



Unidad de muestreo para determinar la variabilidad espacial de la superficie quemada por incendios forestales

José Germán Flores Garnica^{1*}

¹Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas y Pecuarias

*Correo-e: flores.german@gmail.com

Resumen:

Las estrategias contra incendios forestales se dirigen a áreas prioritarias, determinadas cartográficamente con base en criterios como el peligro de incendio (inicio, propagación, dificultad de control e impacto). Lo anterior se refleja, entre otras cosas, en la superficie que llega a quemarse. De acuerdo a esto, puede considerarse la superficie quemada como un criterio de soporte para definir áreas prioritarias de protección contra incendios forestales. Sin embargo, los procesos para conocer su variación espacial deben estar estandarizados, de lo contrario puede implicar una falta de correspondencia de sus estimaciones entre diferentes zonas. Para ello, entre otros aspectos, se tiene que establecer una unidad de muestreo común, para obtener información comparable y compatible. En ese contexto, el objetivo del presente trabajo fue determinar un tamaño de unidad de muestreo que permita captar la variabilidad espacial de la superficie quemada por incendios forestales. Se analizaron sitios de referencia (SIR), y consideraron: a) cuatro

intensidades de muestreo (100, 300, 500 y 1 000 sitios); y b) doce tamaños de SIR (1, 2, 4, 8, 10, 15, 30, 50, 70, 100, 150 y 200 km²). Se calculó la superficie quemada promedio en cada SIR, con base a partir de la información de incendios del período 2005-2015, en el estado de Jalisco. La variabilidad de la superficie promedio incendiada disminuyó a medida que aumentaba el tamaño del SIR, hasta alcanzar un comportamiento asintótico. Dado que los datos no presentaron una distribución normal, la prueba *Kruskal-Wallis* demostró que existe diferencia significativa entre los tamaños de SIR. Un análisis entre pares de muestras independientes (prueba *Mann-Whitney*), evidenció diferencias entre los tamaños de SIR vecinos en el área de inicio de la asíntota. Finalmente, del SIR de 100 km² resultó el tamaño de la unidad de muestreo común, para la generación de cartografía de la variabilidad espacial de la superficie quemada por incendios forestales.

Palabras clave: Áreas prioritarias, carga de combustible, manejo del fuego, peligro de incendio forestal, riesgo de incendio, sitios de referencia.

Fecha de recepción/Reception date: 24 de mayo de 2017

Fecha de aceptación/Acceptance date: 31 de agosto de 2017

Introducción

Cada año, la superficie afectada por incendios forestales en el mundo, así como el número de eventos, son muy variables, lo cual depende de las condiciones meteorológicas, sociales y económicas que existen en las áreas siniestradas. Al respecto, en México, en promedio se presentan 8 000 incendios anuales, los cuales se manifiestan en diversas magnitudes. Sin embargo, su tamaño promedio es de

30 ha (Conafor, 2013). Como consecuencia, el impacto causado, que se deriva de su frecuencia e intensidad, es un factor importante de disturbio ecológico, ya que ocasiona transformaciones a diferentes niveles en varios ecosistemas forestales (Jardel *et al.*, 2010).

De igual forma, los efectos de los incendios también son de índole social y económica. Es por ello que es necesaria la planeación, tanto de su prevención como de su combate, integrándolos dentro de un plan de manejo del fuego, en el que, entre otros aspectos, se realice la zonificación de áreas prioritarias contra incendios forestales (Conafor, 2010). Con esto, se tiende a la eficiencia del uso de los recursos humanos, materiales y financieros que son limitados (Carrillo *et al.*, 2012).

En general, para determinar áreas prioritarias de protección contra incendios forestales se analizan tres criterios: riesgo de incendio, peligro de incendio y daño potencial o valor (Flores *et al.*, 2016a); mismos que se evalúan y ponderan en función de una serie de variables (Rojo *et al.*, 2001). De esta forma, la ubicación y dimensionamiento de áreas, con base en ciertos niveles de peligro, apoya la definición de estrategias tanto de combate como de prevención.

Los estudios que se han realizado para la estimación de peligro de incendios forestales son escasos (Carrillo *et al.*, 2012). Por ejemplo, se modela la variación espacial del peligro de incendio, a partir de interpolaciones (*kriging*) de las cargas de combustibles (Rodríguez *et al.*, 2011). También, a través de análisis multicriterio, se evalúan variables que tienen influencia en el peligro, para definir su modelo correspondiente (Muñoz *et al.*, 2005). Otro método para estimarlo es mediante teledetección (imágenes del sensor MODIS) e índices meteorológicos, que se correlacionan con la variación temporal del contenido de humedad del combustible (Yebra *et al.*, 2005).

No obstante lo anterior, debe considerarse que para definir el peligro de incendios forestales se evalúan variables que afectan su inicio, su propagación, la dificultad de su control y su impacto (Rodríguez *et al.*, 2011).

Lo cual se refleja, entre otras cosas, en la superficie que llega a quemarse, ya que implica que: a) existieron condiciones para su inicio; b) la rapidez de propagación define el área quemada en cierto periodo de tiempo; c) a mayor superficie, en general, aumenta la dificultad de control; y d) el efecto de un alto impacto puede ser exponencial, en relación a la superficie afectada. De acuerdo a esto, la superficie quemada es un criterio de soporte para determinar áreas prioritarias de protección contra incendios forestales. Sin embargo, primero debe establecerse una estrategia de muestreo, en la que, por ejemplo, se defina un tamaño de sitio apropiado para la evaluación de la superficie quemada.

Desde la perspectiva forestal, este tamaño de sitio se define para varios propósitos (estimación de biomasa, densidad de arbolado, diversidad, etcétera); se busca un tamaño mínimo que implique tanto un ahorro de tiempo y costos, como la garantía de la precisión estadística de las estimaciones. Para ello se requiere que el sitio tienda a disminuir la varianza de las estimaciones, se toma en cuenta que sitios de muestreo pequeños propician una variación alta de las estimaciones, y a medida que se aumenta el tamaño esta disminuye (Aguirre *et al.*, 1997). No obstante, dicha tendencia llega a definir un comportamiento asintótico, en el cual el incremento del tamaño de sitio no implica una disminución relevante de la varianza. Por lo tanto, el tamaño de sitio adecuado es el que se ubique en el punto donde inicia dicho comportamiento asintótico (Gallegos *et al.*, 2006).

Dado a que la indefinición de un tamaño de sitio común puede implicar una falta de correspondencia de las estimaciones de la superficie quemada por incendios entre diferentes zonas, el objetivo del presente trabajo es definir un tamaño de sitio que permita captar la variación espacial de esta superficie. Para ello se plantea la siguiente hipótesis: la variabilidad de la superficie quemada disminuye a medida que aumenta el tamaño de sitio hasta un punto en el que esta variabilidad define un comportamiento asintótico.

Materiales y Métodos

Descripción del área de estudio

El presente trabajo se desarrolló utilizando información del estado de Jalisco, el cual se ubica en el centro occidente de México (Figura 1), con una superficie de 78 588 km², donde 68 % del área presenta clima cálido subhúmedo a lo largo de la costa y zona centro. Mientras que 18 % es templado subhúmedo en las partes altas de las sierras; y 14 % es seco y semiseco en el norte y noreste de la entidad. La precipitación media anual es de aproximadamente 850 mm anuales, aunque en las zonas costeras supera los 1 000 mm anuales. De acuerdo a la clasificación realizada por Rzedowski (1986), Jalisco tiene 13 tipos diferentes de vegetación, de los cuales el bosque de pino encino y el bosque tropical caducifolio son los que cubren una mayor superficie (Ramos *et al.*, 2007).

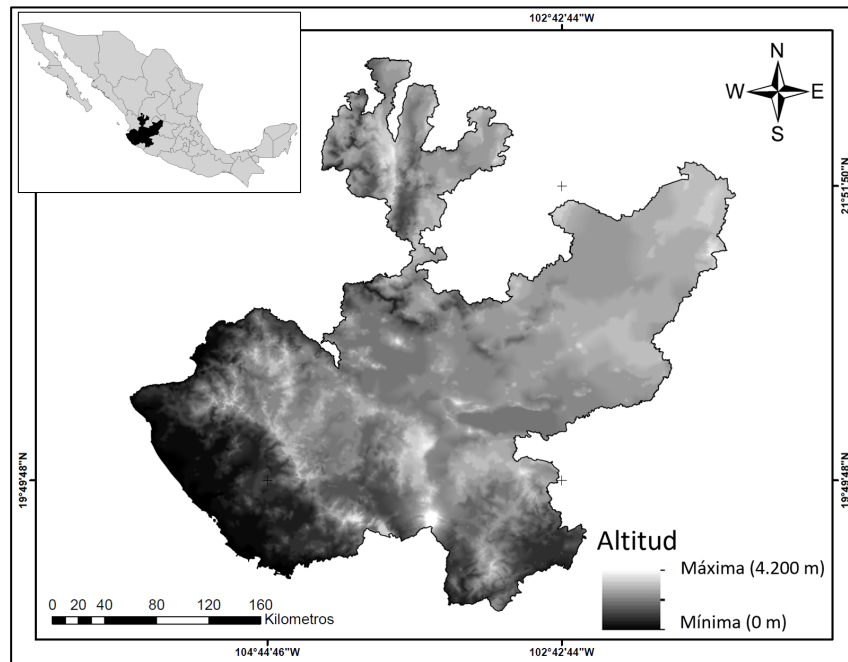


Figura 1. Área de estudio de la unidad de muestreo para determinar la variabilidad espacial de la superficie quemada por incendios forestales, en el estado de Jalisco, México.

En Jalisco, la superficie promedio incendiada anualmente varía entre 15 000 y 20 761 58 hectáreas (Conafor, 2015; Semadet, 2016). El bosque templado es el tipo más afectado, con cerca de 12 008 hectáreas promedio por año; le siguen la selva baja y la vegetación no determinada con un promedio de 1 903.9 hectáreas, pastizal con 729.57 hectáreas, bosque tropical con 463.32 hectáreas, matorral con 190.55 hectáreas y bosque mesófilos con 24.27 hectáreas (Conafor, 2016).

Superficie quemada

En general, se define como peligro de incendio a la probabilidad de que un evento se propague, prospere y cause daños en la vegetación, lo cual es resultado de varios factores, como la temperatura, la humedad relativa, características de combustibles, condiciones del terreno, la velocidad y dirección del viento (Chandler *et al.*, 1983). Con base en lo anterior, el peligro se refleja, entre otros aspectos, en la superficie que se quema en un incendio forestal (Vilchis *et al.*, 2015). En general, puede considerarse que un incendio será más peligroso a medida que el área la superficie quemada resultante sea mayor. Por lo que en este trabajo se consideró el análisis de la superficie promedio siniestrada dentro de una superficie determinada. Aunque, la superficie quemada no es sinónimo de peligro de incendio forestal.

Superficie de sitios de referencia

Se definió la superficie mínima de muestreo más adecuada para captar la variabilidad de la superficie promedio incendiada. Para tal efecto, se realizó el análisis de una serie de polígonos circulares de doce diferentes superficies, denominados sitios de referencia (SIR): 1, 2, 4, 8, 10, 15, 30, 50, 70, 100, 150 y 200 km². Se decidió que los polígonos fueran circulares, debido a que en diversos

trabajos de muestreo forestal se ha utilizado esa figura. Además, únicamente se requiere un punto de control y esto facilita la distribución de los sitios (McRoberts, 1992). Cabe señalar, que es posible utilizar cualquier figura, ya que la importancia radica en el tamaño del sitio y no en su forma.

Con el propósito de captar la variabilidad de la superficie promedio incendiada, que podría presentarse debido a la densidad de puntos de muestreo, se establecieron cuatro intensidades de muestreo: 100, 300, 500 y 1 000. Su ubicación fue completamente al azar, así cualquier punto tuvo la misma probabilidad de ser seleccionado. Más aún, dicha probabilidad es independiente entre puntos.

Aunque está fuera de los alcances del presente estudio, debe analizarse la independencia espacial de los datos, ya que con ella busca una heterogeneidad baja de la variable superficie quemada que garantice la no existencia de autocorrelación espacial. De lo contrario, sería necesario aplicar métodos estadísticos más complejos, que integren la modelización de la estructura espacial de los datos (Zas *et al.*, 2008). Posteriormente, en cada uno de los sitios de muestreo se ubicaron los doce polígonos circulares (SIR).

El siguiente paso fue definir cuantos incendios forestales han tenido lugar en cada uno de los SIR (Figura 2); para esto se usó información estadística de los incendios forestales del periodo 2005-2015 (Conafor, 2015) para determinar la superficie promedio quemada, que corresponde a cada SIR.



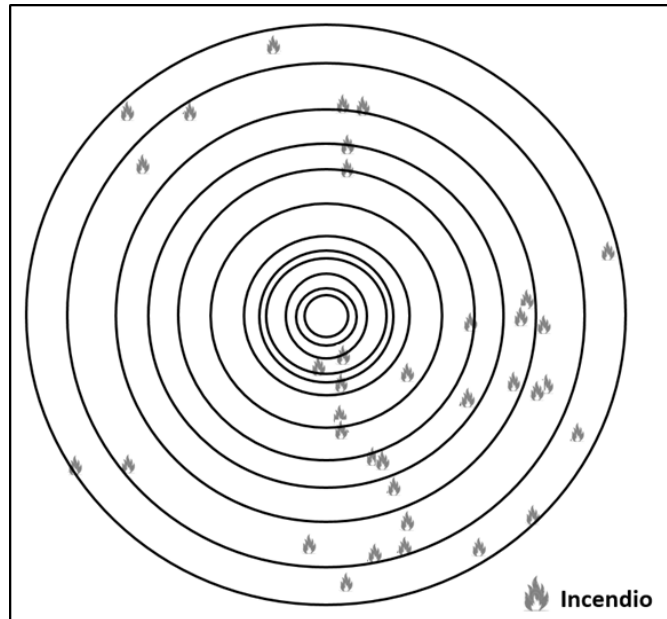


Figura 2. Localización teórica de incendios forestales en referencia a la variación de superficies analizadas para la determinación de la variabilidad espacial de la superficie quemada por incendios forestales, en el estado de Jalisco.

Análisis de variabilidad

Como se señaló, para cada una de las cuatro intensidades de muestreo usadas, se registró la superficie promedio incendiada por SIR correspondiente, para usarla en el cálculo de los estadísticos descriptivos por SIR y para cada una de las intensidades de muestreo. El análisis de la variabilidad de la superficie quemada, en relación al tamaño del SIR, se hizo a partir de graficar los correspondientes coeficientes de variación, por intensidad de muestreo. C; posteriormente se determinó la superficie del polígono de muestreo (SIR) más adecuada, usando como criterio el umbral donde la variabilidad (coeficiente de variación) empezó a tener un comportamiento asintótico.

Para asegurar que el tamaño de SIR seleccionado se diferenciaba de los adyacentes, primero se analizaron los valores de curtosis y del coeficiente de asimetría. Con ello

se determinó que los datos no tienden a definir una distribución normal. Se usó la prueba *Kruskal-Wallis* (no paramétrica) (Fowler *et al.*, 1998), para determinar si existía diferencia significativa entre los tamaños de SIR. Finalmente, se hizo un análisis entre pares de muestras independientes, con la prueba *Mann-Whitney* (Fowler *et al.*, 1998) para determinar si existía diferencia significativa entre los tamaños de SIR vecinos.

Cartografía temática

Una vez que se obtuvo el tamaño del SIR más adecuado, se generó el mapa temático correspondiente. Este ilustra la variación espacial de la superficie quemada por incendios forestales, a lo largo del estado de Jalisco. Para ello se usó la técnica de interpolación denominada, "distancia inversa ponderada", en la cual, el valor de un punto no muestreado es el promedio de la distancia inversa ponderada de los valores de los puntos muestreados presentes (Burrough y McDonnell, 1998). Su interpolación basada en la distancia inversa ponderada, se define con la siguiente función lineal (Flores, 2001):

$$\hat{\beta} * (x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} \beta(x_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (1)$$

Donde:

$\hat{\beta} * (x_0)$ = Valor estimado en un sitio no muestreado

x_0 = Ubicación referida a un sistema de coordenadas

$\hat{\beta} * (x_i)$ = Valor observado en un sitio muestreado

x_i, d_i = Distancias de cada uno de los sitios muestreados hacia el punto no muestreado

p = Exponente de la distancia (ponderación)

n = Número de sitios muestreados. En este trabajo se usó un valor de ponderación (p) de 2, ya que fue el que mejor se representó la variación espacial de la superficie quemada promedio

Resultados

Estadísticos generales

Con base en las cuatro intensidades de muestreo probadas (100, 300, 500 y 1 000 sitios), se calcularon los estadísticos correspondientes a los diferentes tamaños de sitio evaluados (Cuadro 1). Se observa que, sin importar el tamaño del sitio, el valor mínimo fue de cero hectáreas quemadas. Mientras que, el número máximo de superficie quemada fue de 104.9 ha (en 1 km²), hasta 866.66 ha (en 200 km²). Con base en las medias y las modas, se dedujo que en la mayoría de los sitios no hubo superficie quemada.



Cuadro 1. Estadísticas de la superficie media quemada por tamaño de los sitios de referencia (SIR), en relación a las intensidades de muestreo aplicadas en el estudio sobre determinación de la variabilidad espacial de la superficie quemada por incendios forestales.

Estadístico	Intensidad de muestreo	Tamaño de sitio (km ²)											
		1	2	4	8	10	15	30	50	70	100	150	200
Mínimo	100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1 000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Máximo	100	142.50	97.00	75.38	279.00	279.00	279.00	279.00	336.00	336.00	336.00	1 680.00	848.00
	300	30.00	300.00	305.00	156.25	156.25	900.00	600.67	659.80	550.00	597.00	370.76	370.76
	500	300.00	300.00	746.00	385.50	360.00	346.00	600.00	600.00	597.00	597.00	597.00	372.50
	1 000	483.00	346.00	597.00	597.00	597.00	597.00	597.00	346.00	346.00	346.00	357.75	346.00
Media	100	2.29	2.33	2.39	10.12	12.21	12.54	17.35	27.53	26.71	26.96	55.34	56.97
	300	0.99	7.01	12.11	19.18	19.95	51.60	49.10	57.91	53.57	62.89	49.98	45.49
	500	7.31	14.53	34.03	39.74	42.66	35.06	39.44	48.91	42.57	54.12	50.99	50.64
	1 000	22.26	32.47	47.09	45.09	46.52	46.82	45.12	36.51	37.16	39.24	43.06	43.54
Mediana	100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25	5.63	9.90	10.93	15.60	20.99
	300	0.00	0.00	0.00	2.92	4.00	15.71	17.67	20.25	22.83	29.33	29.53	29.29
	500	0.00	0.00	5.05	11.63	16.50	16.54	16.32	17.33	16.16	19.86	22.57	27.14
	1 000	1.00	10.50	16.50	13.42	13.25	15.50	17.13	17.61	19.81	20.03	20.22	24.23
Moda	100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.00	4.00	10.00	10.00	40.00	4.00	5.00
	500	0.00	0.00	0.00	2.00	2.00	2.00	3.00	2.00	5.00	5.00	8.00	28.00
	1 000	0.00	2.00	2.00	4.00	20.00	20.00	20.00	5.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Desviación estándar	100	15.83	13.27	10.37	40.42	42.07	38.72	42.76	59.74	49.72	51.72	177.14	116.33
	300	3.96	32.13	40.92	36.03	34.67	128.51	98.31	107.49	92.13	110.20	65.29	55.86
	500	32.38	50.57	94.97	74.88	70.72	57.62	78.52	97.34	79.42	94.91	77.61	64.95
	1 000	68.44	59.21	94.77	89.67	91.64	90.83	84.06	53.66	53.67	57.16	63.73	61.61
Varianza de la muestra	100	250.5	176.1	107.5	1 633.6	1 769.6	1 499.5	1 828.4	3 569.5	2 472.5	2 675.1	31 379.9	13 532.9
	300	15.7	1 032.2	1 674.3	1 298.3	1 202.1	1 6514.3	9 664.6	11 555.1	8 487.8	12 143.7	4 263.0	3 120.7
	500	1 048.8	2 557.8	9 019.4	5 606.6	5 001.8	3 320.2	6 165.5	9 475.3	6 307.9	9 008.4	6 023.8	4 218.2
	1 000	4 684.5	3 506.4	8 982.3	8 041.5	8 398.5	8 250.8	7 066.6	2 879.4	2 880.8	3 266.7	4 062.0	3 796.1
Coeficiente de asimetría	100	7.97	6.39	5.57	5.91	5.27	5.32	4.23	3.34	3.51	3.73	8.08	4.59
	300	5.25	8.09	5.22	2.52	2.55	4.89	3.70	3.32	3.43	3.54	3.20	3.15
	500	7.85	4.99	5.26	3.25	2.93	3.60	4.81	4.20	4.36	3.56	4.25	2.65
	1 000	4.97	3.41	3.84	3.81	3.66	3.77	4.45	3.51	3.48	3.44	3.53	3.57
Curtosis	100	66.62	41.29	33.02	36.81	30.24	31.47	20.09	11.64	15.85	16.26	73.09	25.58
	300	31.83	71.92	30.79	5.90	6.53	26.50	14.68	12.38	13.11	12.95	12.22	13.08
	500	69.03	25.21	33.63	10.83	8.96	14.41	28.51	20.14	24.74	15.37	25.18	8.48
	1 000	26.87	13.46	16.19	17.03	15.55	16.43	23.42	16.09	15.43	14.68	14.16	14.33
Coeficiente de variación	100	6.93	5.69	4.33	3.99	3.45	3.09	2.46	2.17	1.86	1.92	3.20	2.04
	300	4.00	4.59	3.38	1.88	1.74	2.49	2.00	1.86	1.72	1.75	1.31	1.23
	500	4.43	3.48	2.79	1.88	1.66	1.64	1.99	1.99	1.87	1.75	1.52	1.28
	1 000	3.07	1.82	2.01	1.99	1.97	1.94	1.86	1.47	1.44	1.46	1.48	1.42

Unidad de muestreo

Como se indicó la medida de descripción correspondió al coeficiente de variación como medida de dispersión, ya que describe la cantidad de variabilidad (en relación con la media), sin basarse en el tamaño de la muestra. Por lo tanto, a diferencia de la desviación estándar, se pudo comparar la dispersión de las intensidades de muestreo utilizadas, independientemente de la diferencia en sus medias. La variabilidad de la superficie promedio incendiada disminuyó, a medida que se reducía el tamaño del SIR (Figura 3); esa tendencia se ajustó a los modelos de correlación correspondientes a las intensidades de muestreo (Cuadro 2). Esto sucedió en todos los casos, hasta llegar a una asíntota, en la cual los valores del coeficiente de variación tendieron a estabilizarse, lo que ocurre en un intervalo aproximado de 70 a 100 km²; por lo que, finalmente, se consideró el tamaño de SIR de 100 km² (radio = 5.650 m) como punto de quiebre de la variabilidad. Mismo que se definió como la unidad de muestreo (UM), para estimar la variación espacial de la superficie quemada promedio por incendios forestales.

Cuadro 2. Valores estadísticos de los modelos a los que se ajusta la tendencia del coeficiente de variación en relación al tamaño de sitio, para diferentes intensidades de muestreo.

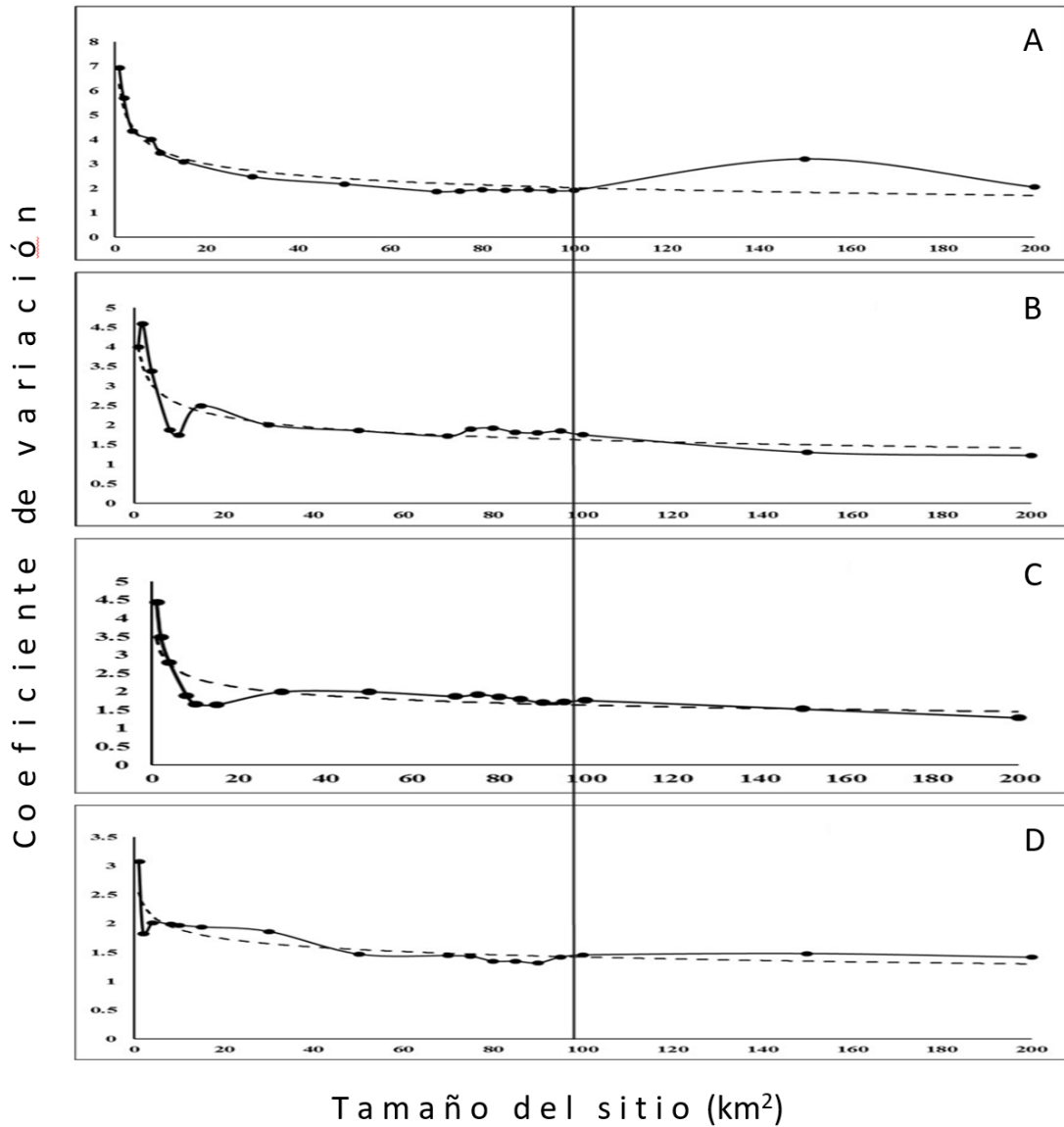
Intensidad de muestreo	Modelo	R ²	Significancia
100	$y = 6.1194x^{-0.225}$	0.8104	0.000
300	$y = 4.09x^{-0.219}$	0.8129	0.000
500	$y = 3.4791x^{-0.178}$	0.7316	0.000
1 000	$y = 2.5001x^{-0.114}$	0.7658	0.000

Se usó la prueba de *Kruskal-Wallis*, equivalente no paramétrico del ANOVA, para determinar la existencia de diferencias significativas entre los doce tamaños de SIR, para cada intensidad de muestreo. A diferencia del ANOVA, en lugar de medias se analizan los intervalos de los SIR. Primero se combinaron los datos de todos los tamaños de SIR y después se ordenaron de menor a mayor. A continuación, se calculó el intervalo promedio para los datos de cada tamaño de SIR. El criterio de decisión que se aplica, para aceptar o rechazar la hipótesis nula de que no existe diferencia significativa, es el valor de la probabilidad (P). Cuando este valor es inferior a 0.05, la hipótesis nula se rechaza.

Los valores de probabilidad resultantes se muestran en el Cuadro 3; se observa que en todas las intensidades el valor de P es menos a 0.05, lo cual implica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los diferentes tamaños de SIR.

El análisis comparativo por pares de muestras, a través de la prueba *Mann-Whitney*, determinó que no existen diferencias entre las superficies quemadas, entre los tamaños de SIR mayores y menores a 100 km² (Cuadro 4), lo que soporta la elección de este tamaño de SIR, como punto de quiebre del comportamiento asintótico de la variabilidad (coeficiente de variación).





La línea vertical señala el inicio del comportamiento asintótico del coeficiente de variación (punto de quiebre [100 km²]).

Figura 3. Tendencia del coeficiente de variación, en relación al tamaño de sitio, para diferentes intensidades de muestreo: (A) 100, (B) 300, (C) 500, (D) 1 000.



Cuadro 3. Resultados de la prueba *Kruskal-Wallis*.

SIR	MR-100	MR-300	MR-500	MR-1000
1	373.92	1 155.5	2 023.58	4 325.38
2	380.83	1 244.12	2 108.3	4 556.05
4	408.88	1 304.37	2 287.86	4 910.26
8	478 215.00	1 457.30	2 461. 56	5 279.23
10	505 035.00	1 496.85	2 553.21	5 433.18
15	551 005.00	1 661.44	2 801.95	5 762.49
30	634 455.00	1 860.19	3 186.03	6 457.73
50	697 695.00	2 048.03	3 435.15	6 844.41
70	739 915.00	2 189.47	3 605.55	7 012.20
100	745 075.00	2 296.35	3 776.34	7 130.64
150	821 955.00	2 415.04	3 862.75	7 204.18
200	869.02	2 477.35	3 903.74	7 090.27
H	341.91	903.539	1 235.66	1 528.94
P	0.000	0.000	0.000	0.000

MR = Media de intervalo (el número indica el tamaño de muestra); *H* = Estadístico de *Kruskal-Wallis*; *P* = Valor de probabilidad.



Cuadro 4. Resultados del análisis comparativo por pares de muestras, a través de la prueba *Mann-Whitney*, de los diferentes tamaños de sitio (SIR).

	1	2	4	8	10	15	30	50	70	100	150
1											
2	*-B-C-D										
4	*-B-C-D	*-*C-D									
8	A-B-C-D	A-B-C-D	A-B-C-D								
10		A-B-C-D	A-B-C-D	*-*-*							
15			A-B-C-D	A-B-C-D	*-B-C-D						
30				A-B-C-D	A-B-C-D	A-B-C-D					
50					A-B-C-D	A-B-C-D	*-B-C-D				
70						A-B-C-D	A-B-C-D	*-*-*			
100							A-B-C-D	*-B-C-D	*-*-*		
150								A-B-C-D	A-B-C*	*-*-*	
200									A-B-C*	A-B-*	*-*-*

Las letras indican diferencia en relación a las intensidades de muestreo ($P < 0.5$):

A = 100, B = 300, C = 500, D = 1 000, * = sin diferencia entre pares.

Distribución espacial de la superficie quemada

La Figura 4 presenta los resultados de este proceso, en el que se observó una mayor superficie quemada (en 100 km²) en las áreas donde la densidad de incendios forestales es más alta. Por el contrario, se tuvieron regiones con superficie incendiada baja o nula. Debe remarcarse que al mismo tiempo se observó la densidad de número de incendios y la variación espacial de la superficie quemada. La mayor concentración de incendios se ubicó en la parte central del estado de Jalisco, donde se tienen las concentraciones de población más altas.



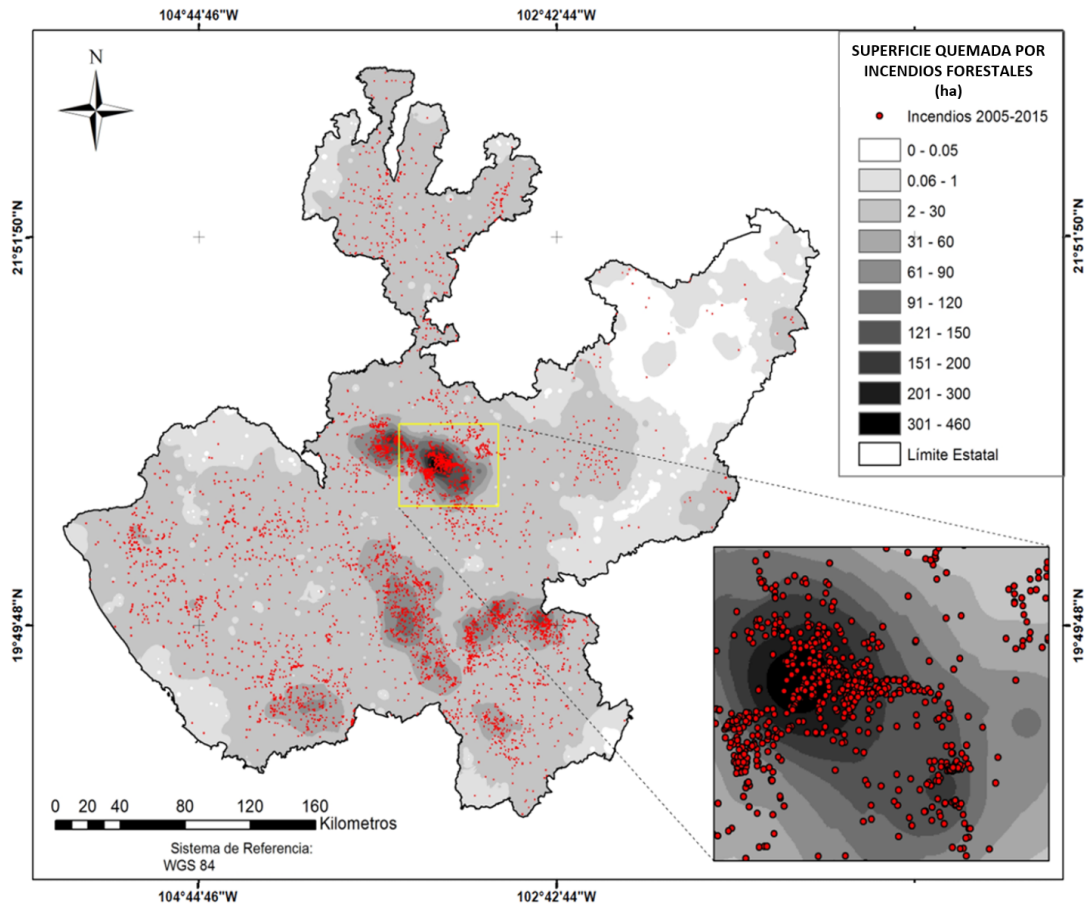


Figura 4. Distribución espacial de la superficie (ha) promedio quemada por incendios forestales, en un área de 100 km², en Jalisco.

Discusión

Aunque existen varios trabajos en los que se define el peligro de incendios forestales (Muñoz *et al.*, 2005; Yebra *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2011), la información (básicamente en cartografía temática) se genera a través de diversos procedimientos. Cabe señalar que la indefinición de estrategias comunes limita la compatibilidad y comparabilidad de los resultados. Para evitar esto, en el caso de la superficie quemada, se debe establecer un proceso estadísticamente robusto, que

permita estandarizar las estimaciones. Para esto, hay que empezar por definir una unidad de muestreo, lo cual se logra en el presente trabajo.

A pesar de que no se tienen registros de investigaciones similares, es importante indicar que, en algunos estudios se especifican ciertas unidades de muestreo (Carrillo *et al.*, 2012). No obstante, estas no son definidas estadísticamente, sino por situaciones circunstanciales. Por ejemplo, en el trabajo de Carrillo *et al.* (2012), que se refiere al criterio de riesgo de incendio, se hace un análisis de regresión logística para establecer las variables de mayor importancia, a través del muestreo aleatorio de unidades de 10 km². Sin embargo, ese tamaño de unidad es determinado solo con base en la resolución espacial de la información fuente usada. Por lo que no podría emplearse como unidad de muestreo comparativa.

No obstante de que existen varios trabajos en los que se determina una unidad de muestreo, con fines de inventarios forestales (O'Regan y Arvanitis, 1966; Zeide, 1980; McRoberts *et al.*, 1992; Aguirre *et al.*, 1997), esta carece de las bases para utilizarla en un diseño de muestreo para estimar la variabilidad espacial de la superficie quemada por incendios forestales, que garantice una mejor ubicación y dimensionamiento de las actividades de manejo del fuego, ya que si se considera que la tarea de combatir incendios forestales es muy costosa y peligrosa; esto es de gran ayuda en la administración y asignación de recursos (Díaz *et al.*, 1998; Rojo *et al.*, 2001).

Se concretó una unidad de muestreo que permite estimar la variación espacial de la superficie quemada en forma estandarizada, y con ello es posible efectuar comparaciones entre varias regiones, para determinar áreas prioritarias de atención. Más aún, la metodología podría usarse para otro tipo de análisis comparativos, como el de las variaciones temporales de la frecuencia y localización de incendios forestales (Rodríguez, 2012).

El tamaño de sitio se define a partir de la tendencia de disminución de la variabilidad (coeficiente de variación) de la superficie promedio quemada, cuando aumenta el tamaño de los SIR, hasta alcanzar un comportamiento asintótico

(Gallegos *et al.*, 2006), lo cual se presenta en forma similar en las diferentes intensidades de muestreo probadas. De esta forma, se establece como unidad de muestreo (UM), para la estimación de la superficie quemada por incendios forestales, un área de 100 km² (radio = 5.650 m). Aunque, de acuerdo a los resultados, no se define un punto de quiebre específico, sino un intervalo (entre 70 y 100 km²). A fin de estandarizar un proceso metodológico y asegurar estar más allá del límite inferior, se elige una UM de 100 km².

En el proceso de definición de la unidad de muestreo, es importante resaltar que se usan estadísticas oficiales de un periodo de 10 años (Conafor, 2013). Por lo tanto, la georreferenciación de los incendios forestales permite ubicar las áreas con mayor incidencia. Estas evidencias demuestran que cada año, los incendios no se presentan de manera totalmente aleatoria, sino que siguen un comportamiento crítico autorganizado (Torres *et al.*, 2007; Ávila *et al.*, 2010; Pérez *et al.*, 2013). Sin embargo, se requiere de un análisis más formal para determinar un patrón de ocurrencia (Ávila *et al.*, 2010). No obstante, puede asumirse que la superficie promedio incendiada no tiene una gran variación de un año a otro. Aunque, deben considerarse factores preponderantes, como la variación de condiciones climáticas y la acumulación de combustibles forestales. También, puede integrarse la información sobre la superficie quemada definida con base en la tecnología de puntos de calor; para esto debe hacerse con ciertas reservas, ya que no siempre existe una relación directa entre esos puntos y las superficies quemadas (Tansey *et al.*, 2008).

Dado que la mayor frecuencia de los promedios de superficies quemadas estimadas correspondió a valores bajos (< 30 ha), y en menor frecuencia a 400 ha, la distribución no es normal, lo cual ocurre para todas las intensidades de muestreo probadas. Es importante señalar que, a través de un análisis comparativo por pares de muestras se establece que existe diferencia significativa entre los tamaños de sitio dentro del intervalo que define el inicio del comportamiento asintótico de la variabilidad (coeficiente de variación). De esta forma, se corrobora que se capta

mejor la variabilidad con el tamaño de sitio de 100 km², en comparación con el de 70 km². Con ello se define un punto de quiebre más cercano al comportamiento asintótico de la variabilidad.

Respecto a la variación espacial de la superficie quemada, se observa que, en lugares con mayor densidad de incendios, la UM definida capta un mayor número de incendios que inciden en la superficie promedio quemada. La cartografía resultante indica que las superficies quemadas más grandes se ubican, primeramente, en la parte centro del estado de Jalisco. También, se identifican dos regiones importantes orientadas al sur y al suroeste de la entidad. En todas estas zonas se localizan las concentraciones más altas de población, así como una importante superficie dedicada a las actividades agropecuarias, lo cual es relevante, si se considera que la mayor parte de los incendios forestales son causados por acciones antrópicas. Esto, a su vez, define patrones geográficos de ocurrencia de incendios, con base en los cuales se pueden determinar áreas prioritarias en referencia a la superficie quemada por incendios forestales (Flores *et al.*, 2016a).

La información generada puede usarse tanto para reforzar, como para validar las determinaciones actuales de áreas prioritarias de peligro, se hacen actualmente, que se usan para propósitos de planeación a mediano y largo plazo, basadas en el análisis integral de varios parámetros; por ejemplo, temperatura, exposición, pendiente, comportamiento del fuego, efecto del fuego, etcétera (Flores *et al.*, 2016b).

Sin embargo, es importante señalar que el concepto de peligro de incendios forestales no debe confundirse con el de índice de peligro, ya que este último se utiliza para hacer estimaciones a corto plazo (diarias), con fines operativos.

Algunos autores sugieren definir áreas prioritarias de incendios forestales, en función de la variación espacial de su densidad, a través de procesos específicos, como la función de densidad de *Kernel* (de la Riva *et al.*, 2004; Kuter *et al.*, 2011). Con base en la cual se determina la probabilidad de una densidad alta o bajo.

Conclusiones

La disminución de la variabilidad (coeficiente de variación) de la superficie promedio quemada que se observa al aumentar el tamaño de los SIR, hasta un comportamiento asintótico, sugiere aceptar la hipótesis que se plantea inicialmente. Con ello, la unidad de muestreo para la estimación de la variabilidad de la superficie quemada por incendios forestales es de 100 km².

La determinación de una unidad de muestreo común, para la estimación de la variabilidad espacial de la superficie quemada por incendios forestales evita la falta de correspondencia de las estimaciones entre diferentes zonas.

Los resultados de varias zonas pueden ser no solo compatibles, sino comparables. Es decir, con base en la unidad de muestreo (UM) se puede ubicar la superficie promedio incendiada de un área específica por muestrear, y a partir de esto, realizar comparaciones entre varias áreas. Así mismo, la UM permite compartir información entre áreas diferentes, de tal manera que es posible integrar información para definir estrategias de control y prevención de incendios en el estado de Jalisco, o a nivel regional.

La unidad de muestreo determinada puede usarse para apoyar la definición de estrategias estandarizadas de validación de áreas de peligro de incendios forestales, que pueden determinarse por otros parámetros, como la temperatura, la exposición, la pendiente, el comportamiento del fuego, efecto del fuego, etcétera.

El análisis no paramétrico de los datos evidencia la existencia de diferencia estadísticamente significativa entre los diferentes tamaños de sitios, por lo que es posible apoyar la definición del punto de quiebre de inicio del comportamiento asintótico de la variabilidad, y ubicar un tamaño de sitio adecuado.

En cuanto a la variación espacial de la superficie quemada, se concluye que la técnica de interpolación, basada en la distancia inversa ponderada, define una distribución adecuada. Ya que existen coincidencias espaciales entre los mayores

valores de superficie quemada, con las áreas donde se ubican las mayores concentraciones de incendios.

No obstante que la definición de la unidad de muestreo se hizo con un ejemplo a nivel estatal (Jalisco, México), esta se puede usar en áreas con condiciones similares a la de la zona estudiada. En caso contrario, se deberán generar unidades de muestreo específicas, ya sea a nivel regional, estatal, municipal, etcétera, para lo cual se podrá usar la metodología descrita en este trabajo. Asimismo, se sugiere trabajar con datos de un periodo mínimo de cinco años de estadísticas de incendios forestales.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

Referencias

Aguirre C., O. A., J. Jiménez P., E. J. Treviño G. y B. Meraz A. 1997. Evaluación de diversos tamaños de sitio de muestreo en inventarios forestales. *Madera y Bosques* 3 (1):71-79.

Ávila F., D. Y., M. Pompa G. y E. Vargas P. 2010. Análisis espacial de la ocurrencia de incendios forestales en el estado de Durango. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 16 (2): 253-260.

Burrough, P. A. and R. McDonnell. 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press. New York, NY USA. 333 p.

Carrillo G., R. L., D. A Rodríguez T., H. Tchikoué, A. I. Monterroso R. y J. Santillán P. 2012. Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. *Interciencia* 37 (9): 678-683.

Chandler, C., P. Cheney, P. Thomas, L. Trabaud and D. Williams. 1983. *Fire in Forestry*. Vol. II. Wiley. New York, NY USA. 298 p.

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2010. Procedimiento para la elaboración de un mapa de áreas de atención prioritaria contra incendios forestales. Gerencia de Protección Contra Incendios Forestales. Comisión Nacional Forestal. Semarnat. México, D.F., México. 49 p.

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2013. Incendios Forestales. Campaña 2013. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/4339Campa%C3%B1a%20de%20contra%20incendios%202013.pdf> (30 de mayo de 2016).

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2015. Incendios. <http://www.conafor.gob.mx/web/temas-forestales/incendios/> (4 de agosto de 2015).

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2016. Reporte semanal de resultados de incendios forestales 2016. Programa Nacional de Prevención de Incendios Forestales. Gerencia de Protección Contra Incendios Forestales. Comisión Nacional Forestal. Semarnat. México, D.F., México. 22 p.

de la Riva J., F. Pérez C., N Lana R. and N Koutsias. 2004. Mapping wildfire occurrence at regional scale. *Remote Sensing of Environment* 92 (3): 363-369.

Díaz D., R., R. Salvador, J. Valeriano y X. Pons. 1998. Detección de superficies forestales en Cataluña mediante imágenes de satélite durante el período 1975-1995. Aplicación para la caracterización del régimen de incendios y los procesos de regeneración de la vegetación. *Serie Geográfica* 7: 129-138.

Flores, J. G. 2001. Modeling the spatial variability of forest fuels arrays. Doctoral dissertation. Department of Forest Sciences. Colorado State University. Fort Collins, CO, USA. 184 p.

Flores G., J. G., J. D. Benavides S., C. Valdez R., D. G. Vega M. O. y U. D. Casillas D. 2016a. Descripción de variables para definición de riesgo de incendios forestales en México. INIFAP-CIRPAC. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jal., México. Folleto técnico Núm. 161 p.

Flores G., J. G., J. D. Benavides S., H. J. Leal A., D. G. Vega M. O., C. Valdez R. y U. D. Casillas D. 2016b. Descripción de variables para la definición de peligro de incendios forestales en México. Folleto técnico Núm. 3. INIFAP-CIRPAC. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jal., México. 53 p.

Fowler, J., L. Cohen and P. Jarvis. 1998. Practical statistics for field biology. 2nd edition. Wiley. England, United Kingdom. 259 p.

Gallegos, A., O. A. Aguirre y G. A. González. 2006. Optimización de inventarios forestales para manejo forestal de un bosque tropical en Jalisco, México. *In: IV Simposio Internacional sobre Manejo Sostenible de los Recursos Forestales*. 19 al 22 de abril. Pinar del Río, Cuba. pp. 171-184.

Jardel P., E. J., J. M. Frausto L., D. Pérez S., E. Alvarado C., J. E. Morfín R., R. Landa y P. Llamas C. 2010. Prioridades de investigación en manejo del fuego en México. CIECO, Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, UAS, UNAM, Universidad de Guadalajara, USAID. México, D.F., México. 41 p.

Kuter N., F. Yenilmez and S. Kuter. 2011. Forest fire risk mapping by kernel density estimation. *Croatian Journal of Forest Engineering* 32 (2): 599-609.

McRoberts, R. E., E. O. Tomppo y R. L. Czaplewski. 1992. Diseños de muestreo de las evaluaciones forestales nacionales. Antología de conocimiento para la evaluación de los recursos forestales nacionales. FAO. Roma, Italia. 21 p.

Muñoz R., C. A., E. J. Treviño G., J. Verástegui Ch., J. Jiménez P. y O. A. Aguirre C. 2005. Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la Sierra Madre Oriental de México. *Investigaciones geográficas* 56: 101-117.

O'Regan, W. G. and L. G. Arvanitis. 1966. Cost effectiveness in forest sampling. *Forest Science* 12 (4): 406-414.

Pérez V., G., M. A. Márquez L., A. Cortés O. y M. Salmerón M. 2013. Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques* 19 (2): 37-58.

Ramos V., I., S. Guerrero V. y F. M. Huerta M. 2007. Patrones de distribución geográfica de los mamíferos de Jalisco, México. *Revista mexicana de biodiversidad* 78 (1): 175-189.

Rodríguez M., A. 2012. Cartografía multitemporal de quemas e incendios forestales en Bolivia: Detección y validación post-incendio. *Ecología en Bolivia* 47 (1): 53-71.

Rodríguez T., D. A., H. Tchikoué, C. Cántora 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. *Agrociencia* 45 (5): 593-608.

Rojo M., G. E., J. Santillán P., H. Ramírez M. y B. Arteaga M. 2001. Propuesta para determinar índices de peligro de incendios forestal en bosque de clima templado en México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 7 (1): 39-48.

Rzedowski, J. 1986. *Vegetación de México*. Limusa. México, D.F., México. 432 p.

Secretaria de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (Semadet). 2016. Incendios Forestales. Secretaria del Medio Ambiente y Desarrollo Territorial <http://incendios.semadet.jalisco.gob.mx/estadisticas> (6 de junio de 2016).

Tansey, K., J. Beston, A. Hoscilo, S. E. Page and C. U. Paredes. 2008. Relationship between MODIS fire hot spot count and burned area in a degraded tropical peat swamp forest in Central Kalimantan, Indonesia. *Journal Geophysical Research* 113: 1-8.

Torres R., J. M., O. S. Magaña T. y G. A. Ramírez F. 2007. Índice de peligro de incendios forestales de largo plazo. *Agrociencia* 41 (6): 663-674.

Vilchis F., A. Y., C. Díaz D., D. Magaña L., K. M. Bá y M. A. Gómez A. 2015. Modelado espacial para peligro de incendios forestales con predicción diaria en la cuenca del río Balsas. *Agrociencia* 49 (7): 803-820.

Yebra A., M., A. de Santis y E. Chuvieco. 2005. Estimación del peligro de incendios a partir de teledetección y variables meteorológicas: variación temporal del contenido de humedad del combustible. *Recursos Rurais* 1 (1): 9-19.

Zas A., R., P. Martíns G. y R. de la Mata P. 2008. Autocorrelación espacial: un problema común...mente olvidado. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 24: 139-145.

Zeide, B. 1980. Plot size optimization. Forest Science 26 (2): 251-257.