

Influencia de variables climáticas en la presencia de incendios en México, histórico de los años 2005 al 2014

Influence of climatic variables on the presence of fires in Mexico, historical from the years 2005 to 2014

Recepción del artículo: 09/07/2024 • Aceptación para publicación: 20/08/2024 • Publicación: 01/09/2024

● <https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi23.358>

Juan de Dios Benavides Solorio*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0034-6194>

J. German Flores Garnica

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8295-1744>

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,
Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental
Centro Altos de Jalisco.

Tepatlán de Morelos, Jalisco, México.

Manuel Chávez Padilla

Biólogo prestador de servicios profesionales.

*Autor para correspondencia:

benavides.juandedios@inifap.gob.mx

Resumen

Se realiza un análisis de algunas variables climáticas que tienen influencia en los incendios forestales de México que incluye una serie de datos de 10 años. Las variables climáticas fueron obtenidas de diferentes fuentes como son la CONAGUA, la NASA, Universidad de Memphis y otras. Se realiza un análisis individual por cada una de las variables y se proporcionan resultados. Se observa que existe una correlación entre el número de incendios y la superficie afectada, cuando se rebasa un límite en el número de incendios, que rebasa también la capacidad para su control se vuelven catastróficos. Los incendios de gran magnitud están relacionados con altas temperaturas, bajas precipitaciones y sequía. Se presentan valores críticos para cada una de las variables. Generalmente las mejores correlaciones se presentaron durante la mayor época es decir los meses de abril y mayo. En este trabajo la humedad relativa tuvo poca influencia y el viento no presentó ninguna.

Palabras clave: Precipitación, temperatura, sequía, humedad relativa, viento.

Abstract

Ten years of data were analyzed including forest fires and climatic data. The climatic data came from different sources like CONAGUA, NASA, University of Memphis and others. Each climatic variable has its own results. A good correlation was observed between forest fires and the affected area, when the number of fires exceeds the control capacity of the firefighters the fires become disastrous. Catastrophic fires were related to high temperatures, low precipitation and dryness. Best correlations were observed during the dry season especially in April and May. The relative humidity had low influence and the wind did not have any influence.

Keywords: Rainfall, temperature, drought, relative humidity, wind.

Introducción

Los incendios forestales en México son ocasionados en un alto porcentaje (98%) por factores antropogénicos y solamente un 2% se debe a condiciones naturales (Arnaldos *et al.*, 2004; Benavides *et al.*, 2018a; Benavides *et al.*, 2018b). Sin embargo, la propagación y comportamiento de estos incendios está supeditada a diversos factores como la topografía, combustibles y clima (Pyne *et al.*, 1996; Rodríguez *et al.*, 2002). En referencia al clima, un incendio puede prolongarse y quemar áreas extensas si las condiciones en el momento del incendio son favorables, como es el caso de escasa, o nula, precipitación, altas temperaturas, humedades relativas bajas, vientos fuertes, índices de sequía altos, entre otros. Estas variables climáticas pueden clasificarse como variables dinámicas, ya que se modifican cada hora, diariamente, semanalmente y anualmente. Por lo tanto, es importante conocer esta dinámica y monitorearla para determinar su influencia en el aumento o disminución de los incendios forestales en cada temporada. Tal es el caso de las lluvias que se presentan, en gran parte del país, en el verano, lo cual disminuye la presencia de incendios, lo cual implica que los incendios más problemáticos se presentan en invierno y primavera, específicamente durante el período de diciembre a mayo (Rodríguez *et al.*, 2002), que se relaciona con la temporada de incendios (Julio y Giroz, 1975). De esta forma, de acuerdo con el régimen mensual de lluvias en México, el período de febrero a abril es el más seco del año (CONAGUA, 2010), lo cual coincide con la época de incendios, que generalmente se encuentran entre los meses de diciembre a mayo (Rodríguez *et al.*, 2002). Más aún, una baja precipitación puede estar correlacionada con la ocurrencia de incendios (CONAFOR, 2010), no obstante, esta relación no está lo suficientemente estudiada como para poder definir detalles y cantidades. Por otra parte, un incendio se propaga más rápido, durante el día, ya que la temperatura va incrementando y la humedad relativa decrece, lo cual ayuda a desecar los combustibles forestales, favoreciendo su ignición. De acuerdo con esto, las horas de mayor peligro para los incendios y su propagación ocurre generalmente entre las 10:00 am y las 18:00 horas. Esto implica que la temperatura presenta oscilaciones durante el día, donde, por lo general, las temperaturas son más altas durante el día y más frescas durante la noche. De esta forma, una temperatura alta tiene influencia directa en la evapotranspiración del suelo (Julio y Giroz, 1975), lo que, a su vez, influye en la disminución de la humedad de los combustibles forestales (Julio, 2000), como de los pastos y matorrales (Ruiz y Reyes, 2005).

En cuanto a la humedad relativa, se considera que menos

30% es propicia para la presencia de incendios y que éstos sean más difíciles de controlar (Rodríguez *et al.*, 2002). Esto es debido a que la humedad del aire está correlacionada con el contenido de humedad de los combustibles. Por lo tanto, si la humedad es inferior al 30-40% se reduce drásticamente la humedad de los combustibles, propiciando una mejor condición para que estos puedan arder (Julio y Giroz, 1975). Esta pérdida de humedad de los combustibles, asociada a la humedad del ambiente, también se relaciona con la radiación solar, temperatura, pendiente, viento y orientación de las laderas (Bonazountas *et al.*, 2007). Específicamente, en los meses de febrero a abril se tienen los déficits de humedad del ambiente más largos del año, por lo que los combustibles tienen una baja humedad, favoreciendo la posibilidad de inicio de incendios y el que éstos sean de alta intensidad (CONAFOR, 2012). En referencia al viento este es también un factor que influye en el comportamiento del incendio (Ayala y Oclina, 2002, Chuvieco *et al.*, 2010; Carrillo *et al.*, 2012), como lo es el ritmo de propagación, ya que favorece que las llamas fluyan más velozmente, deseca los combustibles, proporciona oxígeno para la combustión, cambia la dirección del incendio y además puede propiciar la generación de vientos verticales (convectivos), que lanzan pavesas hacia áreas alejadas del incendio activo, que puede iniciar nuevos incendios (Rodríguez *et al.*, 2002). Específicamente, la dirección y la velocidad del viento influyen en la desecación de la vegetación y en el abastecimiento de oxígeno para mantener la combustión ya iniciada (Julio y Giroz, 1975; Rodríguez *et al.*, 2002; Ayala y Oclina, 2002).

Las diferentes combinaciones de las variables climáticas pueden influir para que un incendio sea más devastador que otro. Por ejemplo, la combinación de la radiación solar y la emanación de calor contribuyen a la temperatura ambiental, ya que la atmosfera terrestre absorbe la radiación y esta es devuelta al medio en forma de calor. Lo cual además influye en la humedad del aire, precipitación, sequías, evapotranspiración, etc. En un intento de conjuntar la influencia de estos factores climáticos, se han utilizado los índices de sequía para identificar la escasez de precipitación. Un ejemplo de esto es el Índice de sequía por área (DAI), que es un método que ayuda a entender las temporadas de inundaciones y de sequías con los monzones de la India, comparando las precipitaciones mensuales durante el período crítico del monzón y obteniendo la intensidad tanto de humedad como de sequía. Otro ejemplo es el Índice de sequía de Palmer (PSDI) (Palmer, 1965), que permite conocer la intensidad, duración y extensión de la sequía, empleando datos de precipitación, temperatura y humedad del suelo. Este índice presenta rangos entre -4 y +4, donde el valor

negativo indica períodos más severos de sequía, mientras que los valores positivos indican períodos de humedad y los valores cercanos al cero indican períodos promedio. Se tiene también al Índice Normalizado de Precipitación (PSI), que requiere datos de precipitación, humedad del suelo, nieve y aguas subterráneas (McKee, 1993). Donde los valores negativos, al igual que el índice de Palmer, indican una mayor sequía y valores positivos mayor humedad.

De acuerdo con lo anterior, en este trabajo se evalúan diferentes variables climáticas y sus interacciones para definir su influencia en la presencia de incendios forestales a nivel nacional, lo cual se ejemplifica dentro del período 2005 al 2014. De esta forma, se busca encontrar las variables más significativas que determinan la ocurrencia y magnitud de los incendios forestales. Las variables analizadas son precipitación, temperatura, humedad relativa, viento y el índice de sequía. La información generada puede ser utilizada para ser incorporada a índices de peligro nacionales.

Materiales y métodos
Variables climáticas

Para el presente trabajo se analizó información de incendios forestales en el país y de las variables climáticas más importantes que pueden influir en la ocurrencia de los incendios. La información se obtuvo de diferentes fuentes; para el caso de los incendios forestales los datos fueron obtenidos de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), la cual se registró a nivel de municipio y por estado, en un lapso de 10 años (2005 al 2014). La información puntual incluyó las coordenadas de ubicación, la superficie afectada, los tipos de vegetación que fueron quemados, las causas de los incendios, la intensidad de los mismos entre otras (Benavides *et al.*, 2018a y Benavides *et al.*, 2018b). Para los propósitos de este trabajo, la información fue sumada por cada estado y a nivel nacional, con lo que se proporciona información de la superficie afectada y número de incendios a nivel nacional por año.

En cuanto a las variables climáticas, estas se obtuvieron del Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA), de la NASA y la National Science Foundation (Atlas mexicano de sequía). Específicamente, la información de precipitación se presenta por estado de forma mensual y total anual (CONAGUA, 2017). Debido a que se considera que la mayor parte de los incendios en México ocurre de enero a mayo y principalmente de marzo a mayo, la información de precipitación se trabajó con base al total anual (PRE) y las sumas mensuales (Cuadro 1).

Cuadro 1. Descripción de las variables de precipitación utilizadas en referencia a la ocurrencia de incendios forestales.

Variables de precipitación	Sumatoria de la precipitación anual y por diferentes meses para el país
PRE	Sumatoria anual
PRE1	Suma de marzo y abril
PRE2	Suma de abril y mayo
PRE3	Suma de marzo, abril y mayo
PRE4	Suma de enero, febrero, marzo, abril y mayo

La información de temperaturas estatales media, máxima y mínima proporcionada de forma mensual, promedio anual y por diferentes años se obtuvo de CONAGUA (CONAGUA, 2017), las variables analizadas se presentan en el Cuadro 2. La humedad relativa media, máxima y mínima se obtuvo de las bases de datos que maneja la NASA para la república mexicana, la determino de modelos específicos basados en la presión atmosférica y temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco. La información de las diferentes temperaturas y humedad relativa se procesaron de forma similar a la precipitación, considerando los mismos meses que para la precipitación, aunque ahora se trabajó el promedio de las diferentes temperaturas y humedades relativas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Descripción de las variables de temperatura y humedad relativa obtenidas para todo México, utilizadas en referencia a la ocurrencia de incendios forestales.

Temperatura			Humedad relativa			Promedio
Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	
TMD	TMX	TMN	HRMD	HRMX	HRMN	Anual
TMD1	TMX1	TMN1	HRMD1	HRMX1	HRMN1	De marzo y abril
TMD2	TMX2	TMN2	HRMD2	HRMX2	HRMN2	De abril y mayo
TMD3	TMX3	TMN3	HRMD3	HRMX3	HRMN3	De marzo a mayo
TMD4	TMX4	TMN4	HRMD4	HRMX4	HRMN4	De enero a mayo

Dónde: TMD= Promedio de temperatura media anual; TMX=Promedio de temperatura máxima; TMN=Promedio de temperatura mínima; HRMD=Promedio de humedad relativa media; HRMX=Promedio de humedad relativa máxima; HRMN=promedio de humedad relativa mínima

La velocidad de viento medio, máximo y mínimo se generaron través de modelos matemáticos, que simulan el viento a nivel de superficie, basados en datos de vientos tomados a 10 metros de altura (NASA, 2017). La información se obtuvo por cada estado y mes del período que se tiene de incendios. Con la información estatal y mensual se extrajeron datos nacionales con las siguientes variables de viento: velocidad media de viento (VIEMD), promedio de viento máximo (VIEMX) y promedio de viento mínimo (VIEMN). La estructura de la información fue similar al presentado en el Cuadro 2, referente a la temperatura y humedad relativa.

Integración de variables

Para el análisis multivariado de los factores climáticos, se analizaron varios índices. El índice de sequía por área (DAI) y el Índice de sequía de Palmer (PSDI) (Cuadro 3)

se obtuvieron de la Universidad de Memphis de EUA, donde se incluye información de un atlas gráfico de sequía de la República Mexicana. Trabajando con la malla, los valores se obtuvieron de distintos puntos (intersecciones) en la República Mexicana (Universidad de Memphis, 2017, Stahle *et al.*, 2016). Esta información está basada en reconstrucciones de anillos de crecimiento y relacionadas con el clima desde el año 1,400 hasta el 2,012, los cuales se pueden representar cartográficamente, o en forma puntual. No obstante, se tuvo la limitante de que solo se tienen datos hasta el año 2012, mientras que en este trabajo se consideraron incendios forestales hasta el año 2014.

Cuadro 3. Descripción de las variables de diferentes índices de sequía utilizadas en referencia a la ocurrencia de incendios forestales.

Variabes de índice de sequía por área	Variabes de índice de sequía de Palmer	Variabes de índice estandarizado de precipitación	Promedio de las variables anual y por diferentes meses
DAI	PSDI	SPI	Anual
DAI1	PSDI1	SPI1	De marzo y abril
DAI2	PSDI2	SPI2	De abril y mayo
DAI3	PSDI3	SPI3	De marzo, abril y mayo
DAI4	PSDI4	SPI4	De enero a mayo

Dónde: DAI=índice de sequía por área; PSDI= índice de sequía de Palmer; SP=índice estandarizado de precipitación, los números indican el promedio de los meses que se mencionan en la última columna.

El Índice estandarizado de precipitación (SPI), también conocido como Índice Normalizado de Precipitación, debido a su sencillez y facilidad de cálculo es ampliamente utilizado en más de 70 países, fue creado por McKee en el año de 1993. Su sencillez radica en que solamente se requiere datos de la precipitación para su cálculo, sin embargo, estos deben ser de un período mínimo de 20 a 30 años, los cuales se pueden obtener del Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA, 2017). Así mismo, los datos ya compilados pueden trabajarse por diferentes períodos de cálculo, que pueden ser de 1 mes a 24 meses, en este trabajo se utilizaron los datos de 1 mes, los cuales se procesaron por estado y por mes (Cuadro 3).

La información se procesó por cada estado y mes del período que se tiene de incendios, a través de una malla de cada 10 km (cuadrícula) que cubre toda la República Mexicana. De esta forma se obtuvieron promedios de las intersecciones de la malla que caen cada uno de los estados. Los datos totales se procesaron con el paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System), el cual es utilizado ampliamente y de forma confiable para obtener los estadísticos de cualquier tipo de análisis. En este trabajo se realizaron regresiones para cada una de las variables para obtener coeficientes de regresión de modelos individuales, se probaron diferentes modelos y transformaciones de las variables, las cuales incluyeron modelos lineales y no lineales.

Resultados y discusión

Influencia de las variables climáticas a nivel nacional

Relación número de incendios con la superficie afectada.

Existe una tendencia positiva, que implica, a mayor número de incendios la superficie afectada también es mayor. Específicamente los datos muestran que el número de incendios fue entre 5,000 y 11,000, los cuales han quemado superficies menores de 400,000 ha anuales. Lo anterior indica que cuando la cantidad de incendios son menores a 11,000 anuales pueden ser manejables, por los recursos humanos y técnicos que pudieran estar disponibles, pero cuando el número es mayor a 12,000 incendios, según los datos observados la superficie ya no es manejable con los recursos técnicos y humanos disponibles. En estos últimos es difícil llegar a un control, y la superficie afectada llega a ser del doble del máximo de un año regular, llegando a afectar hasta 956,421.28 ha, como sucedió en el año 2011 (Cuadro 4, Figura 1). Lo importante es conocer que variables son las que están influyendo para que se presenten estas diferencias. Se sabe que el año 2011 cuando se presentó una gran superficie afectada se tuvo también un año anormalmente seco, lo cual indica que las variables climáticas pueden tener una influencia directa en la presencia de incendios.

Cuadro 4. Superficie afectada (ha) y número de incendio anuales por año, del período 2005 al 2014.

Año	Superficie	Número
2005	314,124	9,707
2006	243,746	8,741
2007	141,566	5,894
2008	228,517	9,726
2009	296,340	11,119
2010	114,714	6,099
2011	956,421	12,112
2012	347,226	7,170
2013	413,216	10,406
2014	155,530	5,325

La correlación lineal presente entre el número de incendios y la superficie quemada muestra una buena R^2 con un valor de 0.51 (Figura 1), relación que está muy influenciada por la presencia de los incendios presentes en el año de 2011. Por lo que, para tener una relación más aceptable, sería interesante obtener datos de cuando se presentaron otros incendios de gran magnitud en el país. Se presentaron incendios menores a las 200,000 ha en tres temporadas de incendios, otras tres temporadas estuvieron incendios que afectaron 200,000 y 300,000 ha anuales, dos más entre 300,000 y 400,000 ha y uno que sobrepasa un ligeramente las 400,000 ha.

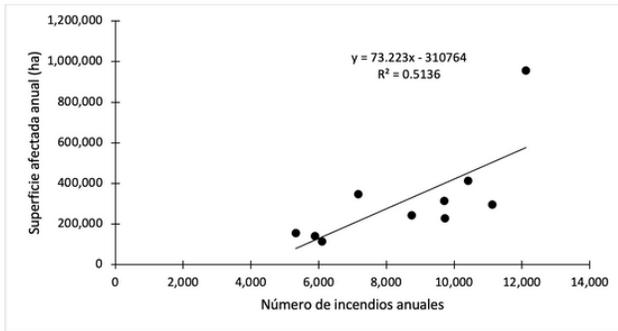


Figura 1. Tendencia de la relación entre número de incendios y superficie afectada anualmente durante el período 2005 al 2014.

Influencia de la precipitación con la superficie incendiada.

Los análisis de regresión lineal muestran que la precipitación si tuvo gran influencia en la superficie afectada anualmente por los incendios. Donde el mejor resultado se presentó con la variable PRE2 (R²= 0.7028), que incluye la suma de la precipitación de los meses de abril y mayo, seguida de la variable PRE3 (R²= 0.6287), que incluye la suma de las precipitaciones de marzo, abril y mayo, (Cuadro 5, Figura 2). La suma total de la precipitación anual no tuvo influencia predictiva debido a que los períodos de sequía son más predecibles que los lluviosos.

Cuadro 5. Resultados de la regresión de diferentes variables de la precipitación y superficie incendiada.

Variable	R ²	RCME	Pr > F	Significancia
PRE	0.2998	215431	0.1014	No
PRE1	0.1665	235041	0.2417	No
PRE2	0.7028	140357	0.0024	*****
PRE3	0.6287	156867	0.0062	*****
PRE4	0.458	189540	0.0316	**

** significativo *****muy significativo

La relación entre la lluvia y el número de incendios es inversamente proporcional, indicando que a menor lluvia se tiene mayor presencia de incendios. Cuando la suma de la precipitación de abril y mayo es mayor de 75 mm, los incendios se mantienen menores a las 155,529.5 ha anuales, mientras que para períodos de lluvia comprendidos entre los 49.3 y 61.5 mm los incendios sobrepasan ligeramente las 400,000 ha anuales. Más aún, cuando la precipitación es menor de 30 mm, los incendios pueden llegar a ser catastróficos debido al período de sequía tan grande (Figura 2).

Influencia de la temperatura con la superficie incendiada. Se analizaron datos de temperatura para relacionarla con la superficie incendiada, como las temperaturas medias, mínimas y máximas anuales y mensuales. Las temperaturas medias y mínimas con todas sus variantes no tuvieron relación alguna con la presencia de incendios.

La temperatura media anual es un valor muy general, que no varía mucho año con año, por eso mismo no tuvo influencia en el índice de peligro desarrollado por la CONAFOR (Flores *et al.*, 2017). De igual forma, las temperaturas mínimas no tienen tampoco ninguna relación con los incendios, debido a que están más relacionadas con el frío, o la presencia de lluvias. Por el contrario, las temperaturas máximas si tuvieron influencia con la incidencia de incendios.

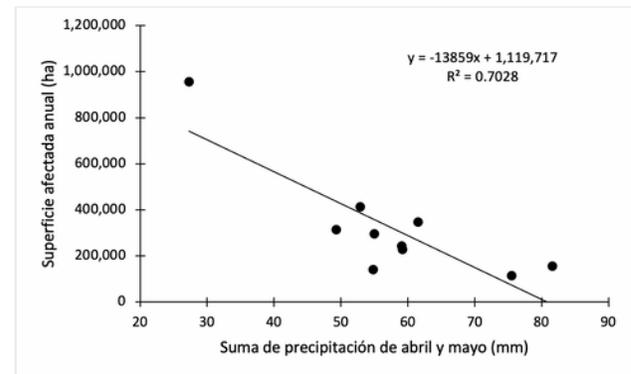


Figura 2. Tendencia de la relación entre la precipitación de abril y mayo (PRE2) y la superficie afectada anualmente durante el período 2005 al 2014.

Las regresiones realizadas a los datos indican que el mejor resultado se presentó con la variable TMX2 (R²= 0.7643), que indica el promedio de la temperatura máxima de los meses de abril y mayo, seguida de la variable TMX3 (R²= 0.6357), que indica el promedio de temperaturas máximas de marzo, abril y mayo (Cuadro 6, Figura 3). Las otras variables de temperatura máxima promedio anual y las TMX3 y TMX4 no tuvieron gran influencia y fueron también menos significativas.

Cuadro 5. Resultados de la regresión de diferentes variables de la precipitación y superficie incendiada.

Variable	R ²	RCME	Pr > F	Significancia
TMX	0.4376	193073	0.0372	**
TMX1	0.3854	201837	0.0555	**
TMX2	0.7643	124985	0.0009	*****
TMX3	0.6357	155398	0.0057	*****
TMX4	0.2056	229461	0.1881	No

** significativo *****muy significativo *****altamente significativo

La temperatura máxima tiene una influencia directa con la presencia de incendios y la superficie afectada anualmente, mostrando que mientras mayor es la temperatura máxima, mayor es la superficie incendiada. La Figura 3, muestra que la influencia de medio grado de temperatura o un grado de la misma puede ser muy significativa. De esta forma, temperaturas máximas menores de 31.5 °C, durante abril y mayo, quemaron superficies menores anuales de 155,000 ha, y

temperaturas entre 31.8 y 31.2 °C quemaron superficies entre 200,000 y 400,000 ha. Pero un aumento de 0.8 °C en la temperatura, alrededor de 33 °C, resulto en incendios catastróficos, alcanzando una superficie afectada de 956,421 ha.

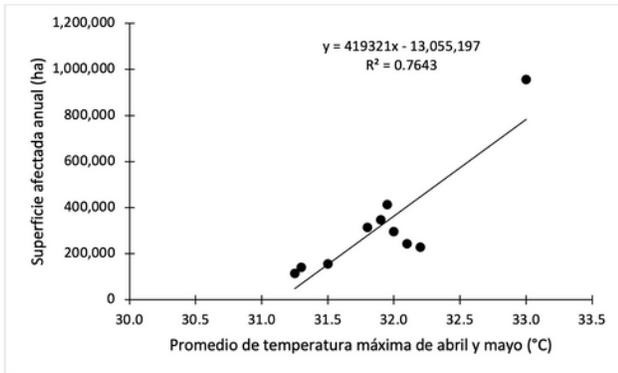


Figura 3. Tendencia de la relación entre el promedio de la temperatura máxima de abril y mayo (PRE2) y la superficie afectada anualmente durante el período 2005 al 2014.

Influencia de la humedad relativa con la superficie incendiada.

Las humedades relativas medias y mínimas, con todas sus variantes, no tuvieron ninguna influencia en la presencia de incendios, debido principalmente a que se considera que son muy variables durante el día y la noche. No obstante, la humedad relativa máxima si tuvo una leve influencia mensual. Finalmente, la única variable de humedad relativa que fue significativa fue el promedio de humedad relativa de los meses de enero a mayo (HRMX4), con una R² de 0.44 (Cuadro 7). A pesar de que esta correlación no fue tan alta como las variables anteriores, si muestra que existe una ligera influencia.

Cuadro 7. Resultados de la regresión de diferentes variables de humedad relativa máxima promedio con la superficie incendiada.

Variable	R ²	RCME	Pr > F	Significancia
HRMX	0.2395	224514	0.1511	No
HRMX1	0.2829	218018	0.1136	No
HRMX2	0.2307	225807	0.16	No
HRMX3	0.3518	207275	0.0707	No
HRMX4	0.4442	191942	0.0353	**

** significativo

En general, la tendencia es que la humedad relativa máxima tiene una relación inversa con la superficie afectada anualmente, mostrando que mientras menor es la humedad relativa, mayor es la superficie incendiada (Figura 4). Aunque la variabilidad entre los valores de 78.8 % y 79.9 % de humedad relativa, es muy alta, abarcando un rango de superficie afectada entre 155,000 y 956,000 ha. No obstante, cuando los valores de humedad relativa son mayores al 87.5%, la tendencia con la superficie incendiada es que esta se mantendrá por debajo de las 200,000 ha.

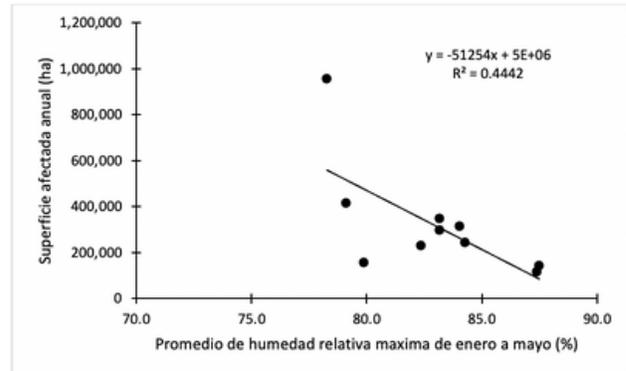


Figura 4. Tendencia de la relación entre el promedio de la humedad relativa de enero a mayo (HRMX4) y la superficie afectada anualmente durante el período 2005 al 2014.

Influencia del viento con la superficie incendiada.

Se analizaron las variables de viento medio, viento mínimo promedio y viento máximo promedio, pero con ninguno de ellos se tuvo influencia con la superficie incendiada, ya que ningún resultado fue significativo, mostrando que las R² fueran muy bajas. Se considera que el viento no tuvo influencia debido a que: a) es muy variable durante el día y durante los días; y b) el viento que se estimación corresponde al que se presentan a 10 metros sobre la superficie. Sin embargo, la presencia de vientos durante la ocurrencia de los incendios es muy importante para establecer su control o su propagación.

Influencia del índice de sequía por área con la superficie incendiada.

El índice de sequía por área fue una variable no tan significativa, pero que si mostró una tendencia de que a valores mayores de sequía se tiene superficies mayores afectadas. La variable que presentó los mejores resultados fue el promedio de la sequía anual, mientras que las otras variables parciales de la sequía, por los diferentes meses, no fueron significativas (Cuadro 8).

Cuadro 8. Resultados de la regresión de diferentes variables del índice de sequía por área promedio, con la superficie incendiada.

Variable	R ²	RCME	Pr > F	Significancia
DAI	0.6194	176957	0.0205	**
DAI1	0.3562	230165	0.1183	No
DAI2	0.4394	214772	0.0732	No
DAI3	0.4051	221246	0.0897	No
DAI4	0.4066	220970	0.089	No

** significativo

En la Figura 5 se muestra que la variable del índice de sequía anual explica un 62% de la variabilidad observada en la superficie afectada por los incendios. El grafico indica que a mayor sequía se tiene mayor presencia de incendios, donde valores menores de 0.6 del DAI indican que los incendios no sobrepasan los 400,000. Pero cuando

el índice alcanza valores mayores de 0.7 y cercanos a 0.8, los incendios se presentan al doble de una época promedio.

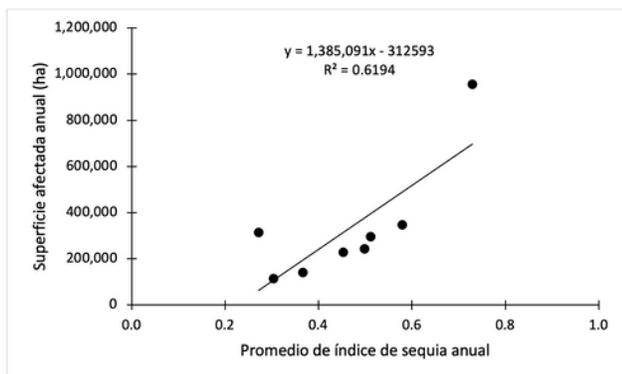


Figura 5. Tendencia de la relación entre el promedio del índice de sequía anual (DAI) y la superficie afectada anualmente durante el periodo 2005 al 2014.

Influencia del índice normalizado de precipitación con la superficie incendiada. El índice de precipitación muestra que presenta buen ajuste a los datos, donde el mejor resultado se obtuvo con el índice promedio de los meses de abril y mayo (PSI2), en el cual la R² fue alta de 0.79 y alto nivel de significancia (Cuadro 9).

Cuadro 9. Resultados de la regresión de diferentes variables del índice de sequía por área promedio, con la superficie incendiada.

Variable	R ²	RCME	Pr > F	Significancia
PSI	0.5515	172426	0.0139	**
PSI1	0.3685	204590	0.0627	**
PSI2	0.7855	119240	0.0006	*****
PSI3	0.648	152755	0.005	*****
PSI4	0.5209	178199	0.0184	**

** significativo *****muy significativo *****altamente significativo

La tendencia de la regresión mostrada en la Figura 6, indica que el índice de precipitación está muy relacionado con la presencia de incendios. Cuando el índice de precipitación es mayor por lo tanto se tiene presencia mayor presencia de humedad y menor presencia de incendios, los índices mayores de cero o muy cercanos a él sugieren que los incendios serán anualmente menores a las 400,000 ha afectadas. Mientras que los valores mayores de 0.3 indican que la superficie afectada será menor, o cercana, a las 200,000 ha. Por el contrario, valores negativos y muy cercanos al -0.3, que indican sequía severa, muestran que los incendios serán muy severos y afectarán extensas superficies.

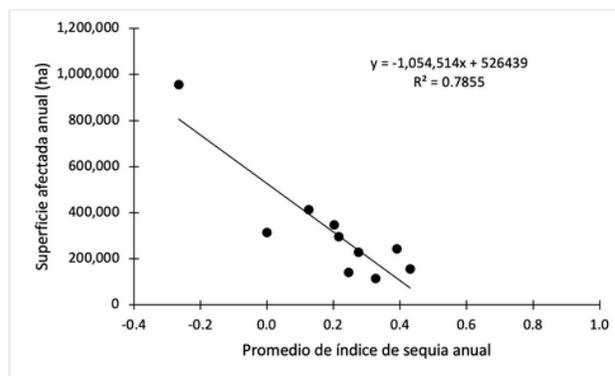


Figura 6. Tendencia de la relación entre el promedio del índice normalizado de precipitación de abril y mayo (SPI2) y la superficie afectada anualmente durante el periodo 2005 al 2014.

Conclusiones

Los incendios catastróficos (de gran magnitud) están relacionados con altas temperatura y bajas precipitaciones, así como valores de sequía (DAI y SPI). Por lo cual, se observaron valores críticos tanto para precipitación, como para la temperatura. En cuanto a la precipitación, esta tuvo una gran influencia en la superficie incendiada, mostrando que la suma de los meses de abril y mayo fue la que presentó mejores relaciones. Los valores críticos mínimos se logran cuando la precipitación es menor de 30 mm para ambos meses (abril y junio), ya que en ese año (2011) se presentó la superficie afectada más alta en el periodo de 10 años. Referente a la temperatura promedio, también tuvo una gran influencia en el tamaño de la superficie incendiada, donde al igual que la precipitación, la temperatura promedio de los meses de abril y mayo fue la que tuvo una alta correlación. La temperatura crítica, para ambos meses, en la que se presentan incendios catastróficos fue de 33 °C, aunque cuando se observan temperaturas mayores a 32.5 °C pueden presentarse grandes superficies incendiadas.

En cuanto a la humedad relativa máxima, esta tuvo una influencia moderada en la presencia de incendios catastróficos, aunque la correlación fue significativa, no obstante, la relación no es clara para poder predecir los incendios forestales. Sin embargo, la variable de humedad relativa que tuvo la mejor influencia fue el promedio de los meses de enero a mayo. Por otra parte, el viento no tuvo ninguna influencia en la presencia de incendios a nivel anual, pero se sabe que es uno de los principales factores para definir la ocurrencia y el comportamiento de los incendios.

El índice de sequía por área si tuvo influencia en la presencia de incendios de gran magnitud, donde el valor crítico se observa cuando se tienen valores mayores de 0.7, que corresponde al año en el que se presentaron los

incendios extraordinarios. Otro indicador indirecto de la sequía es el índice normalizado de la precipitación, el cual tuvo una alta influencia en la presencia de incendios, donde los valores críticos encontrados en este estudio fueron aquellos menores de cero y que se encuentran entre -0.2 y -0.3.

De acuerdo con lo anterior, para futuros trabajos se sugiere, para hacer estimaciones de la ocurrencia y magnitud de incendios forestales, analizar los datos de clima de forma integrada, así como trabajar los datos en relación a las diferentes regiones climáticas del país.

Agradecimientos

Se agradece al fondo forestal CONAFOR-CONACYT, con el proyecto número CONAFOR-2014-C02-251415, por haber financiado esta investigación.

Literatura citada

- Ayala, F. y Olcina, J. (2002). *Riesgos Naturales*. Ariel Ciencia. España.
- Benavides, J., Flores G. J. G., Torres M. O. (2018). *Incendios Forestales en México durante el quinquenio 2005-2009 caracterizado por presentar leves cambios en la climatología nacional*. INIFAP, CIRPAC, Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Guadalajara, Jalisco.
- Benavides, J., Flores, J. y Torres, O. (2018). *Incendios Forestales en México durante el quinquenio 2010-2014 caracterizado por presentar incendios catastróficos*. INIFAP, CIRPAC, Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Guadalajara, Jalisco.
- Bounazountas, M., Kallidromitou, D., Kassomenos, P y Passas, N. (2007). A decision support system for managing forest fire casualties. *J. Environ. Manage.* 84, 412-418.
- Bravo, A., Salinas, H. y Rumayor, A. (Comp). (2006). *Sequía: Vulnerabilidad, impacto y tecnología para afrontarla en el Norte Centro de México*. (2da Ed.). INIFAP. México, D.F.
- Carrillo, R., Rodríguez, D., Tchikoué, H., Monterroso, A. y Santillán, J. (2012). Análisis de peligro espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México. *Interciencia* 37(9): 678-683.
- CONAFOR. (2012). *Temporada de incendios 2012, alerta ante sequía*. <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/component/content/article/6/356>
- CONAGUA. (2017). *Información de temperaturas y precipitaciones mensuales*. <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>.
- Del Campo, Á. y Bernal, F. (2010). Incendios de cobertura vegetal y biodiversidad: una mirada a los impactos y efectos ecológicos potenciales sobre la diversidad vegetal. *El hombre y la máquina*, 35, 67-81.
- Dentoni, M. y Muñoz, M. (2012). *Sistemas de Evaluación de Peligro de Incendios*. (Informe No. 1). Esquel, Chubut, Argentina.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M. et al. Zamora, R. (2010). Development of a framework for fire risk assessment using remote geographic information system technologies. *Ecol. Model*, 221, 46-58.
- Drury, S. y Velben, T. (2008). Spatial and temporal variability in the fire occurrence within the Las Bayas Forestry Reserve, Durango, Mexico. *Plant Ecol*, 197, 299-316.
- Estrada, O. (2006). Sistema Nacional de Protección contra los Incendios Forestales. En *Incendios Forestales*. Eds. J. G. Flores G., D. A. Rodríguez T., O. Estrada M. y F. Sánchez Z. CONAFOR y Mundi Prensa. Zapopan, Jalisco. pp 185-213.
- Flores, G.(Coord.). (2009). *Impacto ambiental de incendios forestales*. Mundi Prensa. China.
- Flores, G. y Rodriguez, D. (Coords.). (2006). *Incendios forestales*. CONAFOR, Mundi Prensa. Zapopan, Jalisco.
- Flores, G., Benavides, J., Leal, H., Vega, G., Valdez, C., Casillas, U.D. (2016). *Descripción de Variables de Peligro de Incendios Forestales en México*. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México.
- Flores, G., Benavides, J., Casillas, A., Garcia, M., Leal, A., Gallegos, H. y Hernandez, E. (2017). *Cartografía temática para determinar áreas prioritarias contra incendios forestales en Jalisco*. INIFAP-CIRPAC. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. México.
- Julio, G. (2000). *Curso de manejo del fuego. Diagnóstico del manejo del fuego en Jalisco*. Programa de desarrollo forestal del estado de Jalisco.
- Julio, G. y Giroz, G. (1975). Notas sobre el comportamiento del fuego y su aplicación en el control de incendios forestales. *Bosque*, 1(1), 18-27.
- NASA. 2017. *Datos meteorológicos* <https://power.larc.nasa.gov/cgi-bin/agro.cgi?&p=&email=agroclim40larc.nasa.gov>
- Orozco, M., Mireles, P., Valdez, M. y Peña, V. (2011). Incendios forestales y degradación de los ecosistemas terrestres: impactos locales y emisiones globales. Exploración de la situación en el Estado de México. *Revista Geográfica de América Central* número especial, 2(47E), 1-21.
- Palmer, W. (1965). *Meteorological drought*. Department of Commerce Weather Bureau, Washington DC.
- Pedernera, P. y Castillo, M.S. (2003). *Vigencia del Índice de Riesgo de Incendios Forestales*. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Santiago, Chile.
- Pérez-Verdín, G., Márquez-Linares, M., Cortés-Ortiz, A. y Salmerón, M. (2013). Análisis espacio-temporal de la ocurrencia de incendios forestales en Durango, México. *Madera y Bosques*, 19(2), 37-58.
- Pyne, S., Andrews, P. y Laven, R. (1996). *Introduction to Wildland Fire*. (2da Ed.). John Eiley & Sons INC. New York.
- Rodríguez, D., Ramírez, H., Tchikoué, H. y Santillán, J. (2008). Factores que inciden en la siniestralidad de incendios forestales. *Revista Ciencia Forestal en México*, 33(104), 37-58.

- Rodríguez, D. y Fulé, P. (2003). Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire*, 12, 23-37.
- Rodríguez, D., Rodríguez, M. y Fernández, S. (2002). *Educación e Incendios Forestales*. Mundi Prensa. Mexico.
- Rodríguez, D. (2014). *Incendios de Vegetación, su ecología manejo e historia*. Biblioteca Básica de Agricultura. México.
- Rodríguez, D. (2015). *Incendios de Vegetación, su ecología manejo e historia*. Biblioteca Básica de Agricultura. México.
- Rojo-Martínez, E., Santillán-Pérez, J., Ramírez-Maldonado, H. y Arteaga-Martínez, B. (2001). Propuesta para determinar índices de peligro de incendio forestal en bosque de clima templado en México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7(1), 39-48.
- Soares, J., Viana, R., Batista, A. (2007). *Ajuste de la Fórmula de Monte Alegre Modificada (FMA+) para evaluar el riesgo de incendios forestales en el Estado de Paraná, Brasil*. Trabajo presentado en el 4th International Wildland Fire Conference. Sevilla, España.
- Soares, R. (1972). *Determinacao de un indice de perigo de incendio para a regio centro paranaense*. Brasil. Tese de grau de Magister Scential. Turrialba, IICA.
- Sonne, E. (2006). Greenhouse gas emissions from forestry operations: a life cycle assessment. *Journal of Environmental Quality*, 35, 1439–1450.
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, J. N., Griffin, D., Cook, B. I., Acuña, R., Torbenson, M. C. A., Szejner, P. y Howard, I. M. (2016). Atlas de sequía de México: Reconstrucciones de anillos de árboles del balance de humedad del suelo durante las eras prehispánica tardía, colonial y moderna. *Quaternary Science Reviews*, 149, 34-60. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.06.018>
- Tchikoue, M. H., Cíntora, G. C., Rodríguez, T. D. A. y Santillán, P. J. (2004). *Evaluación del Programa Nacional de Prevención y Combate de Incendios Forestales, Ejercicio Fiscal 2003. Informe Final*. Universidad Autónoma Chapingo, SEMARNAT, CONAFOR.
- Universidad de Memphis. (2007). <http://drought.memphis.edu/MXDA/Default.aspx>
- Valiente, O. M. (2001). Sequía: Definiciones, tipología y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, (26), 59-80.
- Vélez, R. M. (1968). El índice de peligro de incendios forestales. *Montes*, 143, 419-447.
- Zamora, P., Ramos, M., Domínguez, I., Hernández, F. y Sotolongo, R. (2006). Propuesta de un índice meteorológico diario de peligro para elevar la eficacia de la prevención y extinción de los incendios forestales en Santa Clara, Villa Clara, Cuba. *Revista Forestal Baracoa*, 25(2), 25-33.