

APLICACIÓN DEL ÍNDICE METEOROLÓGICO DE INCENDIOS CANADIENSE EN UN PARQUE NACIONAL DEL CENTRO DE MÉXICO

APPLICATION OF THE CANADIAN FIRE WEATHER INDEX IN A NATIONAL PARK OF CENTRAL MEXICO

Lourdes Villers-Ruiz ¹, Emilio Chuvieco ² e Inmaculada Aguado ²

RESUMEN

Entre los sistemas de alerta temprana de incendios forestales destaca el desarrollado por el Servicio Forestal de Canadá, denominado *Fire Weather Index* (FWI). Con el fin de contribuir a la creación de un sistema de alerta temprana, se utilizó este índice para determinar las condiciones de peligro a incendios en el Parque Nacional Malinche a partir de una serie de datos diarios de enero 2004 a octubre 2009 de cinco estaciones meteorológicas automáticas instaladas en el parque a una altitud de 3,000 m, se hicieron los cálculos de los elementos que contiene el índice; para ello, se empleó la versión automatizada del *Canadian Forest Fire Danger Rating System*. Se realizaron correlaciones y se crearon cuatro categorías con los valores de los componentes, según la frecuencia de incendios y el área siniestrada. También, se señalaron, los valores de temperatura máxima y mínima, humedad relativa y lluvia por categoría. Se constituyeron los umbrales mínimos de gran peligrosidad a incendios para cada uno de los elementos. En el caso del código de humedad de los combustibles finos, el umbral se estableció en 80 puntos; de superarse este valor, el número de incendios por día se incrementa sustancialmente. El código de sequía, el Índice de dispersión inicial del fuego; así como, el Índice acumulado fueron los más significativos en relación a la frecuencia de incendios, por lo que se calculó la probabilidad de estos eventos, para ciertos intervalos de los elementos considerados.

Palabras clave: Alerta temprana de incendios, áreas naturales protegidas, códigos de humedad de combustibles, FWI, índice potencial de fuego, prevención de incendios forestales.

ABSTRACT

Among the early warning systems there is one developed by the Canadian Forest Service, called the Fire Weather Index (FWI). To contribute in the creation of an early warning system this index was used to determine the fire danger conditions in Malinche National Park. Calculations of the elements contained in the FWI system were made using the automated version of the Canadian Forest Fire Danger Rating System applied to a series of daily data from January 2004 to October 2009 in five weather stations installed in the park at an altitude of 3,000 m. Four categories were created with the values of the correlation components according to fire frequency and damaged area. Maximum and minimum temperature, relative humidity and rain were identified. Minimum high fire danger thresholds were set for each one of the elements. In the case of Fine Fuel Moisture Code the maximum threshold was set at 80 points, if this value is exceeded the number of fires per day substantially increased. The Drought Code, the Initial Spread Index and Buildup Index, were most significant in relation to fire frequency. The probability of fires was calculated according to certain ranges of values of these components.

Key words: Early warning fires; natural protected areas, fuels moisture codes, FWI, fire potential index, forest fire prevention.

Fecha de recepción: 5 de octubre de 2011

Fecha de aceptación: 28 de mayo de 2012

¹ Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Correo-e: villers@unam.mx

² Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares.

INTRODUCCIÓN

En México, la mayoría de los incendios afectan pastizales y arbustos, excepto cuando suceden fenómenos climáticos extremos (CONAFOR, 2011), y su temporalidad está muy bien acotada. Los estados del norte del país son los que reúnen mayor superficie siniestrada, pero los del centro, con una densidad de población más alta, muestran mayor frecuencia (Villers-Ruiz y Hernández-Lozano, 2007). Las actividades humanas ocasionan 99% de los incendios forestales; casi la mitad de ellos se producen por negligencia en las quemas agropecuarias no controladas en áreas colindantes con los bosques. El resto son quemas premeditadas por problemas sobre los derechos de la tierra, o bien debido a prácticas de cazadores furtivos y descuidos por fogatas mal apagadas (CONAFOR, 2010).

En general, los incendios se clasifican en superficiales, de copa y subterráneos, en México 90% corresponden al primer tipo (Cedeño, 1999). En grandes áreas del país ocurren durante el invierno y la primavera de cada año, es decir, en los meses secos de noviembre a abril (García, 2010) y se concentran, principalmente, hacia finales de este periodo: entre febrero y abril. Se han realizado estudios sobre la frecuencia de incendios y la cantidad de lluvia cuando estos se presentan, y se ha comprobado que existe una relación inversa entre su número y la precipitación acumulada durante 15 días antes del siniestro (Villers-Ruiz, 2004).

En México, durante 1998, se perdieron 849,632 ha en 14,445 incendios; a partir de entonces se promovieron campañas de prevención y supresión de incendios que permitieron mantener estable los daños durante los siguientes doce años (1999-2010). No obstante, se registraron anualmente 7,952 conflagraciones que dañaron un promedio de 27 ha por incendio, por lo que cada año se impactan por estos siniestros alrededor de 216,000 ha cubiertas, principalmente, con bosques, pastizales y matorrales (CONAFOR, 2011).

Los sistemas de alerta temprana de incendios forestales surgieron con el fin de identificar los periodos críticos de peligro extremo, para prevenir y mitigar sus efectos más negativos. Están fundamentados en la aplicación de un índice de peligro, que es un instrumento de predicción que cuantifica el riesgo del evento con base en una serie de parámetros siempre presentes, como son las condiciones meteorológicas y de otros parámetros cambiantes que se miden o estiman periódicamente, como la humedad de los combustibles. Entre los índices disponibles, el desarrollado por el servicio forestal canadiense, denominado *Fire Weather Index* (FWI), por sus siglas en inglés es quizá el más utilizado en el ámbito internacional, debido a la fácil obtención de las variables necesarias para su aplicación y a los estudios que se han realizado para su validación y calibración sobre grandes áreas (Wotton, 2009). En Europa el FWI se ha utilizado particularmente en Portugal

INTRODUCTION

In México, most fires affect grasslands and shrubs, except when extreme climate events occur (CONAFOR, 2011), and its timing is very well defined. The northern states of the country gather a larger damaged area, but those at the center, with a higher population density, are more frequent (Villers-Ruiz and Hernández-Lozano, 2007). Human activities provoke 99% of forest fires; almost half of them result from negligence involved in agriculture and game labors where burnings are made without control on neighboring areas with forests. The rest are deliberate burnings related to problems about landownership, or well, from practices of illegal hunting and careless camp fires (CONAFOR, 2010).

In general terms, forest fires are classified as surface, crown and (under) ground, in México 90% are of the first type (Cedeño, 1999). In extended areas of the country, they take place during winter and spring of each year, that is, during the dry months from November to April (García, 2010) and they concentrate, mainly, at the end of such period: between February and April. Studies have been made about the frequency of fires and the amount of rain that is present when they occur; it has been proved that there is an inverse relationship between their number and the accumulated rainfall 15 days before the event (Villers-Ruiz, 2004).

During 1998, 849,632 ha were lost in 14,445 fires in Mexico; from then on, prevention and suppression campaigns favored to keep damages stable during the next 12 years (1999-2010). Nevertheless, 7,952 events per year were registered, which affected an average of 27 ha per fire, which produce an impact over 216,000 ha covered, mostly, by forests, grasslands and shrublands (CONAFOR, 2011).

The early warning systems of forest fires emerged with the aim of predicting the critical periods of extreme danger, in order to prevent and mitigate their most negative effects. They are based upon the application of a danger index, which is a prediction instrument that quantifies the risk of the event based on a series of parameters that always exist, such as the meteorological conditions as well as other changing parameters that are periodically measured or estimated such as fuel moisture. Among the available indexes, the *Fire Weather Index* (FWI) which was formulated by the Canadian Forest Service, is, probably, the most regularly used worldwide, since it makes it easy to obtain the variables that are necessary for its application and to the studies that have been made to prove it and adjust it for large territories (Wotton, 2009). In Europe, FWI has been used in Portugal in particular (Carvalho *et al.*, 2008; Viegas *et al.*, 2006), and, at present, is calculated in an operational way in the framework of the European Forest Fire Information System (EFFIS), a program that is developed at the Joint Research Centre (JRC, 2010);

(Carvalho et al., 2008; Viegas et al., 2006), y en la actualidad se calcula de manera operativa en el marco del programa *European Forest Fire Information System* (EFFIS, por sus siglas en inglés) que se desarrolla en el *Joint Research Centre* (JRC, 2010; Camia et al. 2006). También se ha empleado en Indonesia y Malasia (de Groot et al. 2007); en la república mexicana, el servicio forestal de Canadá ha producido algunos mapas a escala nacional (Carr, 2010).

El FWI consta de seis componentes relacionados de manera jerárquica, tres de ellos primarios que aportan información sobre la humedad de los combustibles (Figura 1): el Código de Humedad de Combustibles Finos (*Fine Fuel Moisture Code*, FPMC por sus siglas en inglés), orientado a la hojarasca y los combustibles más finos; el Código de Humedad del Mantillo (*Duff Moisture Code*, DMC por sus siglas en inglés) estima la humedad de la materia orgánica en los primeros 7 cm de suelo y el Código de Sequía ó DC (*Drought Code*, DC por sus siglas en inglés), que representa la humedad en la capa profunda de la materia orgánica, a los 18 cm de profundidad (Wotton, 2009). La importancia de estos componentes radica en la relación que se establece entre la intensidad que presentan los fuegos superficiales y el grado de humedad o sequía, definidos entre dos a tres días para el primer código, de 15 días para el segundo y hasta de 53 días para el tercero (Stephen, 2001).

Los tres códigos de humedad descritos se ligán entre sí o bien con otros parámetros para integrar el segundo nivel jerárquico: los índices intermedios. El Índice de Dispersión Inicial del Fuego (*Initial Spread Index*, ISI por sus siglas en inglés) se construye con el Código de Humedad de Combustibles Finos (FFMC) combinado con la velocidad del viento. El Índice Acumulado (*Buildup Index*, BUI por sus siglas en inglés) resulta de la combinación de dos códigos de humedad el DMC y el DC, y simboliza el total de combustible disponible en un incendio; este índice se interpreta como el fuego residente en el suelo o como el tiempo que puede tomarse para extinguirlo (Wotton, 2009).

Por último, el FWI combina y sintetiza los índices y códigos anteriores; este índice representa la intensidad del frente de fuego como una tasa de energía emitida por unidad de longitud del frente de fuego. Los seis componentes fueron, originalmente, desarrollados y adaptados en relación a las observaciones del comportamiento del fuego en incendios experimentales a pequeña escala de combustibles de *Pinus banksiana* Lamb. (Van Wagner, 1987).

Puesto que los valores límite de los distintos componentes se ajustaron a un tipo de combustible estándar en Canadá, que correspondió a los bosques boreales y templados, es necesaria su calibración si se desea aplicar a otras áreas con características diferentes. El ajuste puede efectuarse a través del análisis de correlaciones empíricas de los componentes del

Camia et al. 2006). It has also been used in Indonesia and Malaysia (de Groot et al. 2007); in Mexico, the Canadian Forest Service has designed some maps in this regard at a national scale (Carr, 2010).

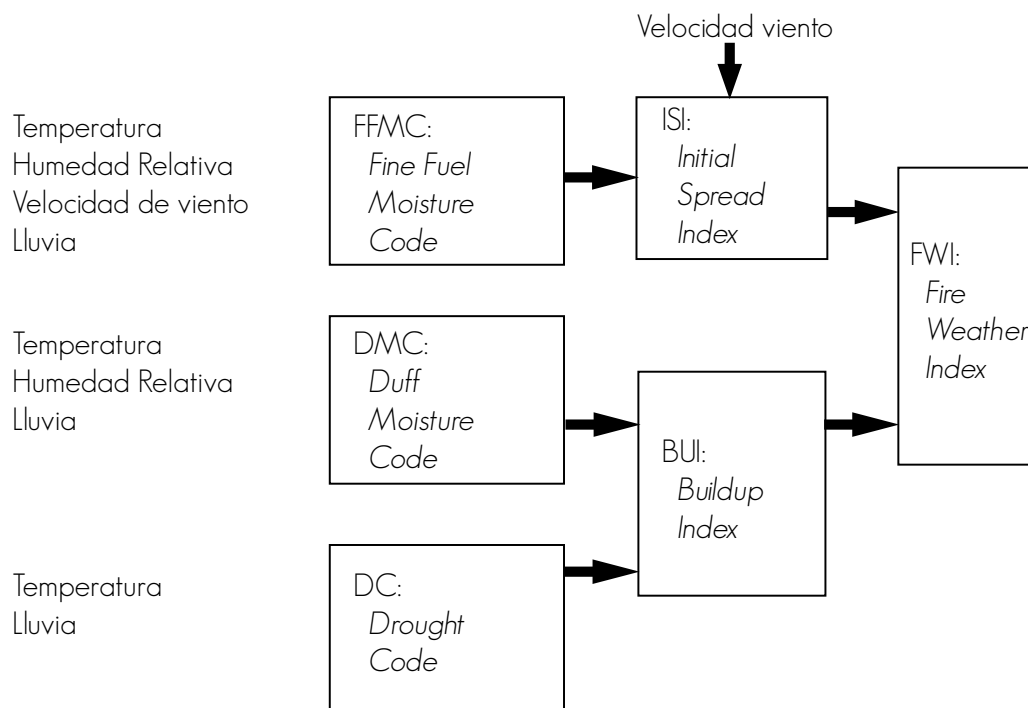
FWI has six components which are related in a hierarchical way, three of which are primary and report information about fuel moisture (Figure 1): the Fine Fuel Moisture Code (FFMC), which is aimed at litter and the finest fuel material; the Duff Moisture Code (DMC), which estimates the organic matter moisture from the first 7 cm of soil depth and the Drought Code (DC), that stands for the moisture of the deep layer of organic matter at a depth of 18 cm (Wotton, 2009). The importance of these components lies in the relationship between surface fires and the degree of moisture or drought, which are defined in a lapse of two to three days for the first code, 15 days for the second and up to 53 days for the third one (Stephen, 2001).

The three described moisture codes are linked among them or to other parameters as well, to integrate the second hierarchic level: the in-between indexes. The Initial Spread Index (ISI) is built with the Fine Fuel Moisture Code (FFMC) combined with wind speed. The Buildup Index (BUI) is the result of the combination of the two moisture codes DMC and DC, and symbolizes the available fuel in a fire; this index is understood as the resident fire on the ground or as the necessary time for its extinction (Wotton, 2009).

Finally, FWI combines and synthesizes the previous indexes and codes; this index represents the intensity of the fire front as an energy rate emitted by length unit of the fire front. The six components were, originally developed and adapted with respect to the observations of the behaviour of experimental fires at a low scale of *Pinus banksiana* Lamb. fuels (Van Wagner, 1987).

As the threshold values of the different components were fitted to a kind of standard fuel in Canada, that belonged to the boreal and temperate forests, it is necessary to adjust them if they will be used in other places with different characteristics. Adjustments might be made through empirical correlation analysis of the components of the system by statistics of fire occurrence and of burned area. While they were used in Canada, it was observed that fire occurrence was better related to the FFMC code and burned area with the ISI index.

Since FWI combines all the components in one single value, it became a good indicator for different types of fires; this is why the study of the six components still goes on, in particular to establish threshold and new classes or categories in which the different fires take place (Amiro et al., 2004; Carvalho et al., 2008; de Groot et al., 2007; Tian et al., 2011).



Fuente: Wotton, 2009.

Source: Wotton, 2009.

Figura 1. Estructura del sistema FWI canadiense.

Figure 1. Structure of the Canadian FWI system.

sistema con estadísticas de ocurrencia de incendios y de la superficie quemada. Durante su empleo en Canadá se observó que la ocurrencia de incendios estuvo mejor relacionada con el Código FFMC y el área quemada con el índice ISI.

Debido a que el FWI combina todos los componentes en un solo valor, resultó un buen indicador para distintos tipos de incendios; es por esta razón que se continúa sobre el estudio de los seis componentes, de manera particular para establecer umbrales y nuevas clases o categorías en las que se presentan los incendios (Amiro *et al.*, 2004; Carvalho *et al.*, 2008; de Groot *et al.*, 2007; Tian *et al.*, 2011).

Los objetivos de este experimento consistieron en aplicar el FWI y calibrar sus componentes con datos empíricos de los registros de incendios en el Parque Nacional Malinche, para proponer valores y categorías de este sistema como una posible herramienta para establecer alertas tempranas en áreas naturales protegidas del centro de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

EL Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT) es una cadena de volcanes la cual se ubica entre los 19 y 20° latitud N con dirección WNW-ESE, con más de 1,000 km de longitud y

The aims of this experiment consisted in the application of FWI and to adjust the components of the empirical data of the fire records of Malinche National Park in order to propose values and categories of this system as a possible tool to establish early warnings in natural protected areas of central Mexico.

MATERIALS AND METHODS

Study areas

The Transmexican Volcanic Belt (CVT, for its acronym in Spanish) is a chain of volcanoes that lies between 19 and 20° N with a WNW-ESE orientation, with more than 1,000 km long and 200 km wide (Figure 2). This chain includes some of the highest peaks of the country (between 2,000 and 5,000 m asl), 17 belong to Natural Protected Areas and most are National Parks, mainly, due as they hold an exceptional variety of plants and endemic animal species (Alcántara and Paniagua, 2007). All of them have a common geologic and biological origin, as well as equivalent bioclimatic levels.

Malinche National Park is part of CVT geologic province (Gómez-Tuena *et al.*, 2005); its volcanic structure has an almost perfect cone shape, with a diameter a little over 25 km and an altitude range from 2,300 to 4,461 m. Its geographic coordinates are 19° 06' 49" -19° 20' 13" N, and 97° 55' 32"

200 km de ancho (Figura 2). En esta cadena se localizan las cimas más altas del país (entre los 2,000 y los 5,000 m), 17 corresponden a Áreas Naturales Protegidas y la mayoría son Parques Nacionales debido a que, en general, ostentan una riqueza excepcional de algunos grupos de plantas y un alto número de especies de animales endémicos (Alcántara y Paniagua, 2007). Todas ellas presentan un origen geológico y biológico común, así como pisos bioclimáticos equivalentes.

-98° 10' 50" W, between the states of Puebla and Tlaxcala (Figure 2). Its total area is 46,095 ha and is surrounded by crops, livestock areas and extended housing such as Puebla and Tlaxcala cities, which make it more vulnerable to fire frequency (Wong-González and Villers-Ruiz, 2007).

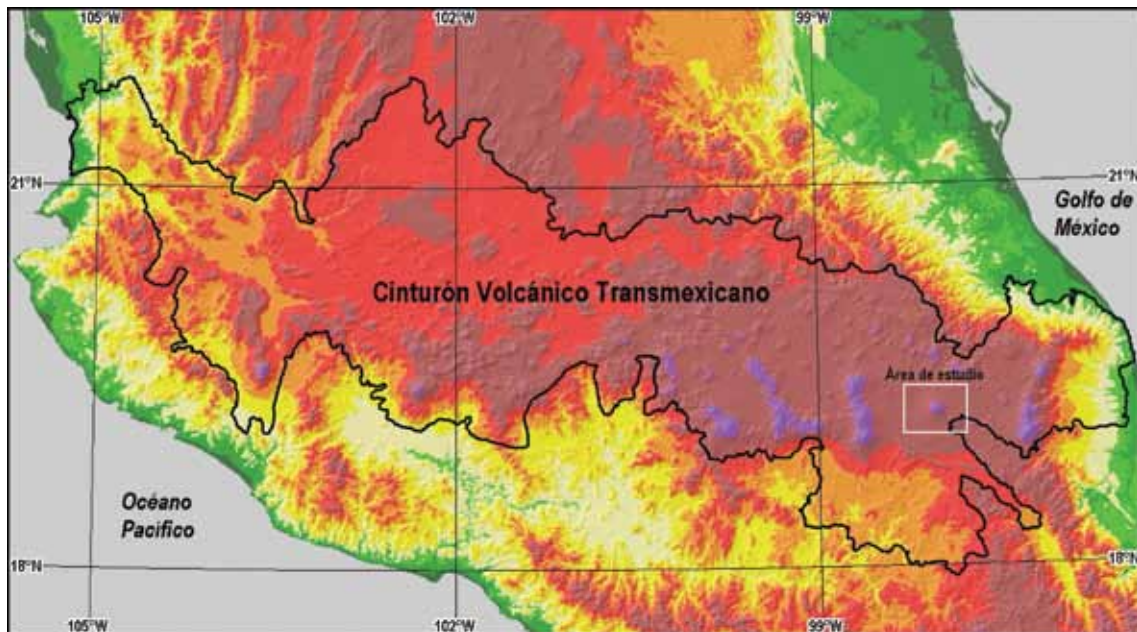


Figura 2. Localización del Parque Nacional Malinche en el Cinturón Volcánico Transmexicano.
Figure 2. Location of Malinche at the Transmexican Volcanic Belt.

El Parque Nacional Malinche es parte de la provincia geológica del CVT (Gómez-Tuena *et al.*, 2005); su estructura volcánica tiene la forma de un cono casi perfecto, abarca poco más de 25 km de diámetro y su intervalo altitudinal es de 2,300 a 4,461 m. Sus coordenadas geográficas 19° 06' 49" y 19° 20' 13" latitud norte y 97° 55' 32" y 98° 10' 50" longitud oeste, entre los estados de Puebla y Tlaxcala (Figura 2). Comprende una superficie total de 46,095 ha y está rodeado por áreas agrícolas, ganaderas y asentamientos humanos de gran importancia, como las ciudades de Puebla y Tlaxcala que lo hacen más vulnerable a la frecuencia de incendios (Wong-González y Villers-Ruiz, 2007).

En el parque se pueden observar diferentes tipos de bosques templados, los cuales siguen una distribución altitudinal (López-Domínguez y Acosta, 2005; Villers-Ruiz *et al.*, 2006):

- a) Bosques de encino (*Quercus rugosa* Née, *Q. crassipes* Humb. et. Bonpl., *Q. laurina* Bonpl., *Q. crassifolia* Humb. et. Bonpl. y *Q. dysophylla* Benth.); esta comunidad vegetal

Different types of temperate forests can be found at the Park in an altitudinal distribution (López-Domínguez and Acosta, 2005; Villers-Ruiz *et al.*, 2006):

- a) Oak forest (*Quercus rugosa* Née, *Q. crassipes* Humb. et. Bonpl., *Q. laurina* Bonpl., *Q. crassifolia* Humb. et. Bonpl. and *Q. dysophylla* Benth.); this vegetation community grows in a very limited range from 2,500 to 2,800 m and neighbors with agriculture land, which has covered most of their habitat.
- b) Pine forest (*Pinus montezumae* Lamb., *P. pseudostrobus* Lindl., *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. et Cham.), which grows between 2,800 and 3,600 masl; it is moderately tall (30 m) and dense, and in it coexists with *Quercus*, *Arbutus*, *Salix* and *Alnus* species, but in low frequency.
- c) Alder forest (*Alnus jorullensis* Kunth and *Arbutus xalapensis* Kunth), which grows between 3,150 and 3,500 masl and includes some pine and oak species.

se presenta de manera muy reducida entre 2,500 y 2,800 m, colinda con la agricultura de temporal, misma que ha cubierto una gran parte de su hábitat.

- b) Bosques de pino (*Pinus montezumae* Lamb., *P. pseudostrobus* Lindl., *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. et Cham.), se establece entre 2,800 y 3,600 msnm; es moderadamente alto (30 m) y denso, y en él coexisten, aunque con menos frecuencia, especies de *Quercus*, *Arbutus*, *Salix* y *Alnus*.
- c) Bosque de aile (*Alnus jorullensis* Kunth y *Arbutus xalapensis* Kunth). Se desarrolla entre 3,150 y 3,500 msnm, con presencia de algunas especies de pino y encino.
- d) Bosque de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.). Esta comunidad vegetal se restringe a un intervalo altitudinal de 2,800 hasta 3,800 m. Los árboles llegan a medir 40 m de alto.
- e) Bosque de pino de alta montaña (*Pinus hartwegii* Lindl.), se sitúa entre 3,400 y 4,000 msnm; es un bosque monoespecífico donde el estrato herbáceo es muy abundante. Es la principal especie que forma el límite de la vegetación arbórea.
- f) Zacatonal de alta montaña constituido, principalmente, por *Festuca tolucensis* Kunth, *Calamagrostis tolucensis* (Kunth) Trin. ex Steud., *Trisetum rosei* Scribn. et. Merr. y *Castilleja arvensis* Schltdl. et Cham., que forman macollos de hasta 1 m de altura. Se localiza entre 4,000 y los 4,300 msnm.

Procesamiento y análisis de datos meteorológicos

Se dispuso de los insumos meteorológicos de cinco estaciones automáticas Vantage Pro-Plus Davis que fueron instaladas alrededor del Parque a una misma altitud de 3,000 m (Wong-González y Villers-Ruiz, 2007). Se utilizó la serie temporal de enero 2004 a octubre 2009 (2 130 días). Se corrió la versión automatizada del *Canadian Forest Fire Danger Rating System* (CFFDRS por sus siglas en inglés) (Van Wagner, 1987) para obtener los valores de cada uno de los componentes del sistema FWI por estación meteorológica (Figura 3).

Las variables meteorológicas consideradas y que se relacionan en el programa para crear los distintos componentes del FWI fueron datos diarios de temperatura máxima, temperatura mínima, presión de vapor (calculada a partir de la humedad relativa y temperatura media), velocidad del viento, precipitación acumulada en 24 h, evaporación potencial y radiación solar.

A los resultados diarios por componente de las estaciones meteorológicas se les aplicó un análisis de componentes principales, con el fin de saber si los valores eran similares y si el valor promedio diario de cada componente podría utilizarse para relacionarlos con los datos diarios de ocurrencia de incendios y área siniestrada. Una vez comprobada la consistencia de los resultados de las cinco

- d) Fir forest (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.), a community that is limited to a range from 2,800 to 3,800 masl; trees might get to 40 m high.
- e) High land forest (*Pinus hartwegii* Lindl.), which is located between 3,400 and 4,000 masl; it is a monospecific forest where the herb layer is abundant. It is the major species that acts as the border for tree vegetation.
- f) High land grassland, which is formed, mainly, by *Festuca tolucensis* Kunth, *Calamagrostis tolucensis* (Kunth) Trin. ex Steud., *Trisetum rosei* Scribn. et. Merr. and *Castilleja arvensis* Schltdl. et Cham. that grow in clumps up to 1 m tall. They are located between 4,000 and 4,300 masl.

Metheorological data processing and analysis

The metheorological income from five Vantage Pro-Plus Davis authomatic stations, that were placed around the Park at the same altitude, 3,000 m, were counted on (Wong-González and Villers-Ruiz, 2007). A temporary series from January 2004 to October 2009 (2,130 days) was used. The authomatic Canadian Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS) version (Van Wagner, 1987) was used to get the values of each of the FWI system components (Figure 3).

The meteorological variables that were taken into account and that are related to the program to create the different FWI components were daily data of maximum temperature, minimum temperature, steam pressure (calculated from relative humidity and average temperature), wind speed, accumulated precipitation in 24 h, potential evaporation and solar radiation.

To the daily results by component of the metheorological stations were applied a principal component analysis, in order to know if the values are similar and if the average daily value of each component could be used to relate them with the daily data for fire occurrence and affected area. Once the consistency of the results from the five stations was confirmed, an average number was taken from such data in order to have one single value per element for the Park.

Element calibration with FWI with fire occurrence and burned area

The elements of the FWI system define different conditions according to the variables involved in their creation. Starting from the assumption that there is a different correspondence between the number of fires and the burned area in the Park in regard to each element of the system, an analysis of correlation between the FWI elements and the two fire parameters was made (Figure 3). Data were obtained from the field recors of the fire fighting squads (CGET, 2009). This analysis was not made to determine a cause-effect depende of the variables involved, but to know in which way fire paramenterers are

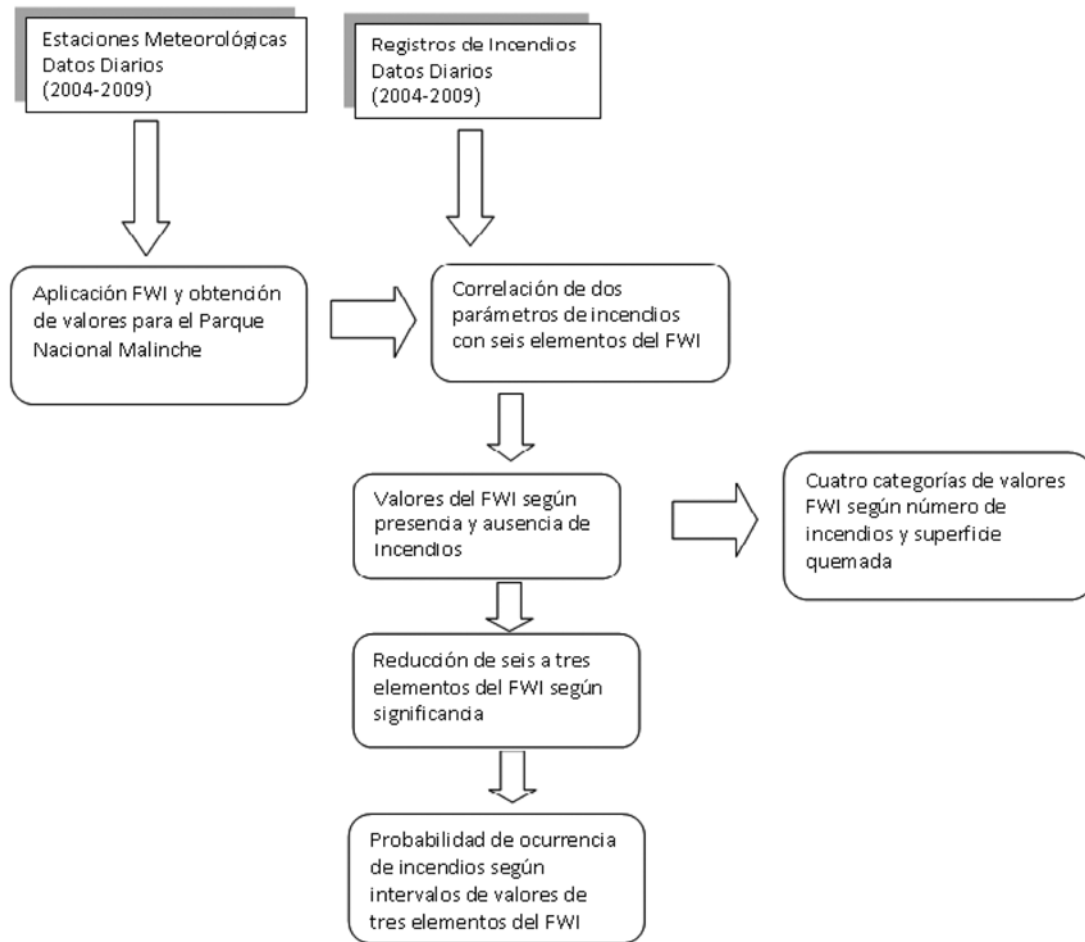


Figura 3. Diagrama sintético de procedimiento en el análisis.
Figure 3. Synthetic diagram of the analysis procedure.

estaciones, los datos se promediaron para tener un solo valor diario por elemento para el Parque.

Calibración de los elementos del FWI con ocurrencia de incendios y área quemada

Los componentes del sistema FWI definen condiciones distintas según las variables involucradas en su creación. Bajo el supuesto de que hay correspondencia distinta entre el número de incendios y área quemada en el Parque con respecto a cada elemento del sistema, se hizo un análisis de correlación entre elementos del FWI y los dos parámetros de incendios (Figura 3). Los datos se obtuvieron de los registros de campo de las brigadas de combate a incendios (CGET, 2009). Este análisis no se hizo para determinar una dependencia causa-efecto de las variables involucradas, sino para conocer de qué forma los parámetros de incendios se relacionan de mejor manera con los componentes del FWI y cuáles son los valores que toman estos elementos en los distintos casos, a

related in a better way with the FWI elements and which are the values that these elements take in different cases, starting from the fact that fire incidence is not understood in regard to one single meteorological factor.

To calculate the mean of the values of the FWI elements, groups based upon the presence or absence of fires were formed. With these two groups of data, an analysis of variance was made to prove and explain that the values of the elements are different with and without fires.

With the values of the six FWI elements from the time when there were fires and about affected areas, four categories were created, as they increased. Also, the meteorological values of maximum and minimum temperature and relative humidity for each category were included.

In order to establish if the occurrence of fires is being mostly explained by one of the FWI elements, a regression analysis was

sabiendas que la incidencia de incendio no solo se explica por el factor meteorológico.

Para hacer el cálculo de la media de los valores de los elementos del FWI, se les agrupó con base en la presencia o ausencia de incendios. Con estos dos conjuntos de datos se realizó una prueba de análisis de varianza para demostrar y explicar que los valores de los componentes son diferentes con y sin incendios.

Con los valores de los seis elementos del FWI, de cuando existieron incendios y de áreas siniestradas, se crearon cuatro categorías según se incrementaron. Así mismo, se incluyeron las variables meteorológicas de temperatura máxima, mínima y humedad relativa, correspondientes a cada categoría.

Para establecer si la ocurrencia de incendios está siendo explicada mayoritariamente por alguno de los elementos del FWI se ejecutó un análisis de regresión y se estipuló su significancia. Aquéllos que resultaron significativos en la determinación de la presencia de incendios, se les categorizó y estimó la probabilidad de que sucediera un incendio para cada intervalo declarado (Figura 3). La probabilidad de ocurrencia de incendio se calculó a partir de la proporción que existe entre su número por día, con respecto al total de días registrados para cada categoría.

RESULTADOS Y DISCUSION

Frecuencia de incendios

Del total de los datos diarios analizados de enero de 2004 a octubre de 2009, 81.6% de los días no se registró ningún incendio, pero para 18.4% existió, por lo menos uno en el Parque.

Los siniestros se concentraron de enero a abril en 2004, 2006 y 2007 y para 2005, 2008 y 2009 se prolongaron hasta mayo. Para todo el periodo analizado, marzo y abril fueron los meses en los que los fuegos se presentaron con mayor frecuencia. De la superficie quemada, 73.5% fue sobre el estrato herbáceo, 23.2% sobre arbustos; mientras que, 2.7% incidió en áreas de reforestación y renuevo y 0.5% llegó a afectar el arbolado adulto.

Representatividad de los valores del FWI

Al correr el programa se obtuvieron los valores diarios de los códigos e índices del FWI por estación meteorológica; a estos se les aplicó el análisis de componentes principales y se concluyó que los primeros dos constituían al menos 80% de la varianza. Además, se constató que las cinco estaciones meteorológicas aportaban, en la misma proporción, información para la

made and its significance was stated. Those which were significant in the determination of fire presence were categorized and the probability that a fire took place for each declared interval was estimated (Figure 3). The fire occurrence probability was calculated from the proportion that exists between their number per day in regard to the total number of days recorded for each category.

RESULTS AND DISCUSSION

Fire frequency

Of the total daily data that were analyzed from January 2004 to October 2009, 81.6 % of the days did no register any fire, but for 18.4% there was at least one in the Park.

Forest fires concentrated from January to April 2004, 2006 and 2007 and they went as far as May in 2005, 2008 and 2009. For the time that was analyzed, March and April were the months when fires occurred more frequently. Of the burned area, 73.5% took place over the herb layer, 23.2% over shrubs, while 2.7% affected reforestation areas and seedlings and 0.5% even damaged mature trees.

FWI value representativity

When the program was run, daily values of the codes and indexes of FWI were obtained for each meteorological station; a principal component analysis was applied to them and it was concluded that the first two were responsible for at least 80% of the variance. In addition, it was confirmed that the five meteorological stations brought information for the buildup of both components in the same proportion, which means that the whole group of the stations explained the whole variance. From this statistical probation, it was possible to enunciate an average value that is representative of the five stations of the Park, for each code or index.

Calibration of the FWI elements

Once the average value for each FWI element was determined, correlations were made with the fire frequency parameters and burned area recorded for the Park. In Table 1 are shown the results of Pearson's correlation between the six elements of FWI and the daily values of the parameters (N =2,130 analyzed days), correlation that revealed a greater strength with fire frequency than with the burned area, since the occurrence of those events obeys to discrete values, and the burned area tends to have a more irregular distribution.

The DC component, that refers to the moisture in the deep layer of organic matter (18 cm), is poorly correlated with the burned area and the number of fires. Wotton (2009) links this

construcción de los dos componentes, por lo que el conjunto de las estaciones meteorológicas explicaban la varianza total. A partir de esta comprobación estadística fue posible enunciar un valor promedio representativo de las cinco estaciones del Parque, para cada código e índice.

Calibración de los elementos del FWI

Una vez estimado el valor promedio para cada elemento del FWI se efectuaron las correlaciones con los correspondientes a los parámetros frecuencia de incendios y área quemada consignada para el Parque. En el Cuadro 1 se muestran los resultados de la correlación de Pearson entre los seis elementos del FWI y los valores diarios de los parámetros (N = 2 130 días analizados), correlación que reveló más fortaleza con la frecuencia de incendios que con el área quemada, debido a que la ocurrencia de dichos siniestros responde a valores discretos, y el área quemada tiende a tener una distribución muy desigual.

Cuadro 1. Correlación de Pearson entre frecuencia de incendios y área quemada para cada uno de los seis elementos del FWI.
Table 1. Pearson's correlation between fire frequency and burned area for each one of the six FWI elements.

	Frecuencia incendios	Área quemada	DC	DMC	ISI	BUI	FFMC	FWI
Frecuencia incendios	1	0.639	0.346	0.550	0.554	0.536	0.321	0.621
Área quemada	0.639	1	0.248	0.386	0.342	0.374	0.208	0.410
N	2130	2130	2130	2130	2130	2130	2130	2130

DC = Drought Code; DMC = Duff Moisture Code; ISI = Initial Spread Index; BUI = Buildup Index; FFMC = Fine Fuel Moisture Code; FWI = Fire Weather Index.

El componente DC, que indica humedad en la capa profunda de la materia orgánica (18 cm), está poco correlacionado con la superficie quemada y el número de incendios. Wotton (2009) vincula este código con informes sobre la persistencia del fuego en profundidad; a dicho elemento se le denomina, también, humedad guardada o almacenada.

Los elementos DMC, ISI y BUI fueron los de más alta correlación con los parámetros superficie y número de incendios, junto con el índice general FWI. El código DMC se refiere a la humedad en el mantillo, es decir, materia orgánica en descomposición. El índice BUI representa el total de combustible disponible, por lo que incluye al DC y al DMC. El índice ISI es significativo con relación a los fuegos, ya que se compone del FFMC más el factor viento. Los índices FWI, BUI e ISI son los de más alta correlación con la frecuencia de incendios. Su coeficiente de correlación fue superior a 0.500 (Cuadro 1).

code with the reports about the persistence of fire in depth; that element is known as stored moisture or humidity.

DMC, ISI and BUI had the highest correlation of the parameters of area and number of fires in addition to the FWI general index. DMC code refers to the humidity of the upper layer, that is, of decomposing organic matter. BUI is the total available fuel, and includes DC and DMC. ISI is significant in regard to fires, and it is made up by FFMC plus de wind factor. FWI, BUI and ISI indexes have the highest correlation with fire frequency. Their correlation coefficient was over 0.500 (Table 1).

In Table 2 is shown the analysis of variance for the whole data base, which proved that the values of the FWI elements and the meteorological variables of relative humidity (H-REL), maximum and minimum temperatures (T-MAX and T-MIN), as well as rainfall (LLUVIA) in mm, are significantly different in presence and absence of fires, since the value from the analysis of variance among media is very large.

Consequently, significance is equal to zero, which makes media different with or without fires, for all the tested variables. Even if this statement seems logical, it is mandatory to underline it to highlight the threshold values of these variables and to discern between a fire event from any other in which fire is not present.

In Table 3 can be seen the values of all the components for the two assessed situations. Here are included the data of meteorological variables. In all cases, the minimum numbers of the components are substantially increased when fires appear. In regard to the drought, minimum values from 0.2 for DMC, 0.39 for BUI and 12.78 for DC when there are no fires, are contrasting with 9.5, 11.50 and 36.29 minimum values that belong to the same component at the time when a fire is taking place.

It is worth noticing that the behavior of the components and meteorological variables in so far as the number of fires increases as well as the burned area (Table 4). The minimum values of drought of DMC or BUI get to 20.4 for the first one

En el Cuadro 2 se presenta el análisis de varianza para toda la base de datos, el cual probó que los valores de los elementos del FWI y las variables meteorológicas humedad relativa (H-REL), temperaturas máxima y mínima (T-MAX y T-MIN), así como, la precipitación (LLUVIA) en mm, son significativamente diferentes entre presencia y ausencia de incendios, ya que el valor del análisis de varianza entre medias es muy grande. En consecuencia, el nivel de significancia es cero, por lo que las medias son distintas en presencia o ausencia de incendio, para todas las variables probadas. Aunque esta aseveración parece lógica es primordial señalarlo, para marcar los valores umbral de estas variables y discernir entre un evento de incendio, de otro en el que no lo hay.

Cuadro 2. Análisis de varianza entre los valores de los elementos del FWI y algunas variables meteorológicas en relación con la presencia o ausencia de incendios en el parque.

Table 2. Analysis of variance between the values of the FWI elements and some meteorological variables in regard to the presence or absence of fires in the Park.

	DC	DMC	ISI	BUI	FFMC	FWI	H-REL	T-MAX	T-MIN	LLUVIA
Ausencia de incendio	158.1559	17.3417	4.4185219	24.1307	70.891	7.8242	70.336	17.776	5.745	2.40
Presencia de incendio	253.1077	56.9136	14.23460	69.8609	86.560	29.9908	45.605	19.827	5.230	0.43
Varianza	362.264	1396.802	1085.431	1287.285	354.979	1664.743	860.834	221.935	16.715	76.764
Significancia	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

DC = Drought Code, DMC = Duff Moisture Code; ISI = Initial Spread Index; BUI = Buildup Index; FFMC = Fine Fuel Moisture code; FWI = Fire Weather Index; H-REL = Humedad relativa; T-MAX = Temperatura máxima; T-MIN = Temperatura mínima.
H-REL= Relative Humidity; T-MAX = Maximum temperature; T-MIN= Minimum temperature.

En el Cuadro 3 se muestran los valores de todos los componentes para las dos situaciones evaluadas. Se incluyen los datos de las variables meteorológicas. En todos los casos las cifras mínimas de los componentes se incrementan sustancialmente cuando se manifiestan los incendios. Respecto a los mínimos de sequía de 0.2 para el DMC de 0.39 para BUI y de 12.78 para DC cuando no hay incendios, contrastan con los mínimos de 9.5, 11.50 y de 36.29 correspondientes a los mismos componentes en el momento en el que existe un incendio.

Resulta interesante señalar el comportamiento de los componentes y variables meteorológicas a medida que aumenta el número de incendios y la superficie quemada (Cuadro 4). Los valores mínimos de sequía de DMC o BUI ascienden a 20.4 para el primero y 23.76 para el segundo cuando ocurrieron de tres a cuatro siniestros diarios y las superficies afectadas por evento variaron entre 6 y <12 ha. Los valores de los componentes se elevan, aún más, a medida que la cantidad de incendios y la superficie quemada también aumentan.

and 23.76 for the second when three or four events a day occurred and the damaged areas per event varied from 6 to <12 ha. The values of the components get high even more, as the amount of fires and burned area also increase.

It was observed that when the area was over 22 ha, DMC was 51.5 and BUI, 71.36. The maximum and minimum value of BUI were more in line with those of DMC than with DC. These results agree with what Van Wagner (1987) reported in reference to the values of DMC and BUI which are closer than those that refer to humidity of the deep layers of organic matter: DC is always higher, but in agreement with DMC and BUI.

The fine fuel moisture (FFMC) indicates their feasibility for ignition, from their dryness condition. When fires were absent in the Park this code had a minimum value of 12.45 (Table 3), that raised to 57 when one or two fires a day appeared, with 0.5 to 6 ha each (Table 4). The greatest burned area was registered at 86 points and the area per fire extended between 22 and 90 ha. The greatest number of daily fires (7 to 14) occurred at 88 points.

Starting from the importance that fine fuel moisture has for ignition, in Figure 4 was designed the calculus of the FFMC component in regard to the total number of existing fires for each value. In this context, the number of fires per day increased greatly when FFMC was over 80 points. Studies in Indonesia mark a threshold from 81 to 83 points when the fire frequency increases dramatically (de Groot *et al.* 2007); thus, FFMC is a good indicator of potential ignition of fine fuels. According to Wotton (2009), the possible maximum of FFMC is 101 when litter is completely dry.

ISI is also a major index to be adjusted for Mexico. It is the result of combining FMCC with wind, which means that it represents the rate of dispersal or spread when fire starts, since

Cuadro 3. Valores meteorológicos y de los componentes del FWI en ausencia y presencia de incendios.

Table 3. Metodologic and component values of the FWI in regard to the presence or absence of fires.

Valores en ausencia de incendios	DC	DMC	ISI	BUI	FFMC	FWI	H-REL	T-MAX	T-MIN	LLUVIA
N	1739	1739	1739	1739	1739	1739	1739	1739	1739	739
Valor faltante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Media	158.156	17.342	4.4185	24.1307	70.8909	7.8242	70.336	17.776	5.745	2.40
Moda	34.48a	2.1a	0.54a	3.65	85.27	0.00	82.3a	17.8a	5.7a	0
Min	12.78	0.2	0.00	0.39	12.45	0.00	20.7	7.0	-2.7	0
Max	436.22	115.0	45.06	121.82	91.76	57.46	96.0	25.8	10.4	48
Valores en presencia de incendios										
N	391	391	391	391	391	391	391	391	391	391
Valor faltante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Media	253.108	56.914	14.2346	69.8609	86.5600	29.9908	45.605	19.827	5.230	0.43
Moda	256.43	90.8	8.20a	65.42	85.42a	1.65a	26.1a	20.4	5.0a	0
Min	36.29	9.5	0.66	11.50	57.02	1.65	14.9	6.9	-1.4	0
Max	432.67	113.9	61.17	120.25	93.68	75.76	79.6	25.5	10.3	15

a. Existen muchas modas. Aquí es el valor más bajo.

DC = Drought Code; DCM = Duff Moisture Code; FFMC = Fine Fuel Moisture Code; ISI = Initial Spread Index; BUI = Buildup Index; FWI = Fire Weather Index; H-REL = Humedad relativa; T-MAX = Temperatura máxima; T-MIN = Temperatura mínima.

a. There are many modes. Here is the lowest value.

H-REL = Relative Humidity; T-MAX = Maximum temperature; T-MIN = Minimum temperature.

Cuadro 4. Agrupamiento del valor de los componentes y variables meteorológicas por número de incendios y área quemada diariamente.

Table 4. Clustering of the values of the components and the meteorological variables according to the number of fires and daily burned area.

Incendios /Área	DC	DMC	ISI	BUI	FFMC	FWI	H-REL	T-MAX	T-MIN	LLUVIA
1 a 2	36.29	9.5	0.66	11.50	57.02	1.65	16.1	6.9	-1.4	0
0.5 < 6 ha	36.29	9.5	0.66	11.50	57.02	1.65	16.1	6.9	-1.4	0
3 a 4	57.87	20.4	4.18	22.18	74.51	12.41	19.4	15.5	0.5	0
6 < 12 ha	55.14	23.8	4.18	23.76	65.49	13.62	14.9	13.5	0.2	0
5 a 6	67.12	30.2	5.85	30.75	84.11	16.32	14.9	16.3	1.4	0
12 < 22 ha	89.16	30.2	5.85	40.35	85.30	22.02	16.0	17.0	1.4	0
7 a 14	89.16	39.9	11.63	40.35	88.35	27.63	16.1	18.9	1.1	0
22 < 90 ha	240.84	51.5	8.67	71.36	86.24	24.19	21.1	18.6	1.1	0

DC = Drought Code; DCM = Duff Moisture Code; FFMC = Fine Fuel Moisture Code; ISI = Initial Spread Index; BUI = Buildup Index; FWI = Fire Weather Index; H-REL = Humedad relativa; T-MAX = Temperatura máxima; T-MIN = Temperatura mínima.

H-REL = Relative Humidity; T-MAX = Maximum temperature; T-MIN = Minimum temperature.

Se detectó que cuando el área superaba 22 ha, DMC y BUI fueron del orden de 51.5 y 71.36, respectivamente. Los valores máximo y mínimo del BUI están más en conformidad con los del DMC que con el DC. Estos resultados concuerdan con lo consignado por Van Wagner (1987) respecto a que los valores de DMC y BUI son más cercanos que aquellos que representan la humedad en las capas profundas de la materia orgánica: el DC siempre es superior, aunque en concordancia con el DMC y el BUI.

later, in addition to wind, dispersal depends, mainly, on the amount and moisture of fuels. In the actual study it is worth noting that the minimal value for this index grows in regard to the burned area per fire of 0.66, when the burned area is < 6 ha to 8.67 if the area per fire is over 22 ha (Table 4).

The FWI index is the most difficult to interpret since it combines the assessed effects on the different codes and indexes and is the results, by itself, of the interaction of different situation

La humedad de los combustibles finos (FFMC) indica su disponibilidad a la ignición, debido al grado de desecación de los mismos. En el caso de ausencia de fuego en el Parque este código tuvo un valor mínimo de 12.45 (Cuadro 3), que aumentó a 57 al presentarse uno o dos incendios diarios, con una superficie de 0.5 a 6 ha cada uno (Cuadro 4). La mayor área quemada se registró a los 86 puntos y la superficie por incendio se extendió entre 22 y 90 ha. El número más grande de incendios diarios (entre 7 y 14) ocurrió a los de 88 puntos.

Dada la importancia que tiene la humedad de los combustibles finos para la ignición, en la Figura 4 se graficó el cálculo del componente FFMC, con respecto al total de fuegos existentes para cada valor. En este sentido el número de incendios por día se incrementó notoriamente cuando el FFMC fue superior a 80 puntos. Estudios en Indonesia señalan un umbral de 81 a 83 puntos cuando la frecuencia de los fuegos aumenta de manera dramática (de Groot *et al.*, 2007); por lo tanto, el FFMC es un buen indicador de ignición potencial de los combustibles finos. Según Wotton (2009), el valor máximo posible de FFMC es 101 en condiciones de hojarasca completamente seca.

of atmospheric time, which makes it difficult to relate it with any precise effect in particular. In general terms, their values raise in regard to the number of fires and the burned area. Thus, they recover 1.65 when they record a fire at 27.63 points when 7 to 14 daily fires occur (Table 4).

The meteorological data included in Table 3, particularly relative humidity and rain, confirm the tendency for fuel dehydration that is marked in the codes. When fires are absent, the minimal value of relative humidity is 20.7% and maximal rainfall was 18 mm, while, if there are fires, the minimal relative humidity lowered to 14.9% and the maximal rainfall to 15 mm. Temperatures kept constant, maximal between 6.9 and 25 °C and minimal 10 °C average.

Since fire occurrence was the parameter with best correlation with the FWI components, this data series was used to get deeper into the equivalence it holds with this five elements.

A logistic regression between the FWI elements in regard to the number of fires, in order to put apart those that were not significant in the explanation of this relation and to ponder which of the six component do explain fire occurrence with greater significance.

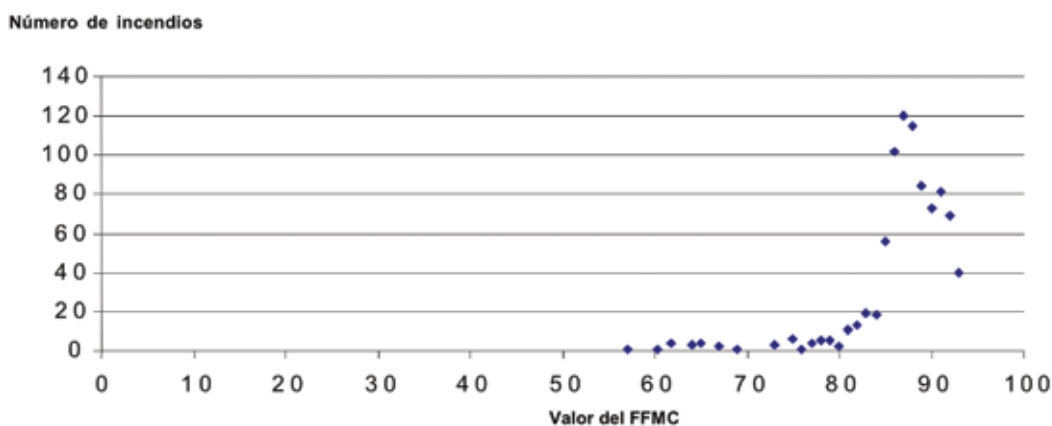


Figura 4. Número de incendios para cada valor del FFMC.

Figure 4. Number of fires for each FFMC value.

El ISI también es un índice primordial de calibrar para México. Resulta de la combinación del FFMC con el factor viento, por ello representa la tasa de dispersión al inicio del fuego, ya que posteriormente además del viento, la dispersión dependerá, en gran medida, de la cantidad y humedad de los combustibles. En el presente estudio conviene resaltar que el valor mínimo para este índice crece con relación a la superficie quemada por incendio del 0.66, cuando la superficie quemada es < 6 ha a 8.67 si la superficie por incendio es superior a 22 ha (Cuadro 4).

For the first regression, R^2 value was 0.372. In Table 5 are summed up the values of the parameters and the regression with their own significance levels. It can be observed that for the DMC, FFMC and FWI indexes, significance is very big, provoking their exclusion, as other elements provide the information they could bring. A second regression for corroboration, only with the three resting components; in this case, R^2 was 0.371, which means that significance keeps the same and that the variables that are linked to fire occurrence are DC, ISI and BUI.

El índice FWI es el más complejo de interpretar, dado que combina los efectos valorados en los distintos códigos e índices y es el resultado, a su vez, de la interacción de distintas situaciones del tiempo atmosférico, por lo que es difícil relacionarlo con algún efecto preciso, en particular. En general, sus valores ascienden en función del número de incendios y de la superficie quemada. Así, estos recuperan 1.65 cuando se manifiesta un incendio a 27.63 puntos en presencia de 7 a 14 incendios diarios (Cuadro 4).

Los datos meteorológicos incluidos en el Cuadro 3, en especial la humedad relativa (H-REL) y la lluvia, confirman la tendencia de deshidratación de los combustibles que se señala en los códigos. En ausencia de incendios, el valor mínimo de humedad relativa es de 20.7% y la lluvia máxima fue de 48 mm; mientras que, si hay incendios, el valor mínimo de humedad relativa bajó a 14.9% y el máximo de lluvia a 15 mm. Las temperaturas se mantuvieron constantes, máximas entre 6.9 y 25 °C y mínimas promedio de 10 °C.

Debido a que la ocurrencia de incendios fue el parámetro que mejor correlación tuvo con los componentes del FWI, se tomó esta serie de datos para profundizar más sobre la equivalencia que guarda con estos cinco elementos

As they are not significant to explain fire occurrence, the general FWI index, as it includes values of the other elements that would make it redundant, and DMC, whose values were very related with BUI, were discarded. On the other hand, FPMC was excluded as ISI includes it, in addition to the fact that it takes the wind into account.

In order to declare the thresholds of fire occurrence probability for some values of the three selected elements (DC, ISI and BUI), in Table 6 are shown five categories by component related with the probability that a fire takes place, according to the value range that is marked in each component. In this way, if the numbers of the *Drought Code* (DC) during the 208 days observed are within the 351.5 and 436.2 range and make up 82%, then, 171 fires occurred. ISI was calculated in 92% of probability that a fire takes place, if the component is placed between 23.25 and 61.16. Finally, if the BUI values are in the 97.53 - 121.82 interval, there are 95% of probability that a conflagration becomes real.

Cuadro 5. Elementos significativos del FWI en la frecuencia de incendios.
Table 5. Significant FWI elements in fire frequency.

A. Variables de la primera regresión

Elemento del FWI	B	Sig.	Exp(B)
DC	-0.010	0.002	0.990
DMC	-0.054	0.157	0.948
ISI	0.212	0.000	1.236
BUI	0.134	0.001	1.144
FFMC	0.019	0.242	1.019
FWI	-0.055	0.144	0.946
B. Variables de la segunda regresión			
DC	-0.060	0.000	0.994
ISI	0.154	0.000	1.166
BUI	0.069	0.000	1.071

coeficiente de regresión; Sig. = significancia; Exp (B) = exponencial de B.

DC = Drought Code; DCM = Duff Moisture Code; FPMC = Fine Fuel Moisture Code; ISI = Initial Spread Index; BUI = Buildup Index; FWI = Fire Weather Index;

B = coefficient regression; Sig. = significance; Exp (B) = B exponential.

Cuadro 6. Probabilidad de ocurrencia de incendio según los intervalos de valores para DC, ISI y BUI.
Table 6. Fire occurrence probability according to the values for DC, ISI and BUI.

Intervalo de valores para DC		Total días	Total incendios	Probabilidad ocurrencia
12.776	97.465	659	84	12.75%
97.465	182.154	614	89	14.50%
182.154	266.843	620	180	29.00%
266.843	351.533	500	338	67.60%
351.533	436.222	208	171	82.21%
0.000	5.813	1,318	49	3.72%
5.813	11.626	636	279	43.87%
11.626	17.439	279	196	70.25%
17.439	23.252	199	182	91.46%
23.252	61.166	169	156	92.30%
0.392	24.677	1,103	25	2.27%
24.677	48.963	560	156	27.86%
48.963	73.248	407	209	51.35%
73.248	97.534	352	302	85.80%
97.534	121.820	179	170	94.97%

Se efectuó una regresión logística entre los elementos del FWI con respecto al número de incendios, para separar aquellos componentes que no eran significativos en la explicación de esta relación y ponderar cuáles de los seis componentes si explican con mayor significancia la ocurrencia de incendios.

Para la primera regresión, el valor de R cuadrada fue de 0.372. En el Cuadro 5 se resumen los valores de los parámetros y de la regresión con sus respectivos niveles de significancia. Se observa que para los índices DMC, FPMC y FWI las significancias son muy grandes, por lo que se excluyeron, ya que los otros elementos proporcionan la información que podrían aportar estos. Se realizó una segunda regresión de corroboración, únicamente con los tres componentes restantes; en este caso la R^2 fue de 0.371, por lo que se comprueba que el nivel de significancia se mantiene y que las variables que se vinculan con la ocurrencia de incendio son DC, ISI y BUI.

Por no ser significativos para la explicación de la ocurrencia de incendios se descartan tanto el Índice general FWI, debido a que contiene los valores de los otros elementos por lo que dejarlo sería redundante, como el DMC, cuyos valores resultaron muy relacionados con el BUI. Por otro lado, se excluye el FPMC ya que el ISI lo incluye, además de que en este caso considera el factor viento.

Con el fin de indicar los umbrales de probabilidad de ocurrencia de incendios para ciertos valores de los tres elementos seleccionados (DC, ISI y BUI), en el Cuadro 6 se

CONCLUSIONS

With this study are confirmed the usefulness and scope of the use of the different components of FWI to form an early forest fire alert in Mexico. Based upon the frequency analysis of the number of fires and burned area related to the values of the FWI components, minimum thresholds of great danger of fires, as have been established for Canada and China.

Not all the FWI components had the same correlation index. DMC, ISI and BUI are outstanding as they had the highest correlation with burned area and number of fires. In regard to fire frequency, the most significant components were DC, ISI and BUI, thus formulating the probability of fire occurrence for the diverse values of these three components. As ISI includes the wind factor, it has been used in Indonesia and Malaysia as an indicator of the difficulty to control fires in grasslands.

The values of fine fuel moisture estimated by FPMC and its agreement with the number of fires are basic to detect them. A threshold of 80 points was determined for this component, from which fires increase considerably. In Canada a range from 82 to 96 points was determined in the case of great events, above 2 km².

If the meteorological data of relative humidity and rain are the ones that best related to the presence and absence of fires, and confirmed the behavior of the FWI components, these parameters were not sensible enough as to state the differences between the daily increments of fires and burned area, as indicated by the FWI elements.

muestran cinco categorías por componente relacionadas con la probabilidad de que suceda un incendio, según el intervalo de valores que se marca en cada componente. De esta manera, si las cifras del *Drought Code* (DC), durante los 208 días observados están en el intervalo entre 351.5 y 436.2, y corresponden al 82%, entonces existieron 171 incendios. Para el ISI se calculó en 92% la probabilidad de que ocurra un incendio, si este componente se ubica entre 23.25 y 61.16. Finalmente si los valores del BUI se ubican en el intervalo entre 97.53 y 121.82 existe 95% de probabilidades de que se presente una conflagración.

CONCLUSIONES


Con este estudio se confirma la utilidad y alcance en el uso de los distintos componentes del FWI para la realización de una alerta temprana de incendios forestales en México. Con base en el análisis de frecuencias sobre el número de incendios y superficie quemada asociada a los valores de los componentes de FWI se elaboraron los umbrales mínimos de gran peligrosidad a incendios, como los que se han establecido para Canadá y China.

No todos los componentes del FWI tuvieron el mismo índice de correlación. Destacaron en este estudio el DMC, ISI y BUI como los más altamente correlacionados con el área quemada y el número de incendios. Con respecto a la frecuencia de incendios los componentes más significativos fueron DC, ISI y BUI, por lo que se formuló la probabilidad de ocurrencia de incendios para los distintos valores de estos tres componentes. Dado que el ISI incluye el factor viento, se ha sido utilizado en Indonesia y Malasia como indicador de la dificultad de control de incendios en pastizales.

Los valores de la humedad de combustibles finos estimados en el FFMCI y su concordancia con el número de incendios son básicos para detectarlos. Se calculó un umbral de 80 puntos para este componente, a partir del cual los incendios se incrementan de forma considerable. En Canadá se determinó un intervalo de 82 a 96 puntos para el caso de grandes conflagraciones, superiores a 2 km².

Si bien los datos meteorológicos de humedad relativa y lluvia son los que mejor se relacionaron con la presencia y ausencia de incendios, y confirmaron el comportamiento de los componentes del FWI, estos parámetros no fueron lo suficientemente sensibles para marcar diferencias entre los incrementos diarios de incendios y área quemada, como lo indicaron los elementos del FWI.


A pesar de que la ocurrencia de incendios compete no solo a factores puramente meteorológicos, los resultados aquí expuestos son alentadores para elaborar una alerta temprana con los índices analizados según probabilidad de ocurrencia de

In spite of the fact that fire occurrence involves not only purely meteorological factors, the results here described are encouraging to organize an early alarm with the indexes here assessed according to fire occurrence for mountain zones and national parks of Central Mexico, as well as for the forests of the country. 

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Wilfrido Gutiérrez and Manuel García for the maintenance of the meteorological stations; to Oscar Sánchez Meneses for organizing the data base. To Francisco Estrada Porrúa and Sofía Villers Gómez for their suggestions and help in statistical analyses and to the Dirección General de Asuntos del Personal Académico of the Universidad Nacional Autónoma de México for the financial support provided to the PAPIIT-IN114211 project.

End of the English version

incendios tanto para las zonas montañas y parques nacionales del centro de México, como para los bosques del país. 

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a Wilfrido Gutiérrez y Manuel García por el mantenimiento de las estaciones meteorológicas; a Oscar Sánchez Meneses por la organización de las bases de datos. A Francisco Estrada Porrúa y Sofía Villers Gómez por las sugerencias y ayuda en el análisis estadístico y a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México por el financiamiento a través del proyecto PAPIIT-IN114211.

REFERENCIAS

- Alcántara, O. y M. Paniagua. 2007. Patrones de distribución y conservación de plantas endémicas. In: Luna, I., J. J. Morrone y D. Espinoza (Eds.). Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana. UNAM. México, D. F. México. pp. 421-438.
- Amiro, B. D., K. A. Logan, B. M. Wotton, M. D. Flannigan, J. B. Todd, J. B. Stocks and D. L. Martell. 2004. Fire weather index system components for large fires in the Canadian boreal forest. *International Journal of Wildland Fire*: 13: 391-400.
- Camia, A., P. Barbosa, G. Amatulli and J. San-Miguel-Ayán. 2006. Fire danger rating in the European Forest Fire Information System (EFFIS): Current developments. *Forest Ecology and Management*. 234, Supplement, S20.
- Carr, R. 2010. Mapas diarios para cada componente del FWI de 2003-12-01 a 2009-12-31. Información disponible de manera temporal sobre mapas creados por el Servicio Forestal de Canadá para México. <http://ftp.nofc.cfs.nrcan.gc.ca/downloads/Mexico> (9 de febrero 2010).
- Carvalho, A., M. D. Flannigan, K. A. Logan, I. Miranda and C. Borrego. 2008. Fire activity in Portugal and its relationship to weather and the Canadian Fire Weather Index System. *International Journal of Wildland Fire* 17(3): 328-338.
- Cedeño S., O. 1999. Incendios forestales en México en 1998: magnitud, extensión, combate y control. In: Santiago F., H., M. M. Servín, R. H. C. Rodarte y F. J. Garfías y Ayala (Ed.). Incendios forestales y agropecuarios: prevención e impacto y restauración de los ecosistemas. UNAM/PUMA-IPN. México, D. F. México. pp. 1-18.
- Coordinación General de Ecología del gobierno del estado de Tlaxcala. (CGE). 2009. Base de datos diarios de incendios de enero 2004 a octubre 2009. Tlaxcala, Tlax., México. s/p.
- Comisión Nacional Forestal. (CONAFOR). 2010. Incendios forestales. Guía práctica para comunicadores. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/10/236Gu%C3%ada%20pr%C3%a1tica%20para%20comunicadores%20-%20Incendios%20Forestales.pdf> (31 de mayo 2010).
- Comisión Nacional Forestal. (CONAFOR). 2011. Estadístico anual 2010 y Distribución comparativa 1998-2010. Coordinación general de conservación y restauración forestal. Gerencia nacional de incendios forestales. <http://148.223.105.188:2222/gif/snif/portal/administrator/sistemas/archivoslasdemas/incendioshistoricos/2010%20Estadistica%20Final.pdf> (3 de mayo de 2011).
- García, E. 2010. Mapa Moda o valor más frecuente de precipitación mensual y anual IV. 48 Tomo II sección Naturaleza. Atlas Nacional de México. <http://www.igeograf.unam.mx/igweb/pdf/publicaciones/atlas/tomoI.html#naturaleza>. (12 de marzo de 2010).
- Gómez-Tuena, A., M. T. Orozco-Esquivel y L. Ferrari. 2005. Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Volumen conmemorativo del centenario. Temas Selectos de la Geología Mexicana. Tomo LVIII, (3):227-283.
- de Groot, W. J., R. D. Field, M. A. Brady, O. Roswintarti and M. Mohamad. 2007. Development of the Indonesian and Malaysian Fire Danger Rating Systems. *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Change* 12: 165-180.
- Joint Research Centre (JRC). 2010. European Forest Fire Information System (EFFIS). <http://effis.jrc.ec.europa.eu/> (28 de mayo 2010).
- López-Domínguez, J. C. y R. Acosta. 2005. Descripción del Parque Nacional Malinche. In: López-Domínguez, J. C. y J. A. Fernández (Comp.) Biodiversidad del Parque Nacional Malinche. Tlaxcala, México. Coordinación General de Ecología del gobierno del Estado de Tlaxcala, Tlaxcala, Tlax. México. 223 p.
- Stephen, W. T. 2001. Consideraciones para la aplicación del Sistema Canadiense de Evaluación de Peligro de Incendios Forestales (CFFDRS) en Argentina. Servicio Forestal Canadiense. Centro Forestal del Pacífico. Recursos Naturales Canadá. Manuscrito. BC Ministry of Forests, British Columbia Canada - Ref. No. 14020-90/02. 38p.
- Tian, X., D. J. McRae, J. Jin, L. Shu, F. Zhao and M. Wang. 2011. Wildfires and the Canadian Forest Fire Weather Index System for the Daxing'anling region of China. *International Journal of Wildland Fire* 20(8): 963-973.
- Van Wagner, C. E. 1987. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. *Can. For. Serv., Tech. Rep.* 35. Ottawa, Ont. Canada. 37p.
- Viegas, D. X., T. Abrantes, P. Palheiro, F. E. Santo, M. T. Viegas, J. Silva and L. Pessanha. 2006. Fire weather during the 2003, 2004 and 2005 fire seasons in Portugal. *Forest Ecology and Management*. 234, Supplement, S60.
- Villers-Ruiz, L. 2004. Estudios sobre Incendios Forestales en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala-Puebla, México. In: Memorias del Simposio Incendios Forestales: Efectos Ambientales, Ecología y Manejo del Fuego. XVI Congreso Mexicano de Botánica. Oaxaca, Oaxaca. 17-22 octubre 2004. Sociedad Botánica de México. CD. pp.1-5.
- Villers-Ruiz, L., F. Rojas-García y P. Tenorio-Lezama. 2006. Guía botánica del Parque Nacional Malinche, Tlaxcala-Puebla. Centro de Ciencias de la Atmósfera e Instituto de Biología UNAM y CONACYT. México, D. F. México. 196p.
- Villers-Ruiz, L. y J. Hernández-Lozano. 2007. Incendios forestales y la variabilidad climática en México. In: Memorias del XI Encuentro de Geógrafos de América Latina. Geopolítica, globalización y cambio ambiental: retos para el desarrollo latinoamericano. Bogotá, D.C., Colombia. 12 p.
- Wong-González, J. C. y L. Villers-Ruiz. 2007. Evaluación de combustibles y su disponibilidad en incendios forestales: un estudio en el Parque Nacional La Malinche. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM México*. 62: 87-103.
- Wotton, B. M. 2009. Interpreting and using outputs from the Canadian Forest Fire Danger Rating System in research applications. *Environ. Ecol. Stat.* 16(2):107-131.