MLF*); mientras que, los de 1 000 horas como Material Leñoso Grueso (*MLG*), de acuerdo a los criterios de Woodall y Monleon (2008). A cada componente combustible se le hizo un análisis exploratorio de datos, a partir de sus estadísticas descriptivas. Asimismo, a nivel subparcela se llevaron a cabo análisis espaciales acorde a las ecuaciones descritas en el Cuadro 1 (Kalogirou, 2003; Pebesma, 2004; Townsend y Fuhlendorf, 2010; López, 2016).



Cuadro 1. Ecuaciones utilizadas para los análisis espaciales de las cargas de combustibles.

Ecuación	Variable
$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} z_i z_j}{W \sum_{i=1}^n z_i^2}$	<p>I = Índice de <i>Moran</i></p> <p>n = Número de observaciones</p> <p>W = Suma de los pesos $w_{i,j}$</p> <p>z = Desviación del atributo con características x_i</p>
$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$	<p>$\gamma(h)$ = Semivarianza</p> <p>h = Intervalo de distancia</p> <p>$Z(x_i)$ = Valor de muestra en una localización x_i</p> <p>$Z(x_i + h)$ = Valor de la muestra a la distancia de intervalo h desde x_i</p>
$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i * A_i}{\sum A_i}$	<p>P = Combustibles polígonos de <i>Thiessen</i></p> <p>P_i = Combustibles medidos en la subparcela i</p> <p>A_i = Área de influencia de la subparcela i</p>
$Z(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda * Z(x_i)$	<p>$Z(X_0)$ = Combustibles Distancia Inversa Ponderada (<i>IDW</i>)</p> <p>λ = Peso asignado a la muestra</p>
$Z_{KO}(X) = \sum_{i=1}^n \lambda * Z(x_i)$	<p>$Z_{KO}(X_0)$ = Combustibles <i>Kriging</i> Ordinario (<i>KO</i>)</p>
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_0 - y_i)^2}{n}}$	<p>$RMSE$ = Raíz del error medio cuadrático</p> <p>y_0 = Valor predicho</p> <p>y_i = Valor observado</p>

La verificación de la normalidad de los residuales de las interpolaciones se efectuó con la prueba de *Shapiro-Wilk*. Se eligió el método de interpolación, ya que presentó el mejor ajuste *RMSE*. Se estimaron coeficientes de correlación sobre los componentes combustibles mediante el método *Spearman*. Los análisis estadísticos y geoestadísticos fueron realizados con las librerías *R Project gstat*, *Ictools* y *rgdal* (Bivand *et al.*, 2020; Kalogirou, 2020; Pebesma y Graeler, 2020).

Resultados y Discusión

Cargas de combustibles hojarasca y fermentación

En el Cuadro 2 se muestran las estadísticas descriptivas de las capas *H* y *F*. La capa *H* tuvo valores promedio de carga de combustible hojarasca (*H*), profundidad de la capa de hojarasca (*Prof_H*) y densidad aparente del combustible en la capa hojarasca (*DA_H*) de 17.95 Mg ha⁻¹, 4.68 cm y 4.07 g cm⁻³ respectivamente. En la capa *F* los valores promedio de carga de combustible fermentación (*F*), profundidad de la capa de fermentación (*Prof_F*) y densidad aparente del combustible en la capa fermentación (*DA_F*) fueron de 33.12 Mg ha⁻¹, 3.26 cm y 10.96 g cm⁻³, respectivamente.

Cuadro 2. Estadísticas descriptivas para las capas *H* y *F*.

Concepto	Mínimo	Cuartil 1	Mediana	Media	Cuartil 2	Máximo	Unidad
<i>H</i>	7.03	14.13	17.27	17.95	21.36	39.32	Mg ha ⁻¹
<i>Prof_H</i>	2.25	3.75	4.75	4.68	5.25	7.00	cm
<i>DA_H</i>	1.96	3.34	3.82	4.07	4.33	10.50	g cm ⁻³
<i>F</i>	4.37	18.58	27.59	33.12	49.16	100.59	Mg ha ⁻¹
<i>Prof_F</i>	0.33	1.75	2.50	3.26	4.25	9.25	cm
<i>DA_F</i>	7.03	9.40	10.93	10.96	11.78	17.97	g cm ⁻³

H = Capa hojarasca; *Prof_H* = Profundidad de la capa de hojarasca; *DA_H* = Densidad aparente del combustible en la capa hojarasca; *F* = Capa fermentación; *Prof_F* = Profundidad de la capa de fermentación *DA_F* = Densidad aparente del combustible en la capa fermentación.

La capa fermentación presentó un coeficiente de correlación de 0.96 $p < 0.05$, respecto su profundidad; en la capa de hojarasca fue de 0.44 $p < 0.05$, respecto su profundidad. Las cargas de combustibles fueron superiores a los de Bonilla *et al.* (2013), quienes citan valores de 3.76 cm, 3.14 cm para profundidades y 10.95 Mg ha⁻¹, 9.00 Mg ha⁻¹ para las cargas de combustibles de *H* y *F*, respectivamente. Los registros de *DA_H* y *DA_F* fueron superiores a los obtenidos por Morfín *et al.* (2007): 1.67 y 6.79 g cm⁻³ para *DA_H* y *DA_F*, respectivamente.

Cargas de combustibles Material Leñoso Caído

En el Cuadro 3 se resumen las estadísticas descriptivas de los combustibles *MLC*. Los diámetros cuadráticos promedio de los combustibles de 1, 10 y 100 horas fueron 0.23, 1.04 y 22.94 cm², respectivamente. Se obtuvieron valores promedios de 0.04, 0.49 y 2.7 Mg ha⁻¹ para los combustibles de 1, 10 y 100 horas; mientras que 0.22 y 0.34 Mg ha⁻¹ para los de 1 000 horas firmes (*HF*) y 1 000 horas podridos (*HP*), respectivamente. Los combustibles *MLC* no evidenciaron correlación aparente y sus cargas fueron inferiores a las documentadas por Bonilla *et al.* (2013), cuyos valores son de 1.67, 0.62, 3.72 y 25.72 Mg ha⁻¹ para los combustibles de 1, 10, 100 y 1 000 horas, respectivamente.

Cuadro 3. Estadísticas descriptivas de los combustibles *MLC* en Mg ha⁻¹.

Concepto	Mínimo	Cuartil 1	Mediana	Media	Cuartil 2	Máximo
1 <i>H</i>	0.00	0.00	0.00	0.04	0.08	0.39
10 <i>H</i>	0.00	0.00	0.35	0.49	1.05	1.74
100 <i>H</i>	0.00	0.00	0.00	2.70	3.56	14.23
1 000 <i>HF</i>	0.00	0.00	0.00	0.22	0.00	3.08
1 000 <i>HP</i>	0.00	0.00	0.00	0.34	0.00	4.09
<i>MLF</i>	0.00	0.35	1.74	3.23	3.91	14.58
<i>MLG</i>	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	4.24

MLC = Material Leñoso Caído; *MLF* = Material Leñoso Fino; *MLG* = Material Leñoso Grueso.

Cargas de combustibles totales y por componente

La Figura 3a exhibe la distribución en cuantiles de las cargas agrupadas en *F*, *H*, *MLF* y *MLG*; la Figura 3b muestra el histograma de las cargas totales. En conjunto las de cargas hojarasca y fermentación concentran 92.91 % del total de los combustibles, cuyo promedio fue de $54.86 \pm 10.51 \text{ Mg ha}^{-1}$. La capa de fermentación aportó el mayor porcentaje, con 56.77 %; seguido por la capa de hojarasca con 36.14 %; *MLF* y *MLG* en conjunto concentraron 7.09 %. Esto significa que de existir presencia de fuego en la zona, el comportamiento horizontal dependerá, principalmente, de las capas de hojarasca y de fermentación, con existencia de áreas bastantes críticas en donde las cargas de combustibles superan los 100 Mg ha^{-1} . Los resultados son similares a los de Rubio *et al.* (2016), autores que indican una carga promedio de 49.6 Mg ha^{-1} para un rodal con ausencia de incendios, cuyos combustibles de la capa de fermentación son los más representativos.

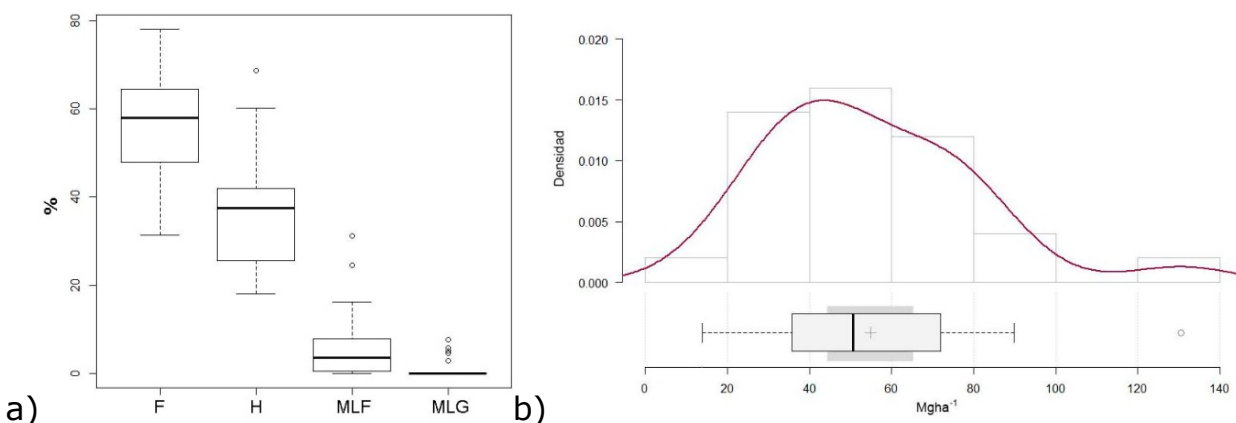


Figura 3. a) Porcentaje de aporte de los componentes combustibles Fermentación (*F*), Hojarasca (*H*), Material Leñoso Fino (*MLF*) y Material Leñoso Grueso (*MLG*) a las cargas de combustibles totales y b) Histograma de las cargas de combustibles totales, el bloque gris oscuro representa el intervalo de confianza de la media.

En el Cuadro 4 se presentan las cargas de combustibles por componente en las subparcelas, y en el Cuadro 5 sus coeficientes de correlación y sus valores de p . Las cargas de combustibles totales tuvieron un coeficiente de correlación de 0.97 con el componente fermentación; esto significa que pueden utilizarse como base las cargas de combustible de fermentación para hacer inferencias sobre las cargas totales. Asimismo, debido a que existe correlación entre la profundidad de la capa de fermentación y su carga de combustible, es posible generar tarifas de profundidad que permitan efectuar estimaciones preliminares expeditas.

Cuadro 4. Cargas de combustibles por componente en las subparcelas (Mg ha⁻¹).

Subparcela	Totales	F	H	MLF	MLG
1,1	53.11	27.59	17.52	3.91	4.09
1,2	71.86	49.23	21.59	1.05	0.00
1,3	58.32	32.92	21.84	3.56	0.00
1,4	75.29	49.16	25.01	1.12	0.00
1,5	33.68	19.54	14.13	0.00	0.00
2,1	46.90	21.10	19.63	3.71	2.45
2,2	65.39	26.07	39.32	0.00	0.00
2,3	13.92	4.37	9.56	0.00	0.00
2,4	70.17	42.72	27.10	0.35	0.00
2,5	31.11	13.84	17.27	0.00	0.00
3,1	38.85	18.58	7.03	12.10	1.14
3,2	40.06	25.72	14.33	0.00	0.00
3,3	54.01	33.69	15.71	4.60	0.00
3,4	89.83	53.89	21.36	14.58	0.00
3,5	29.04	10.02	11.91	7.11	0.00
4,1	35.77	15.51	16.70	3.56	0.00
4,2	79.38	51.10	17.19	11.10	0.00
4,3	72.59	49.32	18.60	0.43	4.24
4,4	30.06	17.21	12.86	0.00	0.00
4,5	50.57	27.89	19.12	3.56	0.00
5,1	130.53	100.59	24.91	5.03	0.00
5,2	81.91	63.99	16.87	1.05	0.00
5,3	45.71	26.15	17.67	1.90	0.00
5,4	48.16	32.38	11.82	1.74	2.21
5,5	25.27	15.35	9.57	0.35	0.00

F = Capa fermentación; H = Capa hojarasca; MLF = Material Leñoso Fino; MLG = Material Leñoso Grueso.

Cuadro 5. Coeficientes de correlación de los componentes combustibles en las subparcelas.

Concepto	Totales	F	H	MLF	MLG
Totales	1	0.97	0.71	0.36	0.03
<i>F</i>	$p < 0.05$	1	0.59	0.35	0.03
<i>H</i>	$p < 0.05$	$p < 0.05$	1	0.06	-0.12
<i>MLF</i>	$p = 0.07$	$p = 0.09$	$p = 0.76$	1	0.22
<i>MLG</i>	$p = 0.89$	$p = 0.89$	$p = 0.56$	$p = 0.28$	1

F = Capa fermentación; *H* = Capa hojarasca; *MLF* = Material Leñoso Fino; *MLG* = Material Leñoso Grueso.

Dependencia espacial de los componentes combustibles

En la Figura 4 se observa un conjunto de correlogramas de los componentes combustibles *F*, *H*, *MLF* y *MLG*. Todos los índices de *Moran* fueron cercanos a cero, con valores $p > 0.05$. Esto indica que los componentes combustibles no registran autocorrelación espacial.



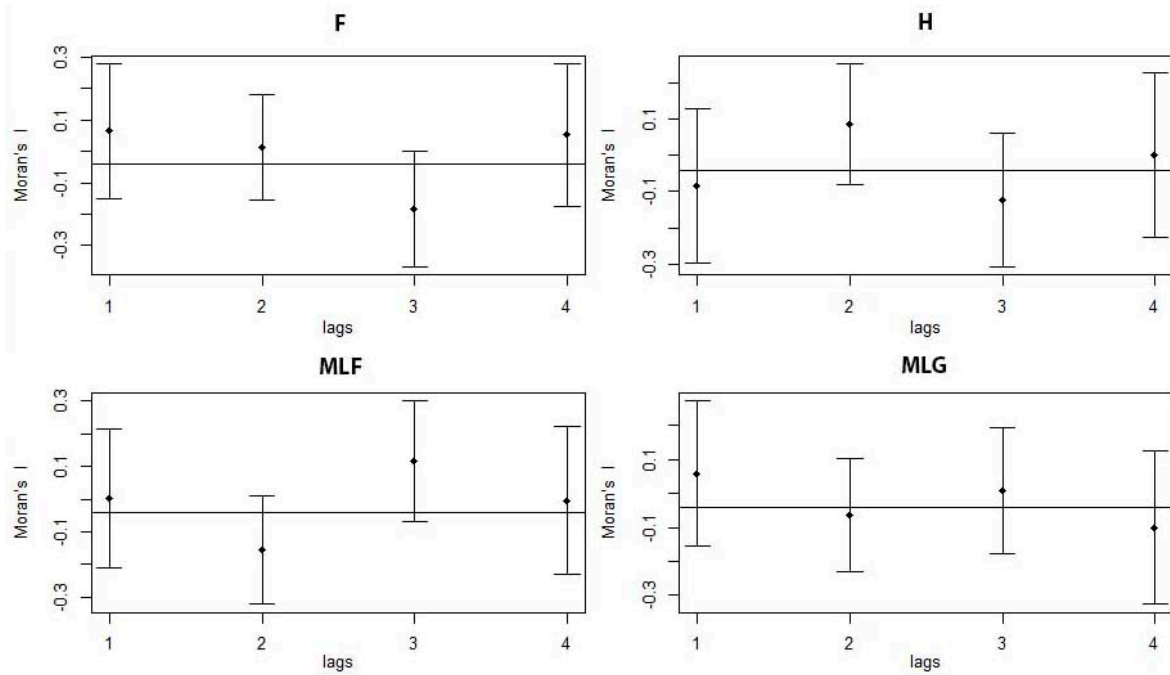
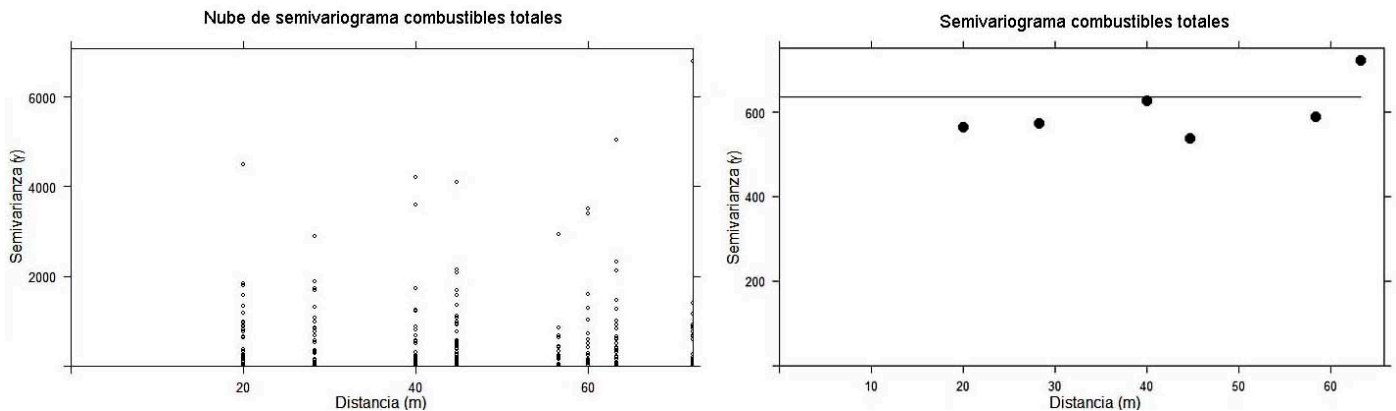


Figura 4. Correlogramas de los componentes combustibles *F*, *H*, *MLF* y *MLG*.

La Figura 5 corresponde a los semivariogramas y nubes de semivariogramas para las cargas totales *F* y *H*. Los semivariogramas teóricos con mejor ajuste a los experimentales presentaron un comportamiento completo pepita a 636.66, 439.55 y 45.00, con errores de ajuste *RMSE* de 6.29, 8.99 y 0.82 para las cargas totales *F* y *H*, respectivamente. Lo anterior, confirma la aleatoriedad de las cargas de combustibles mostrada por los índices de autocorrelación espacial.



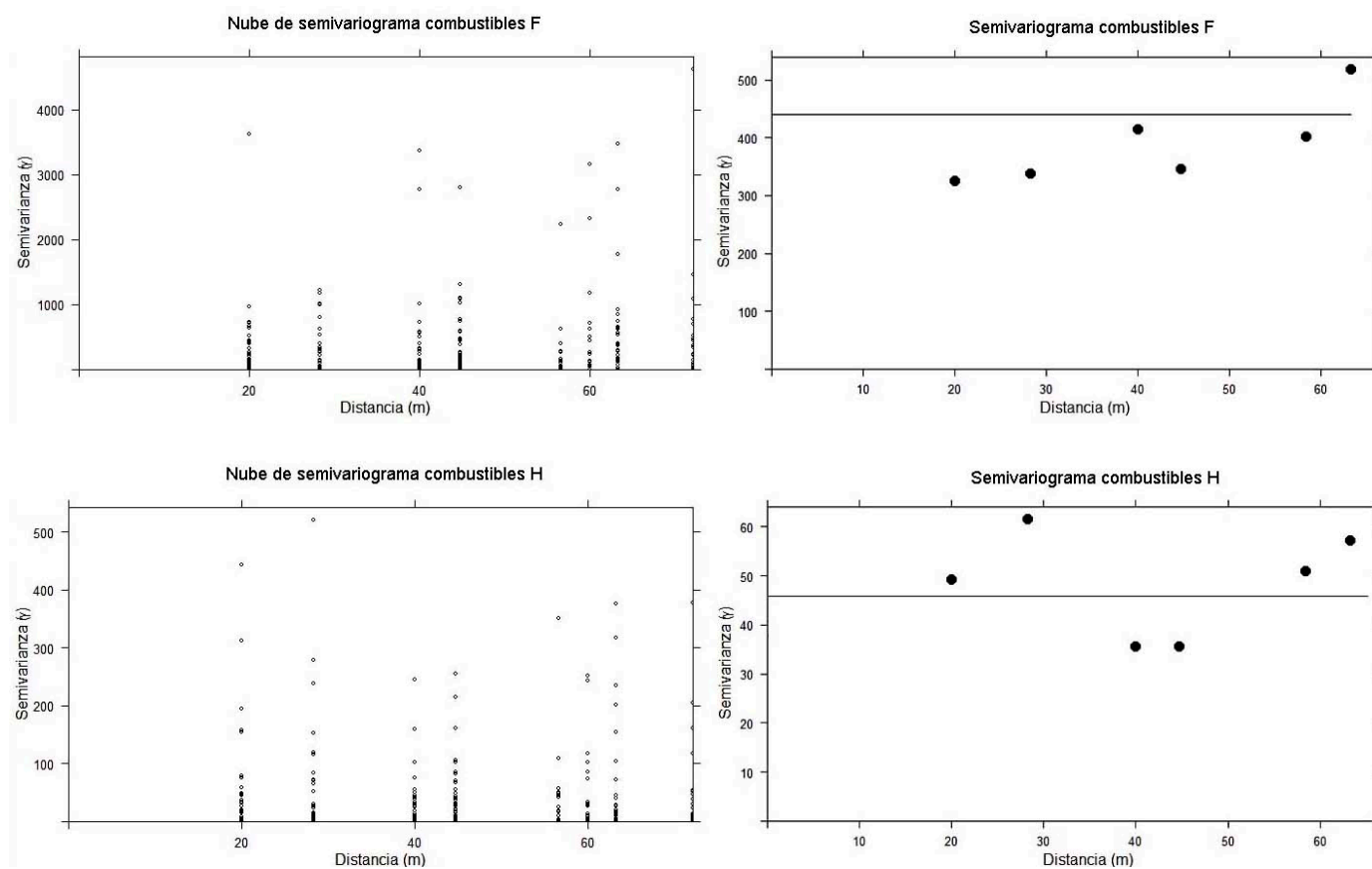


Figura 5. Semivariogramas y nubes de semivariogramas para los combustibles totales *F* y *H*.

Interpolación espacial de los combustibles totales

La distribución, en cuantiles, de los residuales para las interpolaciones *Thiessen*, *IDW* y *KO* que se realizaron sobre las cargas de combustibles totales para estimar su distribución espacial, se presenta en la Figura 6. Los valores medios de los residuos fueron de 2.07, 0.04 y -0.001, con desviaciones estándar de 34.08, 26.36 y 26.53 para *Thiessen*, *IDW* y *KO*, respectivamente. Los *RMSE* y varianza de residuos más bajos se obtuvieron en la interpolación *IDW*, con valores de 25.82 y 694.60; seguido de 25.98, 703.46 para *KO*; y 33.46, 1 161.87 para polígonos de *Thiessen*. En todos los casos, los residuales evidenciaron un comportamiento normal con valores $p = 0.40$, 0.30 y 0.14 según la prueba de

normalidad de *Shapiro-Wilk* para *Thiessen*, *IDW* y *KO*, respectivamente. La independencia espacial presente en las cargas de combustibles impidió que el método de interpolación *KO* fuese superior a *IDW*. Los valores *RMSE* de *IDW* y *KO* fueron muy parecidos; sin embargo, *IDW* registró varianzas de residuos más bajas, por lo que se eligió como el método de interpolación por utilizar.

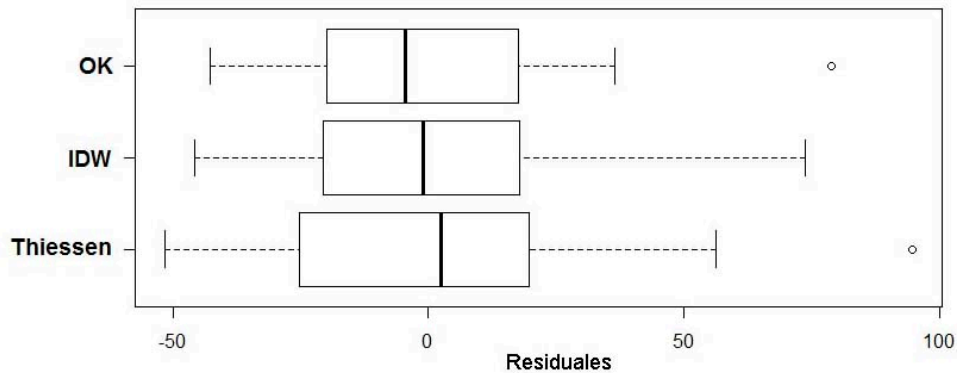


Figura 6. Gráficas de distribución de los residuales.

En la Figura 7 se observa la distribución espacial de las cargas de combustibles totales en la parcela de muestreo. El porcentaje de la parcela de la parcela que presentó cargas de combustibles entre 50.57–72.04 Mg ha⁻¹ fue de 48.28 %; mientras que, 36.62 % tuvo un intervalo de entre 35.25 y 50.57 Mg ha⁻¹. Por otra parte, a 10.70 % le correspondió los valores más altos de 72.04–130.53 Mg ha⁻¹, y solo 5.65 % registró los más bajos de 13.92–35.25 Mg ha⁻¹. La distribución espacial de los combustibles evidenció la presencia de zonas con más de 100 Mg ha⁻¹, superiores a las señaladas por Morfín *et al.* (2007), cuyas cargas son de aproximadamente 80 Mg ha⁻¹, en bosques de coníferas.



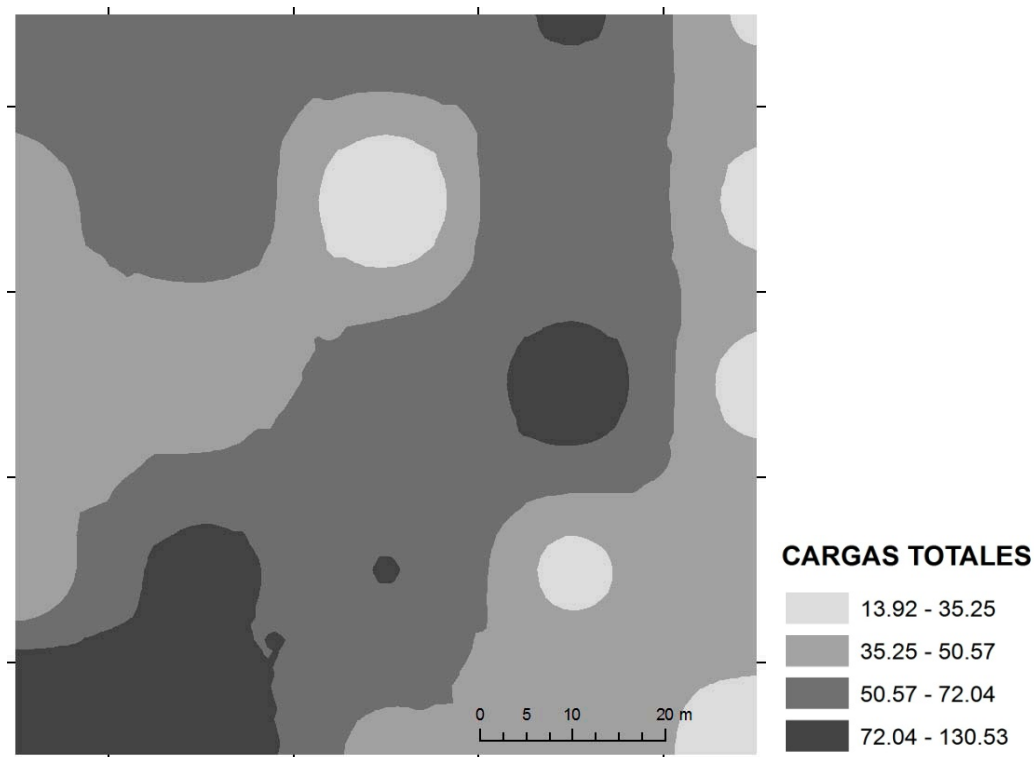


Figura 7. Distribución espacial de las cargas de combustibles totales en la parcela de muestreo.

En comparación con trabajos, en los que la recolección de datos de campo se basa en sitios y conglomerados de muestreo con radios generalmente inferiores a 20 m, y cuyos resultados son extrapolados a una superficie de una hectárea (Xelhuantzi *et al.*, 2011; Conafor, 2011; Chávez *et al.*, 2016), las mediciones en la parcela de muestreo permitieron identificar variaciones a detalle. La distancia entre la subparcela con la carga total más pequeña y la subparcela con la carga total más grande es de apenas 72.11 m, con una diferencia de cargas de $116.61 \text{ Mg ha}^{-1}$. Difícilmente, un sitio de muestreo inferior a 20 m de radio, alcanzaría a representar dicha diferencia de cargas combustibles. Los resultados muestran la heterogeneidad en la distribución horizontal de los componentes combustibles muertos en una superficie de una hectárea; pese a que, de acuerdo a los métodos descritos por Velasco *et al.* (2013), la parcela de muestreo debería corresponder a una zona homogénea.

Conclusiones

En una parcela de muestreo de una hectárea de bosque *Pinus-Quercus*, las cargas de combustibles forestales muertos se distribuyen espacialmente de forma independiente, en un intervalo de 13.92 a 130.53 Mg ha⁻¹, sin correlación entre sus componentes. Esto indica que existen zonas en donde es necesario realizar una reducción de cargas de combustibles para evitar un mayor daño, en caso de que se presente un incendio forestal. El diseño de muestreo utilizado ha permitido identificar variaciones detalladas en las cargas de combustibles, y evidencia la heterogeneidad en una superficie relativamente pequeña. Las mediciones se realizaron de forma directa en campo con alto nivel de detalle; sin embargo, esto implica relacionar la disponibilidad de tiempo y recursos económicos para alcanzar la precisión esperada. Se requiere el establecimiento de más parcelas de muestreo a fin de obtener repeticiones y analizar datos entre parcelas. Es necesario realizar investigaciones que permitan generar ajustes en los factores de escala, para crear enlaces entre las actividades de planeación y las de operación. Fomentar el trabajo interdisciplinario y el desarrollo de métodos de integración permitirá a los especialistas de distintas áreas, la posibilidad de aportar sus conocimientos para alcanzar un adecuado manejo del fuego.

Agradecimientos

Al Área de Protección de Flora y Fauna Sierra de Quila por su activa participación y apoyo operativo en la realización del presente trabajo. Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias por las facilidades otorgadas a los autores. Al Dr. Mariano García Alonso y la Dra. María Inmaculada Aguado Suárez de la Universidad de Alcalá, España, por su guía e importante aporte de conocimientos. Al Ing. Álvaro Pujol Becerra y a PUJOL Ingeniería, por su apoyo técnico y operativo en los trabajos de campo. A los revisores anónimos del presente documento por sus valiosas aportaciones.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Contribución por autor

Álvaro Agustín Chávez Durán: recolección de información de campo, proceso de muestras en laboratorio, análisis de datos y redacción del documento; Abundio Bustos Santana: recolección de información de campo, análisis de datos y redacción del documento; Héctor Manuel Chávez Durán: proceso de muestras en laboratorio, análisis de datos y redacción del documento; Celia De la Mora Orozco: recolección de información de campo y redacción del documento; José Germán Flores Garnica: revisión del documento; Ernesto Alonso Rubio Camacho: revisión del documento; Jaqueline Xelhuantzi Carmona: revisión del documento.

Referencias

Bivand, R., T. Keitt, B. Rowlingson, E. Pebesma, M. Sumner, R. Hijmans, E. Rouault, F. Warmerdam, J. Ooms and C. Rundel. 2020. Package 'rgdal' 1.4-8. Bindings for the 'Geospatial' Data Abstraction Library. <https://cran.r-project.org/web/packages/rgdal/rgdal.pdf> (20 de junio de 2020).

Bonilla P., E., D. A. Rodríguez T., A. Borja D., C. Cíntora G. y J. Santillán P. 2013. Dinámica de combustibles en rodales de encino-pino de Chignahuapan, Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4(19): 21-33.
Doi:10.29298/rmcf.v4i19.376.

Brown, J. K., R. D. Oberheu and C. M. Johnston. 1982. Handbook for inventoring surface fuels and biomass in the Interior West. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-129. Ogden, UT, USA, 48 p.

Chávez D., A. A., J. Xelhuantzi C., E. A. Rubio C., J. Villanueva D., H. E. Flores L. y C. De la Mora O. 2016. Caracterización de cargas de combustibles forestales: una herramienta importante para el manejo de los reservorios de carbono y su potencial contribución al cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Vol. Esp.(13): 2589-2600. Doi: 10.29312/remexca.v0i13.485.

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2011. Manual y procedimientos para el muestreo de campo Re-muestreo inventario nacional forestal y de suelos (INFyS). Zapopan, Jal., México. 141 p.

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2020. Reporte semanal de resultados de incendios forestales, Coordinación General de Conservación y Restauración, Comisión Nacional Forestal, Gerencia de Manejo del Fuego. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/604834/Cierre_de_la_Temporada_2020.PDF (30 de enero de 2021).

Flores G., J. G., D. A. Moreno G. y J. E. Morfín R. 2010. Muestreo directo y fotoseries en la evaluación de combustibles forestales. Folleto Técnico Núm. 4. INIFAP CIRPAC-Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jal., México. 69 p.

Fosberg, M. A., J. W. Lancaster and M. J. Schroeder. 1970. Fuel moisture response-drying relationships under standard and field conditions. *Forest Science*. 16(1): 121-128. Doi: 10.1093/forestscience/16.1.121.

Houtman, R. M., C. A. Montgomery, A. R. Gagnon, D. E. Calkin, T. G. Dietterich, S. McGregor and M. Crowley. 2013. Allowing a wildfire to burn: estimating the effect on future fire suppression costs. *International Journal of Wildland Fire* 22(7): 871-882. Doi: 10.1071/WF12157.

Kalogirou, S. 2003. The Statistical Analysis and Modelling of Internal Migration Flows within England and Wales. PhD Thesis School of Geography, Politics and Sociology. University of Newcastle upon Tyne. Newcastle upon Tyne, UK. 242 p.

Kalogirou, S. 2020. Package 'lctools' 0.2-8. Local Correlation, Spatial Inequalities, Geographically Weighted Regression and Other Tools. <https://cran.r-project.org/web/packages/lctools/lctools.pdf> (20 de junio de 2020).

Keane, R. E. 2015. Wildland Fuel Fundamentals and Applications. Springer International Publishing. New York, NY, USA. 195 p.

López V., C. 2016. A protocol for the ranking of interpolation algorithms based on confidence levels. *International Journal of Remote Sensing* 37(19): 4683-4697. Doi:10.1080/01431161.2016.1219461.

Morfín R., J. E., E. Alvarado C., E. J. Jardel P., R. E. Vihnanek R., D. K. Wright, J. M. Michel F., C. S. Wright, R. D. Ottmar, D. V. Sandberg y A. Nájera D. 2007. Fotoseries para la Cuantificación de Combustibles Forestales de México: Bosques Montanos Subtropicales de la Sierra Madre del Sur y Bosques Templados y Matorral Submontano del Norte de la Sierra Madre Oriental. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR. Portland, OR, USA. 98 p.
<https://www.fs.fed.us/pnw/fera/publications/fulltext/PhotoSeriesMexicoUW-FERAPublication.pdf> (20 de junio de 2020).

Morfín R., J. E., E. J. Jardel P., E. Alvarado C. y J. M. Michel F. 2012. Caracterización y cuantificación de combustibles forestales. Comisión Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jal., México. 59 p.
http://queimadas.cptec.inpe.br/~rqueimadas/material3os/Evaluac_cuantific_de_combustibles_Forestales.pdf (9 de diciembre de 2019).

- Pebesma, E. and B. Graeler. 2020. Package 'gstat' 2.0-6. Spatial and Spatio-Temporal Geostatistical Modelling, Prediction and Simulation. <https://cran.r-project.org/web/packages/gstat/gstat.pdf> (20 de junio de 2020).
- Pebesma, E. J. 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences*, 30: 683-691. Doi: 10.1016/j.cageo.2004.03.012.
- Pettinari, M. L. and E. Chuvieco S. 2016. Generation of a global fuel data set using the Fuel Characteristic Classification System. *Biogeoscience* 13: 2061–2076. Doi: 10.5194/bg-13-2061-2016.
- Pyne, S. J., P. L. Andrews and R. D. Laven. 1996. Introduction to wildland fire. 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc. New York, NY, USA. 769 p.
- Rentería A., J. B. 2004. Desarrollo de modelos para el control de combustibles en el manejo de ecosistemas forestales en Durango, México. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, NL., México. 141 p.
- Riccardi, C. L., R. D. Ottmar, D. V. Sandberg, A. Andreu, E. Elman, K. Kopper and J. Long. 2007. The fuelbed: a key element of the Fuel Characteristic Classification System. *Canadian Journal of Forest Research* 37: 2394- 2412. Doi:10.1139/X07-143.
- Rodríguez T., D. A., H. Tchikoué, C. Cíntora G., R. Contreras A. y A. De la Rosa V. 2011. Modelaje del peligro de incendio forestal en las zonas afectadas por el huracán Dean. *Revista Agrociencia* 45(5): 593-608. <https://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2011/jul-ago/art-6.pdf> (20 de junio de 2020).
- Rubio C., E. A., M. A. González T., J. D. Benavides S., A. A. Chávez D. y J. Xelhuantzi C. 2016. Relación entre necromasa, composición de especies leñosas y posibles implicaciones del cambio climático en bosques templados. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Pub. Esp. (13)*: 2601–2614. Doi:10.29312/remexca.v0i13.486.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) y Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa). 2007. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007. Especificaciones técnicas de métodos de uso del fuego en los terrenos forestales y en los terrenos de uso agropecuario. Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México, México. 32 p.

<http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/3594/semarna/semarna.htm> (20 de junio de 2020).

Sullivan, A. L. 2009. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *International Journal of Wildland Fire* 18(4): 387-403. Doi: 10.1071/WF06144.

Townsend, D. E. and S. D. Fuhlendorf. 2010. Evaluating relationships between spatial heterogeneity and the biotic and abiotic environments. *The American Midland Naturalist* 163(2): 351-365. Doi:10.1674/0003-0031-163.2.351.

Velasco H., J. A., J. G. Flores G., B. Márquez A. y S. López. 2013. Áreas de respuesta homogénea para el muestreo de combustibles forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4(15): 41-54. Doi: 10.29298/rmcf.v4i15.447.

Woodall, C. W. and V. J. Monleon. 2008. Sampling Protocol, Estimation, and Analysis Procedures for the Down Woody Materials Indicator of the FIA Program. United States Department of Agriculture. Forest Service Northern Research Station. General Technical Report NRS-22. Madison, WS, USA. 72 p.

Xelhuantzi C., J., J. G. Flores G. y A. A. Chávez D. 2011. Análisis comparativo de cargas de combustibles en ecosistemas forestales afectados por incendios. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 2(3): 37-52. Doi: 10.29298/rmcf.v2i3.624.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.