

# ÍNDICE DE PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES DE LARGO PLAZO

## LONG RUN FOREST FIRE DANGER INDEX

Juan M. Torres-Rojo<sup>1</sup>, Octavio S. Magaña-Torres<sup>2</sup> y Grodecz A. Ramírez-Fuentes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación y Docencia Económicas. División de Economía. Carretera México-Toluca Núm. 3655. Colonia Lomas de Santa Fé, México D.F. 01210. (juanmanuel.torres@cide.edu) y (grodecz.ramirez@cide.edu). <sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. C. E. Valle de México (magana.octavio@inifap.gob.mx)

### RESUMEN

En este documento se describe un índice de peligro de incendios forestales de largo plazo. El índice se basa en el principio de que los incendios forestales siguen un comportamiento crítico auto organizado, el cual establece que bajo una amplia variedad de circunstancias, los incendios forestales mantienen una relación exponencial sobre varias órdenes de magnitud entre la frecuencia de ocurrencia y el área quemada. Se describe el principio de un comportamiento crítico auto organizado de los incendios forestales y, con base en los registros de superficie y número de incendios forestales por Estado en México de 1970 a 2005, se comprueba empíricamente que el número total de incendios forestales ocurridos por año en cada Estado guarda una relación exponencial con el área quemada. Este comportamiento se usa para definir un índice de peligro de incendios forestales a largo plazo. El análisis de los resultados muestra que los incendios ocurridos en cada Estado exhiben distribuciones de frecuencia-tamaño que se aproximan a una distribución de potencia. La importancia de este resultado es que permite calcular índices de peligro de incendios forestales de largo plazo para cada entidad, índices que pueden tener una amplia variedad de aplicaciones en la planeación y ejecución de las actividades de prevención y combate de dichos siniestros.

**Palabras clave:** Comportamiento crítico auto organizado, distribución frecuencia-tamaño, fractales, índice de peligro.

### INTRODUCCIÓN

Después del cambio de uso del suelo y la tala ilegal, los incendios forestales representan la tercera causa más importante de pérdida de vegetación forestal en México (Cedeño-Sánchez, 2001). Las estadísticas gubernamentales sobre incendios forestales (SEMARNAT, 2005) registran en promedio 6774 eventos por año (1970-2005) que en aproximadamente 60% de los casos suceden en áreas con cobertura arbórea. La pérdida de vegetación forestal ocasionada por incendios genera varios impactos locales y

### ABSTRACT

A description is made of a long run forest fire danger index. The index is based on the principle that forest fires follow a self-organized critical behavior, which establishes that under a wide variety of circumstances, forest fires maintain an exponential relationship over various orders of magnitude between frequency of occurrence and the burned area. A description is made of the principle of self-organized critical behavior of forest fires and, based on the records of surface and number of forest fires per State in Mexico from 1970 to 2005, it is proved empirically that the total number of forest fires occurred per year in each State maintains an exponential relationship with the burned area. This behavior is used to define a long run forest fire danger index. The analysis of the results shows that the fires occurring in each State exhibit frequency-size distributions which approximate a power distribution. The importance of this result is that it permits the calculation of long run forest fire danger indices for each entity, indices that can have a wide variety of applications in the planning and application of the activities of prevention and control of forest fires.

**Key words:** Self organized critical behavior, frequency-size distribution, fractals, danger index.

### INTRODUCTION

After the change of soil use and illegal felling, forest fires represent the most important cause of forest vegetation loss in México (Cedeño-Sánchez, 2001). The governmental statistics of forest fires (SEMARNAT, 2005) register an average of 6774 events per year (1970-2005), which in approximately 60% of the cases occur in areas with tree cover. The loss of forest vegetation caused by fires generates various local and global impacts: increase of erosion, which aggravates the problems of flooding and contributes to the premature obstruction of water reserves, increase in sedimentation (Benavides and MacDonald, 2005) or reduction in productivity of some lands destined for primary production (Mills and Meldad, 1987), as well as health problems and loss of assets in the surrounding localities<sup>3</sup> (Fried *et al.*, 1999; Frankenberg *et al.*, 2005).

Recibido: Marzo, 2006. Aprobado: Abril, 2007.

Publicado como ENSAYO en *Agrociencia* 41: 663-674. 2007.

globales: incremento de la erosión, que agrava los problemas de inundaciones y contribuye al azolve prematuro de reservas de agua, aumento de la sedimentación (Benavides y MacDonald, 2005) o reducción de la productividad de algunos terrenos destinados a la producción primaria (Mills y Meldad, 1987), así como problemas de salud y pérdida de activos en las localidades aledañas<sup>3</sup> (Fried *et al.*, 1999; Frankenberg *et al.*, 2005). Estos problemas van acompañados de la pérdida de la mayoría de bienes y servicios derivados del bosque como calidad de agua, hábitats de fauna, la flora y fauna silvestres, productos no maderables, y servicios ambientales (González, 1993).

Los daños originados por los incendios forestales se reflejan en la pérdida de capital natural, de activos y vidas humanas (Fried *et al.*, 1999). Por ello, los gobiernos gastan un presupuesto elevado en labores de prevención y combate de incendios. En México el Gobierno Federal ha gastado en los últimos cuatro años un promedio anual de 300 millones de pesos (aproximadamente US\$ 28.57 millones, base 2005) en la prevención y combate de estos siniestros. En EE.UU. el Servicio Forestal gasta anualmente más de US\$ 5500 millones en la extinción de incendios para proteger los bosques nacionales, así como tierras adyacentes públicas y privadas (Bell *et al.*, 1995; Truesdale, 1995). Además hay numerosos esfuerzos de la iniciativa privada para aumentar la inversión en la prevención de estos siniestros (Fried *et al.*, 1999, Winter y Fried, 2001). Así, la definición de un indicador de la probabilidad de ocurrencia de un incendio es vital para identificar prioridades y estrategias de prevención y combate.

Ha aumentado notablemente la investigación sobre el diseño de indicadores que predicen la ocurrencia de incendios y que consideran condiciones ambientales y de los combustibles (factores que definen peligro de un incendio), así como los factores que pueden iniciar el fuego en el bosque (factores de riesgo de incendio). Tales indicadores se conocen genéricamente como índices de peligro (Rodríguez-Trejo, 1996). En el diseño de estos índices se usan variables meteorológicas como velocidad del viento, precipitación, temperatura, humedad o sus combinaciones, mezcladas con modelos de disponibilidad de combustibles (composición y nivel de humedad) y ocasionalmente algunas variables de comportamiento histórico para calcular la probabilidad de ocurrencia de un evento. La extrapolación de estos índices regularmente es deficiente, por lo que se recomienda la integración de variables socioeconómicas e institucionales en su diseño, variables sumamente

These problems are accompanied by the loss of most of the goods and services derived from the forest such as water quality, habitats of fauna, wild flora and fauna, non-timber products, and environmental services (González, 1993).

The damages caused by forest fires are reflected in the loss of natural capital, assets and human lives (Fried *et al.*, 1999). Therefore, governments spend a high budget on activities of fire prevention and control. In México the Federal Government has spent over the last four years an annual average of 300 million pesos (approximately \$28.57 million US dollars, base 2005) in the prevention and control of these fires. In the U.S., the Forest Service spends more than \$5500 million dollars every year to extinguish fires for the protection of the national forests, as well as the adjacent public and private lands (Bell *et al.*, 1995; Truesdale, 1995). Furthermore, there are numerous efforts of the private sector to increase the investment in the prevention of these fires (Fried *et al.*, 1999; Winter and Fried, 2001). Thus, the definition of an indicator of the likelihood of occurrence of a forest fire is vital for identifying priorities and strategies of prevention and control.

There has been a notable increase in investigation of the design of indicators that predict the occurrence of forest fires and that consider environmental and fuel conditions (factors that define forest fire danger), as well as the factors that can initiate a fire in the forest (fire risk factors). These indicators are known generically as danger indices (Rodríguez-Trejo, 1996). In the design of these indices meteorological variables such as wind velocity, precipitation, temperature, humidity or their combination are used, mixed with models of fuel availability (composition and moisture level) and occasionally some variables of historical behavior to calculate the probability of occurrence of an event. The extrapolation of these indices is often deficient, therefore the integration of socioeconomic and institutional variables is recommended in their design, variables that are extremely important for determining the danger and risk of forest fires (Viegas *et al.*, 1999; Andrews *et al.*, 2003).

There are diverse forest fire danger indices, which often are not comparable and frequently consider varied and imprecise concepts. The abundance of indices is a result of the diversity of objectives used in their design; thus, Bianchi *et al.* (2002) mention 50 different applications of these indices, without counting the integration of these tools to expert systems or of support to decision making (Bonazountas *et al.*, 2005) used by operators. In these applications, the indices are modified

<sup>3</sup> No todos los incendios forestales causan pérdida de vegetación arbórea, y ciertos tipos de incendios forestales tienen impactos positivos en el ecosistema ♦ Not all forest fires cause loss of forest vegetation, and certain forest fires have positive impacts in the ecosystem.

importantes para determinar el peligro y el riesgo de incendios (Viegas *et al.*, 1999; Andrews *et al.*, 2003).

Existen diversos índices de peligro de incendio, los cuales en muchas ocasiones no son comparables, y frecuentemente consideran conceptos variados y poco precisos. La abundancia de índices resulta de la diversidad de objetivos usados en su diseño; así, Blanchi *et al.* (2002) señalan 50 diferentes aplicaciones de estos índices, sin contar la integración de estas herramientas a sistemas expertos o de apoyo a la toma de decisiones (Bonazountas *et al.*, 2005) usados por operadores. En estas aplicaciones los índices se modifican y se integran con imágenes de satélite para ofrecer estimaciones en tiempo real, creando los índices de potencial de incendio (Burgan *et al.*, 1998; Sebastián-López *et al.*, 2000).

La forma más simple de clasificar los índices de peligro se basa en el tipo de información usada y la clase de predicción que realiza; además se consideran los índices de corto y de largo plazo. Con los primeros se hacen estimaciones diarias del riesgo de incendios para propósitos tácticos y operativos; con los segundos se evalúan riesgos a varias escalas para fines estratégicos.

Los índices de peligro de incendio de largo plazo son indicadores de condiciones estables que favorecen la ocurrencia de un incendio. Estos índices se usan para determinar áreas con alto riesgo de incendio causado por las condiciones intrínsecas de la zona, así como para determinar áreas donde se debería reforzar la prevención y combate de incendios mediante inversión en infraestructura o priorizar la asignación de presupuesto para prevención y combate. Un primer enfoque para generar este tipo de índices es seleccionar variables relacionadas con la ocurrencia de incendios a partir del análisis de datos históricos integrando ocasionalmente información espacial con un sistema de información geográfica o SIG (Chuvieco y Congalton, 1989; Jain *et al.*, 1996). Para integrar estas variables los expertos las clasifican en grupos, asignando a cada una un peso de acuerdo con su contribución potencial al peligro de incendio en el área. Con frecuencia se usan técnicas de decisión multicriterio (Alcázar *et al.*, 1998) para tratar de remover parte de la subjetividad en la selección e integración de variables. Un segundo enfoque considera el uso de métodos estadísticos y de programación matemática: regresión múltiple con modelos lineales (Castro y Chuvieco 1998), modelos probabilísticos (Loftsgaarden y Andrews, 1992; Chou, 1992; Vega-García *et al.*, 1995) y redes neuronales (Vega-García *et al.*, 1996; Chuvieco *et al.*, 1999). Ocasionalmente se usa información socioeconómica, fundamentalmente mecanismos de toma de decisiones, para producir índices útiles en el manejo de incendios locales (Tabara *et al.*, 2003).

and integrated with satellite images to offer estimations in real time, creating the fire potential indices (Burgan *et al.*, 1998; Sebastián-López *et al.*, 2000).

The simplest way to classify the danger indices is based on the type of information used and the class of prediction to be made; the long and short run indices are also considered. With the former, daily estimations are made of fire risk for tactical and operative purposes; with the latter, risks are evaluated on various scales for strategic purposes.

Long run forest fire danger indices are indicators of stable conditions that favor the occurrence of a fire. These indices are used to determine areas with high risk of fires caused by conditions intrinsic to the zone, as well as to determine areas where fire control and prevention should be reinforced through the investment in infrastructure or to prioritize the assignation of budget for fire control and prevention. An initial approach to generate this type of indices is to select variables related to the occurrence of forest fires from the analysis of historical data, occasionally integrating spatial information with a geographic information system (GIS) (Chuvieco and Congalton, 1989; Jain *et al.*, 1996). To integrate these variables, the experts classify them in groups, assigning to each a weight according to its potential contribution to the danger of forest fire in the area. Multi-criteria techniques are often used (Alcázar *et al.*, 1998) to try to remove part of the subjectivity in the selection and integration of variables. A second approach considers the use of statistical methods and mathematical programming: multiple regression with linear models (Castro and Chuvieco, 1998), probabilistic models (Loftsgaarden and Andrews, 1992; Chou, 1992; Vega-García *et al.*, 1995) and neuronal networks (Vega-García *et al.*, 1996; Chuvieco *et al.*, 1999). Socio-economic information is occasionally used, fundamentally decision making mechanisms, to produce indices that are useful in the management of local fires (Tabara *et al.*, 2003).

The present document presents a long run forest fire danger index based on the discovery of Bak *et al.* (1990), expanded by Clar *et al.* (1996), that forest fires follow a self-organized critical behavior. This behavior establishes that under a wide variety of circumstances, forest fires maintain an exponential relationship with the burned area over various orders of magnitude. This relationship is used here to derive a fire danger index that uses long run information and identifies regions with high danger of fire. The application of the index is strategic, given that it makes possible to identify the areas which, by their climatic conditions, socioeconomic characteristics and management record require greater support in the tasks of forest fire prevention and control.

En este documento se presenta un índice de peligro de incendio de largo plazo basado en el descubrimiento de Bak *et al.* (1990), ampliado por Clar *et al.*, (1996), de que los incendios forestales siguen un comportamiento crítico auto organizado. Este comportamiento establece que bajo una amplia variedad de circunstancias los incendios forestales mantienen una relación exponencial con el área quemada sobre varios órdenes de magnitud. Aquí se usa dicha relación para derivar un índice de peligro de incendio que emplea información de largo plazo e identifica regiones con alta peligrosidad de incendio. La aplicación del índice es estratégica, dado que permite identificar las áreas que por sus condiciones climáticas, sus características socioeconómicas y su historial de manejo requieren un mayor apoyo en las labores de prevención y combate de incendios forestales.

El documento tiene la siguiente estructura: 1) primero se muestra el principio del comportamiento crítico auto organizado para incendios forestales y se deriva el índice de peligro propuesto; 2) luego se aplica el índice a la serie histórica de datos de incendios forestales (1970-2005) de México y por Estado con una estimación de índices de peligro a nivel nacional; 3) finalmente, se presentan algunos resultados relevantes.

## MATERIALES Y METODOS

### Marco teórico sobre el comportamiento crítico auto organizado

Las distribuciones frecuencia-tamaño de fenómenos naturales complejos como terremotos, avalanchas e incendios forestales siguen un comportamiento simple y muy bien definido. En algunos casos el resultado es una distribución normal y en otros una distribución fractal (Clar *et al.*, 1996). Para verificar este comportamiento, Bak *et al.* (1990) propusieron un modelo celular autómatas que consiste de una cuadrícula de sitios que se va regenerando aleatoriamente con árboles y en la que periódicamente y con ubicación aleatoria ocurre un incendio, cuya amplitud depende de la conectividad entre árboles dentro de la cuadrícula. La dinámica de simulación es como sigue. A cada intervalo de tiempo se intenta establecer aleatoriamente un árbol en un sitio (cuadro) si éste se encuentra desocupado. Se define una frecuencia de ignición, ( $f_s$ ), que es el inverso del número de intentos por establecer un árbol en la cuadrícula antes de que inicie un incendio en un sitio aleatoriamente seleccionado. Si  $f_s=1/100$ , se considera que hubo 99 intentos por establecer (plantar) un árbol (algunos exitosos, otros no) antes de que inicie un incendio de localización aleatoria en el centésimo intento. Si el incendio inicia en un sitio sin árbol no pasa nada, pero si el incendio inicia en un sitio con árbol, el incendio se propaga consumiendo todos los árboles adyacentes (no diagonalmente). Se ha modificado este modelo básico (Christensen *et al.*, 1993; Drossel y Schwabl, 1993; Henley, 1993; Johansen, 1994), pero el comportamiento general de las distribuciones frecuencia-tamaño de los

The document has the following structure: 1) first, the self-organized critical behavior principal for forest fires is shown and the proposed danger index is derived; 2) next, the index is applied to the historical series of forest fire data (1970-2005) of México and per State with an estimation of danger indices at the national level; 3) finally, some relevant results are presented.

## MATERIALS AND METHODS

### Theoretical framework of self-organized critical behavior

The frequency-size distributions of complex natural phenomena such as earthquakes, avalanches and forest fires follow a simple and well defined behavior. In some cases the result is a normal distribution and in others it is a fractal distribution (Clar *et al.*, 1996). To verify this behavior, Bak *et al.* (1990) proposed an automatic cellular model that consists of a grid of sites that is randomly regenerated with trees and in which a fire occurs periodically and with random location, whose scope depends on the connectivity among trees within the grid. The simulation dynamic is as follows. To each time interval, an attempt is made to randomly establish a tree in a site (square) if the site is unoccupied. An ignition frequency is established ( $f_s$ ), which is the inverse of the number of attempts to establish a tree in the grid before a fire is started in a randomly selected site. If  $f_s=1/100$ , it is considered that there were 99 attempts to establish (plant) a tree (some successful, others no) before a fire starts with random location in the hundredth attempt. If the fire starts in a site without trees nothing happens, but if the fire starts in a site with trees, the fire propagates, consuming all of the adjacent trees (not diagonally). This basic model has been modified (Christensen *et al.*, 1993; Drossel and Schwabl, 1993; Henley, 1993; Johansen, 1994), but the general behavior of the frequency-size distributions of the fires is the same and follows the pattern of self-organized critical behavior.

In simulations with long time intervals, the number of fires is approximately equal to the number of trees planted, but the number of trees in the grid is variable. The frequency-area distribution of the fire is a statistical measurement of the behavior of the system, which is considered to be self-organized critical behavior because of the fact that trees are continually planted and a stable state is maintained. A measurement of the state of the system is the fraction of sites occupied by trees, which fluctuates around a value in equilibrium (Malamud *et al.*, 1998).

Given a grid size of  $N_q$  squares and an ignition frequency  $f_s$  a simulation can be run for  $N_s$  time intervals. During this period, a record is made of the number of fires  $N_F$  of area  $A_F$ , where the last value corresponds to the number of trees burned in a forest fire. Simulations with different parameters and time periods have shown that the number of fires of area  $A_F$  (*i.e.*  $N_F/N_s$ ) per time interval, is a function of  $N_F$  of the form:

$$\frac{N_F}{N_s} \sim A_F^\beta \quad (1)$$

incendios es el mismo y sigue el patrón de un comportamiento crítico auto organizado.

En simulaciones con intervalos de tiempo largos, el número de incendios es aproximadamente igual al número de árboles plantados, pero el número de árboles en la cuadrícula es variable. La distribución de frecuencia-área del incendio es una medida estadística del comportamiento del sistema, el cual se considera un comportamiento crítico auto organizado debido a que continuamente se plantan árboles y se mantiene un estado estable. Una medida del estado del sistema es la fracción de sitios ocupados por árboles, misma que fluctúa alrededor de un valor en equilibrio (Malamud *et al.*, 1998).

Dado un tamaño de cuadrícula de  $N_q$  cuadros y una frecuencia de ignición  $f_s$  se puede correr una simulación por  $N_s$  intervalos de tiempo. Durante este periodo se registra el número de incendios  $N_F$  de área  $A_F$ , donde este último valor corresponde al número de árboles quemados en un incendio. Simulaciones con diferentes parámetros y periodos de tiempo han mostrado que el número de incendios de área  $A_F$  (*i.e.*  $N_F/N_s$ ) por intervalo de tiempo, es una función de  $N_F$  de la forma

$$\frac{N_F}{N_s} \sim A_F^\beta \quad (1)$$

donde  $\beta$  varía entre 1.0 y 1.2. Malamud *et al.* (1998) y Malamud y Turcotte (1999) probaron este comportamiento para series históricas de incendios en Alaska, el Oeste de EE.UU. y Australia; en condiciones reales el parámetro  $\beta$  varía entre 1.3 y 1.5. La diferencia entre el modelo de simulación automática (modelo teórico) y el resultado del ajuste de series históricas (modelo empírico) se atribuyó a particularidades del primero; sin embargo se considera que hay una concordancia razonable entre ambos modelos. Esta relación tan estrecha resulta más sorprendente si se considera que el inicio y propagación de incendios registrados en las series históricas dependen de las condiciones físicas del terreno, los combustibles forestales, el tiempo atmosférico, las condiciones socioeconómicas, así como de los esfuerzos de prevención y control de estos siniestros, mientras que el modelo teórico es insensible al tiempo y a las condiciones en que se presenta el siniestro. Ello indica un comportamiento robusto, característico de un comportamiento crítico auto organizado (Malamud y Turcotte, 1999).

### Índice de peligro de incendios forestales a largo plazo

La relación en (1) corresponde a una línea recta en espacio logarítmico, que para una unidad geográfica en particular es:

$$\log(N_{A_F}) = \alpha - \beta \log(A_F) \quad (2)$$

donde,  $N_{A_F}$  = el número de incendios de área  $A_F$  en la unidad geográfica de estudio;  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros del modelo. Los resultados del comportamiento crítico auto organizado de los incendios forestales muestran que diferentes áreas geográficas tendrán diferentes valores de  $\alpha$ , pero el parámetro  $\beta$  varía de 1.3 a 1.5. Valores de  $\alpha$

where  $\beta$  varies from 1.0 to 1.2. Malamud *et al.* (1998) and Malamud and Turcotte (1999) tested this behavior for historical series of forest fires in Alaska, the West of the USA. and Australia; under real conditions the parameter  $\beta$  varies from 1.3 to 1.5. The difference between the automatic simulation model (theoretical model) and the result of the fit of historical series (empirical model) was attributed to particularities of the former; however, it is considered that there is a reasonable concordance between the two models. This close relationship is even more surprising if it is considered that the start and propagation of fires registered in the historical series depend on the physical conditions of the terrain, forest fuels, atmospheric conditions, socio-economic conditions, as well as the efforts of prevention and control of these conflagrations, whereas the theoretical model is insensitive to the time and conditions in which the fire occurs. This indicates a robust behavior, characteristic of self-organized critical behavior (Malamud and Turcotte, 1999).

### Long run forest fire danger index

The ratio in (1) corresponds to a straight line in logarithmic space, which for a particular geographic unit is:

$$\log(N_{A_F}) = \alpha - \beta \log(A_F) \quad (2)$$

where,  $N_{A_F}$  = the number of fires of area  $A_F$  in the geographic unit of study;  $\alpha$  and  $\beta$  are parameters of the model. The results of the self-organized critical behavior of the forest fires show that different geographical areas will have different values of  $\alpha$ , but the parameter  $\beta$  varies from 1.3 to 1.5. Higher values of  $\alpha$  will be associated with geographical areas with higher danger of fires. Thus, the variation in  $\alpha$  can be used to derive a danger index of these fires, for which it is possible to define a reference line (reference distribution):

$$\log(NR_{A_F}) = \alpha' - \beta \log(AR_F) \quad (3)$$

where  $NR_{A_F}$  = the relative number of fires with a an affected area of reference;  $AR_F$ , with a slope,  $\beta$ , similar to the other geographic areas and a different intercept,  $\alpha'$ . Given that  $\alpha$  in (2) varies among geographic units, it is substituted in (3) and the following relative number of forest fires is obtained in a specific area of reference,  $NR_{A_F}$ , for the geographic unit studied:

$$NR_{A_F} = N_{A_F} (AR_F/A_F)^{-\beta} \quad (4)$$

The relative number of forest fires with an affected area,  $AR_F$ , is comparable among geographic units as long as  $AR_F$  is a constant value, thus it can serve as an indicator of forest fire danger in a geographic unit. The value of  $NR_{A_F}$  can be normalized between 0 and 1 for a particular region considering the values derived from the different geographic units that integrate the region under study. This normalization can be made by estimating the maximum value (maximum  $NR_{A_F}$ ) and calculating the proportional relationship for each State with respect to this value. This normalized value of  $NR_{A_F}$  constitutes the long run forest fire danger index.

mayores estarán asociados a áreas geográficas con más peligro de incendios. Así, la variación en  $\alpha$  puede usarse para derivar un índice de peligrosidad de estos siniestros, para lo cual es posible definir una línea de referencia (distribución de referencia):

$$\log(NR_{A_F}) = \alpha' - \beta \log(AR_F) \quad (3)$$

donde,  $NR_{A_F}$  = el número relativo de incendios con un área afectada de referencia;  $AR_F$ , con una pendiente,  $\beta$ , similar a las demás áreas geográficas y un intercepto,  $\alpha'$ , diferente. Dado que  $\alpha$  en (2) varía entre unidades geográficas, se sustituye en (3) y se obtiene el siguiente número relativo de incendios de un área de referencia específica,  $NR_{A_F}$ , para la unidad geográfica estudiada:

$$NR_{A_F} = N_{A_F} (AR_F / A_F)^{-\beta} \quad (4)$$

El número relativo de incendios forestales con un área afectada,  $AR_F$ , es comparable entre unidades geográficas en tanto  $AR_F$  sea un valor constante, por lo que puede servir como indicador de la peligrosidad de incendios en una unidad geográfica. El valor de  $NR_{A_F}$  puede normalizarse entre 0 y 1 para una región en particular considerando los valores derivados de las distintas unidades geográficas que integran la región estudiada. Dicha normalización puede realizarse estimando el valor máximo (máximo  $NR_{A_F}$ ) y calculando la relación proporcional para cada Estado con respecto a este valor. Este valor normalizado de  $NR_{A_F}$  constituye el índice de peligro de incendios forestales de largo plazo.

#### Aplicación para México

Con base en la serie histórica de incendios forestales en México, de 1970 a 2005, se realizaron dos estimaciones. La primera se usó para verificar el comportamiento crítico auto organizado de la ocurrencia de incendios forestales en México. Se comprobó que el área total incendiada cada año por Estado sigue un comportamiento crítico auto organizado. La segunda estimación consistió en calcular los índices de peligrosidad de incendios forestales por Estado.

La verificación del comportamiento crítico auto organizado de los incendios forestales se hizo en todo el país. Para ello se consideró que el país es la región de análisis y que cada unidad geográfica de esta región estaría representada por los Estados. Esto obligó a suponer que el área afectada por un incendio está compuesta por la superficie total afectada por incendios forestales reportada en un año para cada Estado. Los datos se obtuvieron de los reportes anuales de la institución gubernamental encargada de la prevención y combate de incendios forestales<sup>4</sup>.

Para estimar la distribución fractal de incendios de tamaño  $A_F$  y comparar el resultado empírico con el teórico definido en (1), se usó el procedimiento de Malamud *et al.* (1998), que consiste en definir

#### Application for México

Based on the historical series of forest fires in México, from 1970 to 2005, two estimations were made. The first was used to verify the self-organized critical behavior of the occurrence of forest fires in México. It was proved that the total burned area each year per State follows a self-organized critical behavior. The second estimation consisted in calculating the forest fire danger indices per State.

The verification of the self-organized critical behavior of forest fires was made in the entire country. For this purpose it was considered that the country is the region of analysis and that each geographic unit of this region would be represented by the States. This obliged to assume that the area affected by a fire is made up of the total surface affected by forest fires reported in one year for each State. The data were obtained from the annual reports of the government institution responsible for the prevention and control of forest fires<sup>4</sup>.

To estimate the fractal distribution of forest fires of size  $A_F$  and to compare the empirical result with the theoretical result defined in (1), the procedure of Malamud *et al.* (1998) was used, which consists of defining a non-accumulated function of the number of forest fires of area  $A_F$  from an accumulated function. Next, the estimation of the non-accumulated distribution was made function of the areas  $A_F$  to obtain the relationship in (1).

From the annual reports of the total burned area per State, an accumulated distribution was estimated, where  $N_{FC}$  is the number of forest fires with areas greater than  $A_F$  in each State. The non-accumulated distribution is defined as the negative of derivate (*i.e.* slope) of the accumulated distribution with respect to the area  $A_F$ . This value is negative because the accumulated distribution is added from the highest value to the smallest value. The derivate  $dN_{FC}/dA_F$  is the slope of best fit for a specific number of adjacent points of the accumulated distribution; in essence it is the estimation of the number of forest fires of area  $AF(N_{AF})$ . Malamud *et al.* (1998) recommends fitting five adjacent points of the accumulated distribution by means of the ordinary least squares method of a linear space. The negative of the slope  $-dN_{FC}/dA_F$  is graphed as a function of the average of the five adjacent values of  $A_F$ . These doubles of values are fit again by the ordinary procedure of least squares using the model in (2). Figure 1 shows a distribution of values of  $-dN_{FC}/dA_F$  and  $A_F$  for two States, and a linear tendency is observed along with the similarity of the slope in both tendencies<sup>5</sup>.

To estimate the affected area of reference,  $AR_F$ , the average of the affected area (annual total) was used in all of the States from 1970 to 2005. This estimator was used because the principal objective of the  $AR_F$  is to facilitate the comparison of the geographic units among each other. Finally, the value of  $\beta$  was estimated to be used as reference to compare all of the States. For this purpose the entire data base (1970-2005) was used and the national estimation of the

<sup>4</sup> En 1970 la institución encargada era la Subsecretaría Forestal, dentro de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos; en 1993 la Dirección Forestal de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca fue la encargada de las estadísticas; en 2001 la responsabilidad fue de la Comisión Nacional Forestal. In 1970, the entity in charge was the Subsecretaría Forestal, within the Secretaría de Agricultura; in 1993 the Forestry Direction of SEMARNAT was in charge of the statistics; in 2001 the responsibility was of the CONAFOR.

una función no acumulada del número de incendios forestales de área  $A_F$  a partir de una función acumulada. Luego, la estimación de la distribución no acumulada se hizo función de las áreas  $A_F$  para lograr la relación en (1).

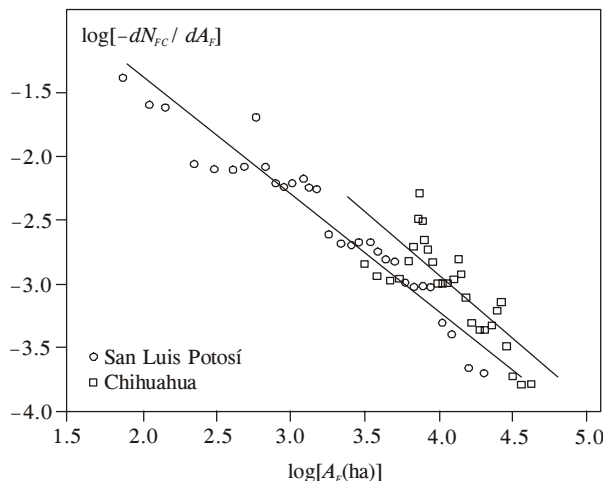
Partiendo de los reportes anuales de área total incendiada por Estado se estimó una distribución acumulada, donde  $N_{FC}$  es el número de incendios forestales con áreas mayores a  $A_F$  en cada Estado. La distribución no acumulada se define como el negativo de la derivada (*i.e.* pendiente) de la distribución acumulada con respecto al área  $A_F$ . Este valor es negativo debido a que la distribución acumulada se suma del valor más grande al valor más pequeño. La derivada  $dN_{FC}/dA_F$  es la pendiente de mejor ajuste para un número especificado de puntos adyacentes de la distribución acumulada; en esencia es la estimación del número de incendios forestales de área  $AF(N_{A_F})$ . Malamud *et al.* (1998) recomiendan ajustar cinco puntos adyacentes de la distribución acumulada a través del método de cuadrados mínimos ordinarios en un espacio lineal. El negativo de la pendiente  $-dN_{FC}/dA_F$  se grafica como una función del promedio de los cinco valores adyacentes de  $A_F$ . Estas duplas de valores se vuelven a ajustar por el procedimiento ordinario de mínimos cuadrados usando el modelo en (2). En la Figura 1 se muestra una distribución de valores de  $-dN_{FC}/dA_F$  y  $A_F$  para dos Estados y se aprecia una tendencia lineal y la similitud de la pendiente en ambas tendencias<sup>5</sup>.

Para estimar el área afectada de referencia,  $AR_F$ , se usó el promedio del área afectada (total anual) en todos los Estados de 1970 a 2005. Se usó este estimador porque el objetivo principal del  $AR_F$  es facilitar la comparación de las unidades geográficas entre sí. Finalmente, se estimó el valor de  $\beta$  a usar como referencia para comparar todos los Estados. Para ello se usó toda la base de datos (1970-2005) y la estimación nacional de la función no acumulada se realizó con la metodología ya señalada.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las distribuciones fractales mostraron un ajuste relativamente bueno para cada Estado y en la mayoría de los casos el estimador de  $\beta$  resultó muy cercano al valor teórico (1.0-1.2). En todos los casos el ajuste proporcionó estimadores de  $\alpha$  y  $\beta$  altamente significativos con aceptable bondad de ajuste para cada Estado. En el Cuadro 1 se muestran los estimadores de  $\alpha$  y  $\beta$ , así como el estimador de bondad de ajuste ( $R^2$ ) para cada caso.

Los estimadores de  $\beta$  relativamente bajos (<1.0) están asociados a Estados con varios registros con años sin o con incendios muy pequeños. Los estimadores altos de  $\beta$  están asociados a Estados con registros de grandes superficies afectadas; esos valores atípicos causan una desviación de la tendencia general.



**Figura 1. Tendencia de valores de  $y -dN_{FC} / dA_F$  y  $A_F$ .**  
**Figure 1. Tendency of values of  $y -dN_{FC} / dA_F$  and  $A_F$ .**

non-accumulated function was made with the aforementioned methodology.

### RESULTS AND DISCUSSION

The fractal distributions showed a relatively good fit for each State and in most cases the estimator of  $\beta$  was very close to the theoretical value (1.0-1.2). In all of the cases the fit provided estimators of  $\alpha$  and  $\beta$  that were highly significant with an acceptable goodness of fit for each State. Table 1 shows the estimators of  $\alpha$  and  $\beta$ , as well as the goodness of fit estimator ( $R^2$ ) for each case.

The relatively low (<1.0) estimators of  $\beta$  are associated with States with various records with years with forest fires or with very small ones. The high estimators of  $\beta$  are associated with States with records of large affected surfaces; these atypical values cause a deviation from the general tendency.

The fits show high estimators in States that traditionally have high risk of forest fire occurrence: Chiapas, Federal District, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Oaxaca and Puebla. This high danger level could be related to the conditions of the physical environment that are appropriate for their occurrence, as well as the strong incidence of the human factor. The above points to an advantage of this index when historical information of different regions is used, given that it considers environmental, economic, social, cultural, and forest resource management factors.

<sup>5</sup> No todos los Estados mostraron una tendencia clara como las presentadas en la Figura 1. Una posible causa de estas diferencias es la variación en la estrategia de evaluación y registro de estos siniestros en los Estados, sobre todo en los primeros años registrados. Not all of the States showed a clear tendency as those presented in Figure 1. A possible cause of these differences is the variation in the evaluation strategy and register of these sinistres in the States, mainly in the first registered years.

**Cuadro 1. Ajustes de la distribución no acumulada de número de incendios forestales de tamaño  $A_F$  para cada Estado e índices de peligrosidad.**

**Table 1. Fits of the non-accumulated distribution of the number of forest fires of size  $A_F$  for each State and danger indices.**

Entidad federativa	Pendiente ( $-\beta$ )	Intercepto ( $\alpha$ )	R <sup>2</sup>	$NR_{A_F}$	Índice de peligro de incendios forestales (%)
Aguascalientes	-1.004	0.914	0.664	0.0006	21
Baja California	-0.966	0.812	0.732	0.0014	47
Baja California Sur	-1.004	0.914	0.664	0.0004	13
Campeche	-0.889	0.370	0.743	0.0005	18
Coahuila	-1.238	1.826	0.849	0.0012	42
Colima	-1.134	1.325	0.845	0.0007	24
Chiapas	-1.467	3.066	0.713	0.0021	72
Chihuahua	-1.223	1.989	0.719	0.0020	70
Distrito Federal	-1.329	2.508	0.160	0.0026	89
Durango	-1.168	1.815	0.664	0.0024	81
Guanajuato	-1.056	1.094	0.646	0.0008	26
Guerrero	-1.193	1.845	0.617	0.0018	63
Hidalgo	-1.203	1.597	0.658	0.0008	28
Jalisco	-1.368	2.755	0.476	0.0029	100
México	-1.140	1.748	0.521	0.0024	83
Michoacán	-1.681	3.904	0.543	0.0024	83
Morelos	-1.066	1.386	0.395	0.0014	47
Nayarit	-1.356	2.414	0.808	0.0016	55
Nuevo León	-1.158	1.257	0.909	0.0006	20
Oaxaca	-1.355	2.390	0.780	0.0014	49
Puebla	-1.305	2.212	0.437	0.0016	54
Querétaro	-1.261	1.491	0.935	0.0004	14
Quintana Roo	-1.210	1.377	0.905	0.0005	19
San Luis Potosí	-1.064	0.998	0.947	0.0007	26
Sinaloa	-1.173	1.661	0.549	0.0013	44
Sonora	-1.122	1.462	0.435	0.0014	49
Tabasco	-1.118	1.034	0.744	0.0004	15
Tamaulipas	-1.062	1.083	0.833	0.0009	32
Tlaxcala	-1.269	1.903	0.723	0.0010	35
Veracruz	-1.311	1.928	0.786	0.0008	27
Yucatán	-1.218	1.375	0.911	0.0004	15
Zacatecas	-1.125	1.341	0.855	0.0010	35
Promedio	-1.195	1.681	0.693	0.0013	44
Máximo	-0.889	3.904	0.947	0.0029	100
Mínimo	-1.681	0.370	0.160	0.0004	13

Los ajustes muestran estimadores altos en Estados que tradicionalmente tienen alto riesgo de ocurrencia de incendios forestales: Chiapas, Distrito Federal, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Oaxaca y Puebla. Esa alta peligrosidad podría estar relacionada con las condiciones del medio físico apropiadas para su ocurrencia, así como con la fuerte incidencia del factor humano. Lo anterior señala una ventaja de este índice al usar información histórica de diferentes regiones, ya que considera factores ambientales, económicos, sociales, culturales y de manejo del recurso forestal.

Además, Estados con extensa superficie arbolada y fuerte actividad forestal maderable, como Chihuahua y Durango, presentan estimadores de  $\alpha$  dentro del promedio nacional. Allí, una combinación de menor presión demográfica y mayor actividad forestal maderable podrían ser la razón de que el índice sea de menor

Furthermore, States with extensive treed surface and strong logging activity, such as Chihuahua and Durango, present estimators of  $\alpha$  within the national average. There, a combination of lower demographic pressure and higher logging activity could be the reason that the index is of a lower danger level, even though they are regions with extreme temperatures and a larger forest area.

For the estimation of the relative number of forest fires with an affected area to  $AR_F$  ( $NR_{A_F}$ ), the average of affected areas (annual total) was calculated in all of the States of the country from 1970 to 2005. The average is 6765 ha and the value of the affected area of reference approximated  $AR_F=7000$  ha. The estimation of the slope,  $\beta$ , of reference, was made also including the data from all of the States in the same period. Figure 2 shows the tendency of the combinations of  $-dN_{FC}/dA_F$



peligrosidad, aunque son regiones con temperaturas extremas y mayor extensión forestal.

Para la estimación del número relativo de incendios forestales con un área afectada  $AR_F$  ( $NR_{AF}$ ) se calculó el promedio de áreas afectadas (total anual) en todos los Estados del país de 1970 a 2005. El promedio es 6,765 ha y el valor de área afectada de referencia se aproximó a  $AR_F=7000$  ha. La estimación de la pendiente,  $\beta$ , de referencia se hizo incluyendo también los datos de todos los Estados en el mismo periodo. En la Figura 2 se muestra la tendencia de las combinaciones de  $-dN_{FC}/dA_F$  y  $A_F$  graficada en escala logarítmica. La tendencia es muy similar a la reportada por Malamud *et al.* (1998) para series de datos con una cantidad aceptable de registros. En estas distribuciones se aprecia una amplia variación en incendios de tamaño pequeño y muy pocos datos para incendios de superficies mayores. La estimación de mínimos cuadrados, así como los estimadores de bondad de ajuste se muestran en el Cuadro 2. Resalta la alta significancia estadística de las estimaciones y la calidad del ajuste, aunque esto último es difícil de comparar porque en trabajos previos no se muestran los estimadores de bondad de ajuste. Finalmente, el estimador toma un valor muy aproximado al intervalo reportado (1.3-1.5).

El número relativo de incendios forestales de área igual a 7000 ha ( $NR_{AF}$ ) se obtuvo sustituyendo el tamaño promedio de los incendios (*i.e.* el promedio de superficie anual siniestrada por Estado) en la ecuación (2), con lo que se obtuvo una estimación de  $N_{AF}$ . Estos valores se sustituyeron en (4) para calcular  $NR_{AF}$ . Este indicador brinda una comparación diferente entre unidades geográficas a la obtenida sólo con el intercepto  $\alpha$ . Esto se debe a que en la estimación de  $N_{AF}$  se incluye la posible variación derivada de una diferencia en las pendientes de cada unidad geográfica. Así, por ejemplo, Morelos y Yucatán con valores  $\alpha$  muy similares, presentan valores de  $NR_{AF}$  con una mayor diferencia a pesar de tener incendios de aproximadamente el mismo orden de magnitud ( $\alpha$  similar). En esta comparación se distingue la mayor probabilidad que tiene

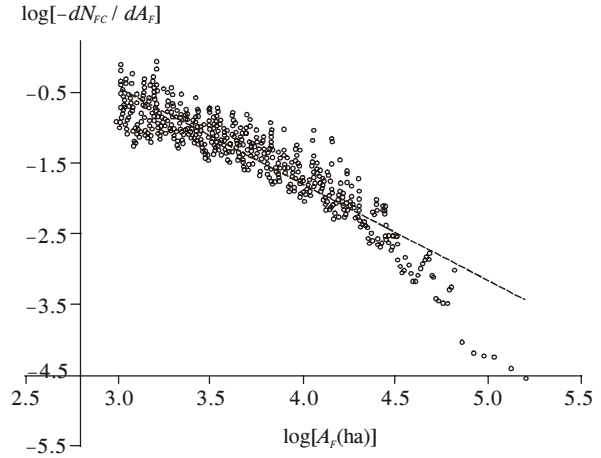


Figura 2. Tendencia de valores de  $-dN_{FC}/dA_F$  y  $A_F$  para todo el país de 1970 a 2005.

Figure 2. Tendency of values of  $-d N_{FC} / dA_F$  for the entire country from 1970 to 2005.

and  $A_F$  graphed in logarithmic scale. The tendency is very similar to that reported by Malamud *et al.* (1998) for series of data with an acceptable number of records. In these distributions a wide variation is observed in small fires with very little data for fires of larger surfaces. The estimation of least squares, as well as goodness of fit estimators, is shown in Table 2. The high statistical significance of the estimations and the quality of fit are notable, although the latter is difficult to compare because in previous works the goodness of fit estimators are not shown. Finally, the estimator takes a value that is very close to the reported interval (1.3-1.5).

The relative number of forest fires of an area equal to 7000 ha ( $NR_{AF}$ ) was obtained by substituting the average size of the fires (*i.e.* the average annual burned surface per State) in equation (2), with which an estimation of  $N_{AF}$  was obtained. These values were substituted in (4) to calculate  $NR_{AF}$ . This indicator offers a different comparison among geographic units than that obtained only with the intercept  $\alpha$ . This is because

Cuadro 2. Ajuste de  $-dN_{FC}/dA_F$  vs  $A_F$  para todo el país en el periodo 1970-2005.

Table 2. Fit of  $-dN_{FC}/dA_F$  and  $A_F$  for the entire country in the period 1970-2005.

Parámetro	Estimador	EE	Estadístico-t	Prob.
$\alpha$	3.366	0.072	46.629	0.0
$\beta$	-1.291	0.019	-66.367	0.0
R <sup>2</sup>	0.846	Media var. dependiente		-1.386
R <sup>2</sup> ajustada	0.846	DE var. dependiente		0.661
SC Regresión	0.259	Estadístico F		4404.585
SC Residuales	53.636	Prob. (estadístico F)		0.0

EE=error estándar; SC=suma de cuadrados; DE=desviación estándar; SC=suma de cuadrados.

Morelos de acumular una superficie siniestrada mayor en un año.

Para estimar el índice de peligro de incendios forestales a largo plazo se realizó una normalización que consistió en determinar el valor de  $NR_{AF}$  más alto y obtener la proporción relativa para cada Estado. Este índice es de más fácil lectura, ya que en una escala 0-1 muestra las unidades geográficas con mayor peligro de tener una superficie siniestrada igual o mayor al promedio nacional. El índice podría aplicarse en la distribución del gasto para la prevención y combate de incendios, ya que muestra por unidad de superficie que tan riesgosa es una entidad con respecto a otra de referencia (Jalisco, en el ejemplo). Así, suponiendo una relación directa entre gasto (en prevención y combate) y riesgo de incendio, por cada peso que se gasta en presupuesto base por unidad de superficie en prevención y combate de incendios en Jalisco, se debieran gastar 70 centavos en Chihuahua o 15 centavos en Yucatán. El índice es un criterio indicativo, dado que la asignación de gasto debe considerar otros elementos además del riesgo de largo plazo por unidad de superficie definido por el índice aquí presentado. Ello se debe a las fuertes variaciones anuales en la ocurrencia de siniestros y que exigen un fondo de contingencias para atender las necesidades originadas por variaciones climáticas, en patrones de manejo o en eventos antropogénicos. No obstante, el índice puede ser un excelente estimador para la asignación de un presupuesto base. Siguiendo un criterio de eficiencia económica, la asignación de gasto en prevención y combate no sólo debería obedecer al riesgo de ocurrencia del siniestro, sino también al valor del activo a proteger. Sin embargo, esto resulta complicado dado que una adecuada estimación del valor del recurso exige valorar el flujo de bienes y servicios tangibles e intangibles del ecosistema, así como su potencial de regeneración y tiempo en lograr la condición perdida.

Otra aplicación regional del índice es en la planificación y recomendación de actividades de manejo forestal relacionadas con la conservación y fomento de áreas forestales.

## CONCLUSIONES

Se mostró que el área total incendiada por año en cada Estado sigue un comportamiento crítico auto organizado. No en todos los Estados hubo una tendencia bien marcada, pero el patrón general no varía mucho del esperado. Esta tendencia permitió comprobar que la distribución frecuencia-tamaño de incendios forestales en el país se aproxima a una distribución de potencia con coeficientes entre 0.8-1.6, valores razonablemente cercanos a los reportados en la literatura. Las

in the estimation of  $N_{AF}$ , the possible variation derived from a difference in the slopes of each geographic unit is included. Thus, for example, Morelos and Yucatán, with very similar  $\alpha$  values, present values of  $NR_{AF}$  with a greater difference despite having forest fires of approximately the same order of magnitude (similar  $\alpha$ ). In this comparison, the greater likelihood of Morelos of accumulating a larger burned surface in a year is notable.

To estimate the long run forest fire danger index, a normalization was made which consisted of determining the highest value of  $NR_{AF}$  and obtaining the relative proportion for each State. This index is easier to read, given that on a 0-1 scale, it shows the geographic units with the highest danger of having a burned surface equal to or larger than the national average. The index might be applied in the distribution of the budget for forest fire prevention and control, as it shows per surface unit how much at risk one entity is with respect to another reference unit (Jalisco, in the example). Thus, assuming a direct relationship between expense (in prevention and combat) and fire risk, for each peso spent in base budget per surface unit on the prevention and control of forest fires in Jalisco, 70 cents should be spent in Chihuahua or 15 cents in Yucatán. The index is an indicative criterion, given that the assignation of funds should consider other elements besides the long run risk per surface unit defined by the index presented here. This is due to the strong annual variations in the occurrence of forest fires and that a contingency fund is required to attend the needs caused by climatic variations, in management patterns or in anthropogenic events. However, the index can be an excellent estimator for the assignation of a base budget. Following a criterion of economic efficiency, the assignation of funds in fire prevention and control should not only be based on the risk of occurrence of fire, but also on the value of the asset to protect. However, this is complicated given that an adequate estimation of the value of the resource requires an assessment of the flow of goods and tangible and intangible services of the ecosystem, as well as its regeneration potential and time in recovering the condition that has been lost.

Another regional application of the index is in the planning and recommendation of forest management activities related to the conservation and fomentation of forest areas.

## CONCLUSIONS

It was shown that the total burned area per year in each State follows a self-organized critical behavior. Not all of the States showed a well marked tendency, but the general pattern does not vary much from the

variaciones se atribuyen a deficiencias en la información, especialmente en el registro de siniestros pequeños.

El coeficiente de la distribución de potencia nacional fue muy aproximado al valor esperado (1.3). Ello comprueba que, a pesar de que existen muchos factores sociales, económicos, ambientales, de complejos de combustibles, características de los bosques y clima que inciden en la iniciación y propagación de incendios forestales, destaca que las distribuciones frecuencia-área sean tan similares.

El índice de peligro derivado de estas distribuciones permite identificar el riesgo de largo plazo de diferentes áreas geográficas. Este indicador es comparable, está definido en un intervalo 0-1 y puede referirse a una unidad de superficie forestal. Por ello es un indicador útil para aproximar la asignación de presupuesto base, priorizar actividades de prevención y control o realizar un análisis costo-beneficio de las acciones de control de incendios.

### LITERATURA CITADA

Alcázar, J., C. V. García, P. J. Grauet, and A. Fernández. 1998. Human risk and fire danger estimation through multicriteria analysis evaluation methods for forest fire prevention in Barcelona, Spain. *In: Forest Fires: Ecology and Control III International Conference on Forest Fire Research*. University of Coimbra, ADAI. Viegas, X. (ed.). pp: 2379-2387.

Andrews, P. L., D. O. Loftsgaarden, and L. S. Bradshaw. 2003. Evaluation of fire danger rating indexes using logistic regression and percentile analysis. *Int. J. Wildland Fire* 12(2): 213-226.

Bak, P., K. Chen, and C. Tang. 1990. A forest-fire model and some thoughts on turbulence. *Phys. Lett. A* 147: 297-300.

Bell, E. F., D. A. Cleaves, H. Croft, S. Husari, E. Schuster, and D. Truesdals. 1995. Fire economics assessment report. Albany, CA. Pacific Southwest Res. Stn. USDA For. Serv. 67 p.

Benavides S., J. D. and L. H. MacDonald. 2005. Measurement and prediction of post-fire erosion at the hillslope scale, Colorado Front Range. *Int. J. Wildland Fire* 14(4): 457-474.

Blanchi, R., M. Jappiot, and D. Alexandrian. 2002. Forest fire risk assessment and cartography - A methodological approach. 4th International Conference on Forest Fire Research, Coimbra, Portugal. pp: 2-9.

Bonazountas, M., D. Kallidromitou, P.A. Kassomenos, and N. Passas. 2005. Forest fire risk analysis. *Human and Ecol. Risk Ass.* 11: 617-626.

Burgan, R. E., R. W. Klaver, and J.M. Klaver. 1998. Fuel models and fire potential from satellite and surface observation. *Int. J. Wildland Fire* 8:159-170.

Castro, R., and E. Chuvieco. 1998. Modeling forest danger from GIS. *Geocarto Int.* 13: 15-23.

Cedeño-Sánchez, O. 2001 Situación actual sobre los incendios forestales y sus principales causas. *In: Memoria del II Foro Internacional sobre los Aprovechamientos Forestales en Selvas y su Relación con el Ambiente*. SEMARNAT-FAO-Gob. Estado de Veracruz. pp: 235-252.

Chou, Y. H. 1992. Management of wild fires with a geographical information system. *Int. J. Geo. Inf. Sys.* 6: 123-140.

Christensen, K., H. Flyvbjerg, and Z. Olami. 1993. Self-organized critical forest-fire model: Meanfield theory and simulation results in 1 to 6 dimensions. *Phys. Rev. Lett.* 71: 2737-2740.

expected pattern. This tendency made it possible to confirm that the frequency-size distribution of forest fires in the country approaches a power distribution with coefficients of between 0.8-1.6, values which are reasonably close to those reported in the literature. The variations are attributed to deficiencies in the information, especially in the record of small fires.

The coefficient of the national power distribution was very close to the expected value (1.3). This confirms that, despite the fact that there are many social, economic, environmental, and fuel complex factors along with characteristics of the forests and climate that influence the initiation and propagation of forest fires, it is outstanding that the frequency-area distributions are so similar.

The danger index derived from these distributions allows the identification of long run risk of different geographic areas. This indicator is comparable, is defined in a 0-1 interval and can refer to a forest surface unit. Therefore, it is a useful indicator for approximating the assignment of base budget, prioritizing prevention and control activities or for carrying out cost-benefit analysis of the actions of forest fire control.

—End of the English version—



Chuvieco, E., and R. G. Congalton. 1989. Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. *Remote Sensing Environ.* 29: 147-159.

Chuvieco E., F. J. Salas, L. Carvacho, and F. Rodríguez-Silva. 1999. Integrated fire risk mapping. *In: Remote Sensing of Large Wildfires*. New York: Springer-Verlag. Chuvieco, E. (ed). pp: 65-84.

Clar, S., B. Drossel, and F. Schwabl. 1996. Forest fires and other examples of self-organized criticality. *J. Phys. Cond. Mat.* 8: 6803-6824.

Drossel, B., and F. Schwabl. 1993. Forest-fire model with immune trees. *Physica A* 199:183-197.

Frankenberg, E., D. McKee, and D. Thomas. 2005. Health consequences of forest fires in Indonesia. *Demography* 42(1):109-129.

Fried, J. S., G. J. Winter, and J. K. Gillies. 1999. Assessing the benefits of reducing fire risk in the wildland-urban interface: a contingent valuation approach. *Int. J. Wildland Fire* 9 (1): 9-20.

González C., A. 1993. The economic impact of fire on forest resources. *Wildfire* 1: 16-21.

Henley, C. L. 1993. Statics of a "self-organized" percolation model. *Phys. Rev. Lett.* 71: 2741-2744.

Jain, A, S. A. Ravan, R. K. Singh, K. K. Das, and P. S. Roy. 1996. Forest fire risk modelling using remote sensing and geographic information system. *Research Com. Current Sci.* 10: 928-933.

Johansen, A. 1994. Spatio-temporal self-organization in a model of disease spreading. *Physica D* 78: 186-193.

Loftsgaarden, D. O., and P. L. Andrews. 1992. Constructing and testing logistic regression models for binary data: applications to the national fire danger rating system. *Gen. Tech. Rep. INT-286*, Ogden, UT, USDA For. Serv. 36 p.

Malamud, B. D., and D. L. Turcotte. 1999. Self-organized criticality applied to natural hazards. *Natural Hazards* 20: 93-116.

- Malamud, B. D., G. Morein, and D. L. Turcotte. 1998. Forest fires: an example of self-organized critical behavior. *Science* 281: 1840-1842
- Mills, W. L., and R. S. Meldad. 1987. Measuring wildfire impacts: methods and case study. *Northern J. App. For.* 11(3): 143-147.
- Rodríguez-Trejo, D. A. 1996. *Incendios Forestales*. Universidad Autónoma Chapingo-MundiPrensa. México, D. F. 630 p.
- Sebastian-López, A., J. San-Miguel-Ayanz, and G. Libertà. 2000. An integrated forest fire risk index for Europe, 20th EARSeL Symp: Remote sensing in the 21st century: a decade of trans-European remote sensing cooperation, Dresden, Germany. pp: 137-142.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2005. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. Base de Datos Estadísticos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Pages/sniarn.aspx>
- Tabara, D., D. Sauri, and R. Cerdan. 2003. Forest fire risk management and public participation in changing socioenvironmental conditions: a case study in a Mediterranean region. *Risk Analysis* 22(2): 249-260.
- Truesdale, D. 1995. Fire suppression costs on large fires: A review of the 1994 fire season. Washington, D.C. USDA For. Serv. 60 p.
- Vega-García, C., B. S. Lee, P. M. Woodard, and S. J. Titus. 1996. Applying neural network technology to human caused wildfire occurrence prediction. *AI Applications* 10: 9-18.
- Vega-García, C., P. M. Woodard, S. J. Titus, W. L. Adamowicz, and B. S. Lee. 1995. A logit model for predicting the daily occurrence of human caused forest fires. *Int. J. Wildland Fire* 5: 101-111.
- Viegas, D. X., G. Bovio, A. Ferreira, A. Nosenzo, and B. Sol. 1999. Comparative study of various methods of fire danger en southern Europe. *Int. J. Wildland Fire* 9(4): 235-246.
- Winter G. J., and J. S. Fried. 2001. Estimating contingent values for protection from wildland fire using a two-stage decision framework. *For. Sci.* 47(3): 349-360.