

MODELAJE DEL PELIGRO DE INCENDIO FORESTAL EN LAS ZONAS AFECTADAS POR EL HURACÁN DEAN

MODELING FOREST FIRE DANGER IN THE ZONES AFFECTED BY HURRICANE DEAN

Dante A. Rodríguez-Trejo^{1*}, Hubert Tchikoué¹, Carlos Cántora-González¹,
Rafael Contreras-Aguado², Alfonso de la Rosa-Vázquez³

¹División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Km. 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México. (dantearturo@yahoo.com) (tchikoue@hotmail.com) (c_c_glz@yahoo.com). ²Consultora Forestal. 77028. Donato Guerra 32. Fraccionamiento Plutarco Elías Calles. Chetumal, Quintana Roo. (rcontreag@yahoo.com). ³Campo Experimental Edzna, INIFAP. 24520. Km. 15.5, Carretera Poc-yaxum, Campeche, Campeche. (delarosa.alfonso@inifap.gob.mx).

RESUMEN

Las selvas afectadas por huracanes acumulan grandes cargas de combustibles forestales en corto de tiempo, que junto con el mal uso local del fuego y la sensibilidad de los bosques tropicales, las hacen vulnerables a la ocurrencia de incendios catastróficos. En 2007 el Huracán Dean afectó las selvas de Quintana Roo, Campeche y Yucatán. Con el propósito de generar información útil para formular planes de manejo del fuego en la región por las autoridades estatales y federales, los objetivos de este estudio fueron estimar las cargas de combustibles forestales generadas por el paso del huracán, modelar el peligro de incendio e identificar áreas prioritarias de protección. Se muestrearon 165 conglomerados en Quintana Roo, Campeche y Yucatán, en 2007. El peligro de incendio combinó riesgo (perímetro de áreas agropecuarias) y peligro de incendio forestal (carga de combustibles). Las estimaciones espaciales se hicieron usando modelos multivariados (kriging), con las que se elaboraron mapas en un sistema de información geográfica (SIG). La moda para cargas fue 40-60 Mg ha⁻¹, la media 40 Mg ha⁻¹ y el máximo 137 Mg ha⁻¹. En total 992 000 ha tuvieron peligro muy alto-extremo. Los mayores impactos fueron al este de Quintana Roo y se redujeron hacia el oeste, conforme el huracán perdió fuerza por la fricción con la tierra.

Palabras clave: disturbios, fuego, selvas.

ABSTRACT

Forests affected by hurricanes accumulate large forest fuel loads in a short time that along with the local fire misuse and the sensibility of the tropical forests, make them vulnerable to the occurrence of catastrophic wildfires. In 2007, Dean Hurricane affected Quintana Roo, Campeche and Yucatán forests. In order to generate useful information for developing fire management plans in the region by state and federal authorities, the aim of this study was to estimate forest fuel loads generated by the passage of the hurricane, to model the fire danger and identify priority areas for protection. Samples were collected in 165 conglomerates in Quintana Roo, Campeche and Yucatán in 2007. The fire danger combined risk (perimeter of agricultural areas) and forest fire hazard (fuel load). Spatial estimates were made from multivariate models (kriging), with which maps were drawn in a geographic information system (GIS). Mode for loads was 40-60 Mg ha⁻¹, the average 40 Mg ha⁻¹, and the maximum 137 Mg ha⁻¹. A total of 992 000 ha had very high-extreme hazard. The biggest impacts were at the eastern part of Quintana Roo, and fell to the western part, as the hurricane lost strength by friction with the earth.

Key words: disturbances, fire, tropical forests.

INTRODUCTION

Historically, fuels generated by hurricanes increase fire hazards, as it has happened with Hurricane Carmen (1974), Gilberto (1988), Roxanne (1995), Emily and Wilma (2005) (CONAFOR, 2006)^[4]. Despite hurricanes are common and the widespread effect that these meteors often cause, their impact has been little studied.

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: diciembre, 2010. Aprobado: junio, 2011.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 45: 593-608. 2011.

INTRODUCCIÓN

Históricamente los combustibles generados por huracanes aumentan el peligro de incendio, como ha sucedido con los huracanes Carmen (en 1974), Gilberto (en 1988), Roxanne (en 1995), Emily y Wilma (en 2005) (CONAFOR, 2006)^[4]. A pesar de ser comunes y del extenso efecto que con frecuencia originan estos meteoros, su impacto ha sido poco estudiado.

La interacción entre huracanes e incendios forestales en los bosques tropicales ocurre desde hace millones de años (López *et al.*, 1990; Myers y van Lear, 1998). Si se agrega el efecto de factores antrópicos, como el cambio de uso del suelo y el mal uso del fuego, resulta deforestación y fragmentación en los bosques tropicales, sensibles al fuego. Así, Rodríguez *et al.* (2008) anotan que la superficie de áreas perturbadas o el apoyo financiero al productor agropecuario, entre otros factores, se correlacionan con la superficie afectada por incendios en México.

El 21 de agosto de 2007 el huracán Dean arribó a la costa de Quintana Roo y se dirigió al oeste con una velocidad de 260 km h^{-1} y rachas de hasta 315 km h^{-1} . El meteoro damnificó a la población, incrementó el peligro de incendio, afectó las existencias maderables, los avances en ordenamiento y manejo forestal, proyectos ecoturísticos, plantaciones comerciales, infraestructura de caminos y aserraderos (CONAFOR-SEMARNAT, 2007)^[5]. Las selvas resguardan gran parte de la biodiversidad mundial y de México (Challenger y Soberón, 2008), pero el paso del huracán, el peligro de incendio derivado del mismo y la sensibilidad de estos ecosistemas al fuego, amenazan tal biodiversidad.

El peligro de incendio forestal es resultado de factores constantes y variables que afectan el inicio, la propagación y la dificultad de su control. Entre tales factores destacan topografía, carga de combustibles y tiempo atmosférico (Chandler *et al.*, 1983). La topografía es sensiblemente plana en Quintana Roo, por lo que se consideró que su efecto es relativamente uniforme y no se tomó en cuenta. El huracán Dean produjo distintas acumulaciones de combustibles

Hurricane-fire interactions in tropical forests occur over millions of years (López *et al.*, 1990; Myers and van Lear, 1998). By adding the effect of anthropical factors, such as changing land use and misuse of fire, this results in deforestation and fragmentation in fire-sensitive tropical forests. Thus, Rodríguez *et al.* (2008) point out that the surface of disturbed areas or financial support to agricultural producers, among other factors, are correlated with the surface affected by fires in México.

On August 21, 2007 Hurricane Dean reached the coast of Quintana Roo and headed west with a speed of 260 km h^{-1} and wind gusts of up to 315 km h^{-1} . The hurricane affected the population, increased fire hazard, affected timber stocks, advances in forest management, ecotourism projects, commercial plantations, infrastructure of roads and sawmills (CONAFOR-SEMARNAT, 2007)^[5]. Forests shelter a large part of global and México biodiversity (Challenger and Soberón, 2008), but the passage of hurricane, the fire hazard derived from it and the sensitivity of these ecosystems to fire, threat such biodiversity.

The forest fire danger is result of constant and variable factors affecting the start, propagation and difficult to control it. Such factors include topography, fuel load and weather (Chandler *et al.*, 1983). Topography is substantially flat in Quintana Roo, so it is considered that its effect is relatively uniform and was not taken into account. Hurricane Dean caused various forest fuel accumulations throughout the affected area, and its load itself was considered. Many indices use meteorological variables, but others do not (Pyne *et al.*, 1996). In the present study these variables were not included. The variables related to agricultural activities (43 % of fire causes in México), were included.

To estimate the forest fire danger, the risk factors chosen in one or more numerical or qualitative indices related to the need for protection are integrated (Chandler *et al.*, 1983). Research on estimation of fire hazard in tropical areas affected by hurricanes is very scarce. In the Amazons, Maeda *et*

⁴ CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2006. Evaluación del riesgo de incendios forestales por el huracán "Wilma". 2005, Quintana Roo. CONAFOR. Reporte técnico (inédito).

⁵ CONAFOR-SEMARNAT. 2007. Programa emergente para la prevención y combate de incendios forestales, zona centro-sur del estado de Quintana Roo. Reporte técnico (inédito).

forestales a lo largo y ancho del área afectada, y su carga sí fue contemplada. Muchos índices emplean variables meteorológicas, pero otros no (Pyne *et al.*, 1996). En el presente estudio no se incluyeron dichas variables, pero sí las relativas a actividades agropecuarias (43 % de las causas de incendio en México).

Para estimar el peligro de incendio forestal, se integra los factores de peligro elegidos en uno o más índices numéricos o cualitativos relacionados con la necesidad de protección (Chandler *et al.*, 1983). La investigación sobre estimación de peligro de incendio en áreas tropicales afectadas por huracanes es muy escasa. En el Amazonas, Maeda *et al.* (2011) utilizaron análisis vectorial para estimar el riesgo de incendio forestal con las variables áreas agrícolas y bosque con diferentes niveles de perturbación, o con variables de uso del suelo y su dinámica de cambio, empleando redes neuronales artificiales (Maeda *et al.*, 2009). Para estimar el peligro de incendio en áreas templadas de la Sierra Madre Oriental, México, Muñoz *et al.* (2005) integraron variables de carga de combustibles forestales, meteorológicas y antrópicas usando análisis espacial multicriterio. En zonas templadas de Nueva Inglaterra (EE.UU.), la elevada carga de combustibles acumulada tras el paso de huracanes es el principal factor que incrementa el peligro de incendio (Uriarte y Papaik, 2007).

Por lo anterior, los objetivos del presente estudio fueron: 1) determinar la disposición espacial y patrones de distribución de cargas de combustibles forestales producto del Huracán Dean, 2) evaluar el peligro de incendio, y 3) determinar áreas de protección prioritaria y elaborar la cartografía respectiva. La hipótesis fue que el peligro de incendio forestal aumenta con la carga de combustibles forestales y con el número de áreas agrícolas o su superficie o su perímetro, así como con la densidad o la longitud de caminos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y muestreo de combustibles

El área de trabajo incluyó el centro y sur de Quintana Roo, el este de Campeche y el sur de Yucatán (Figura 1) y el muestreo se hizo al azar, por conglomerados, en el 2007. Cada conglomerado estuvo compuesto por tres líneas principales para muestreo de combustibles leñosos, según Brown (1974), orientadas a 0, 120 y 240° de azimut, y dos cuadros de 0.3×0.3 m para hojarasca y capa de fermentación (Flores *et al.*, 2008).

al. (2011) used vector analysis to estimate the forest fire hazard with the agricultural and forest area variables at different levels of disturbance, or land use variables and its dynamics of change, using artificial neuronal networks (Maeda *et al.*, 2009). To estimate the fire hazard in temperate areas of the Sierra Madre Oriental, México, Muñoz *et al.* (2005) integrated variables of forest fuel load, meteorological and anthropical using multi-criteria spatial analysis. In temperate areas of New England (USA), the highest fuel load accumulated after the passage of hurricanes is the main factor increasing the fire hazard (Uriarte and Papaik, 2007).

Therefore, the objectives of this study were: 1) to determine the spatial arrangement and patterns of distribution of forest fuel loads result of Hurricane Dean, 2) evaluate the danger of fire, and 3) determine priority protection areas and develop the respective mapping. The hypothesis was that the forest fire danger increases with forest fuel loads and the number of agricultural areas or their surface or their perimeter, as well as the density or length of roads.

MATERIALS AND METHODS

Study area and fuel sampling

The study area included the central and southern part of the state of Quintana Roo, eastern Campeche and southern Yucatán (Figure 1) and sampling was carried out at random, by conglomerates, in 2007. Each conglomerate consisted of three main lines for sampling of woody fuels, according to Brown (1974), oriented at 0, 120 and 240° azimuth, and two squares of 0.3×0.3 m for litter and fermentation layer (Flores *et al.*, 2008).

The sampling lines were 14 m long and divided into four segments to measure different types of fuel according to the timelag classes (TL) of woody fuels: 3.5 m (TL=1 h and TL=10 h), 7 m (TL=100 h) and 14 m (TL=1000 h). Samples of litter and fermentation layer were collected, dried in the laboratory and their load was calculated. Samples were collected in 165 conglomerates: 330 sites for litter and fermentation layer and 1980 lines for woody fuel. The sampling intensity corresponded to a line for sampling of woody fuels per each 2803 ha. The center of each conglomerate was geo-referenced with a geopositioner (GPS). The sample was distributed over 1 400 000 ha, obtaining 81, 33 and 41 conglomerates in areas of high, medium and low affected areas, plus 10 next to

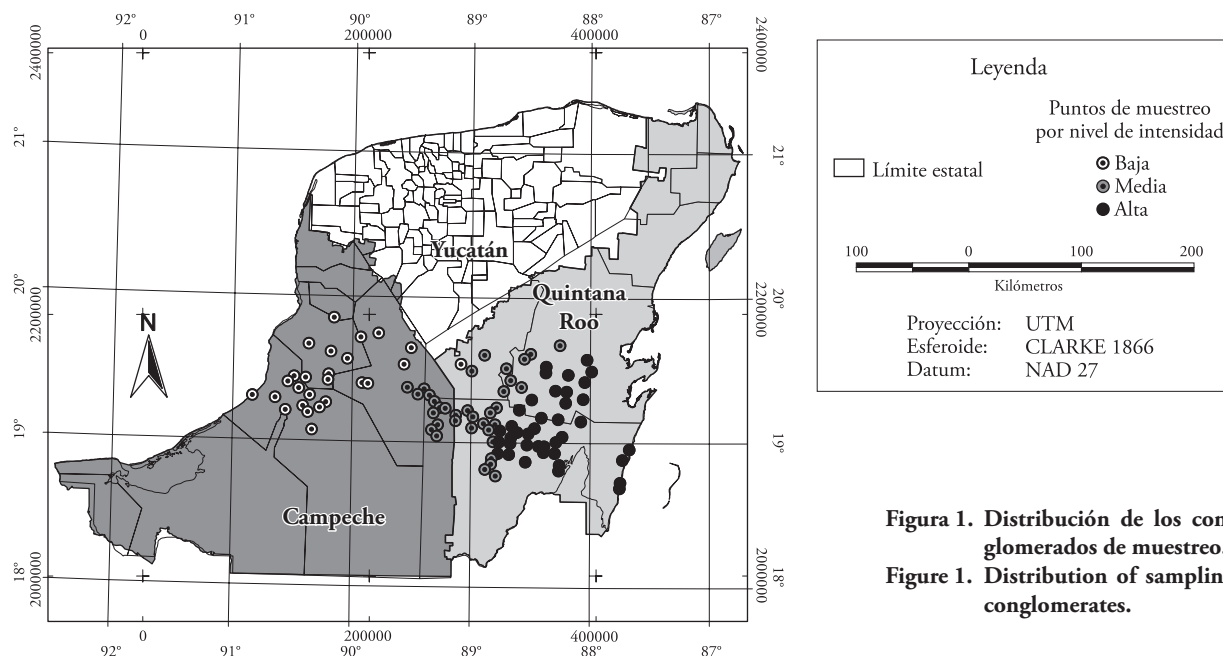


Figura 1. Distribución de los conglomerados de muestreo.
Figure 1. Distribution of sampling conglomerates.

Las líneas de muestreo tuvieron 14 m de longitud y se dividieron en cuatro segmentos para medir diferentes tipos de combustible, según el tiempo de retardo (TR) de los combustibles leñosos: 3.5 m (TR=1 h y TR=10 h), 7 m (TR=100 h) y 14 m (TR=1000 h). Las muestras de hojarasca y capa de fermentación se recolectaron, se secaron en laboratorio y se calculó su carga. Se muestrearon 165 conglomerados: 330 sitios para hojarasca y capa de fermentación y 1980 líneas para combustibles leñosos. La intensidad de muestreo correspondió a una línea para muestreo de combustibles leñosos por cada 2803 ha. El centro de cada conglomerado fue georreferenciado con un geoposicionador (GPS). La muestra se distribuyó sobre 1 400 000 ha, obteniendo 81, 33 y 41 conglomerados en áreas de afectación alta, media y baja, más 10 colindantes con el área afectada. Los niveles de afectación fueron determinados por CONAFOR-SEMARNAT (2007)^[5], según el impacto en la cobertura de copas mediante recorridos aéreos: afectación baja cuando la cobertura se redujo en 30 % o menos, media con 30.1-60 % y alta con >60 %. Las clases de cargas de combustibles forestales establecidas fueron: <20, 20-39.9, 40-59.9, 60-79.9, 80-99.9 y $\geq 100 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Índice de peligro de incendio forestal (IPIF)

El modelo de peligro de incendio forestal fue definido por un componente de riesgo (factores que causan el fuego) y otro de peligro (los que facilitan su inicio y desarrollo). Dado que las actividades agropecuarias son la causa más importante

the affected area. The levels of damage were determined by CONAFOR-SEMARNAT (2007)^[5], according to the effects on canopy cover by air inspection: low affected area when the coverage was reduced 30 % or less, medium with 30.1-60 % and high with >60 %. The types of forest fuel loads established were: <20, 20-39.9, 40-59.9, 60-79.9, 80-99.9 and $\geq 100 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Forest fire danger index (FFDI)

The model of forest fire danger was defined by an element of risk (factors that cause the fire) and other of danger (which facilitate fire start and development). Since agricultural activities are the major cause of forest fires in the study area (CONAFOR, 2009)^[6] and in Chiapas there is a relationship between the area affected by fire and road density (Cuesta and Martínez, 2006), the variables for the component of risk were chosen (Table 1). These variables were used because with a greater number of agricultural lands, area or perimeter would be more likely that some agricultural burning escape to the forest. In the case of roads, it is logical that a greater access increases the likelihood of fires by campfires, cigarette butts, burning of rights-of-way or by intention.

The variables of Table 1 were observed in digital mapping of land uses of INEGI (2004) in 5×5 km squares (2500 ha), whose center corresponded to the coordinates of the conglomerates sampled. It was also counted the number of day hotspots per year and the day hotspots total for the period 2003-2007 within the squares, from digital maps (shapefile

de incendios forestales en el área de estudio (CONAFOR, 2009)^[6] y que en Chiapas hay relación entre la superficie afectada por el fuego y la densidad de caminos (Cuesta y Martínez, 2006), se eligieron las variables para el componente de riesgo (Cuadro 1). Estas variables se usaron porque con un mayor número de terrenos agropecuarios, área o perímetro, sería más probable que alguna quema agropecuaria escape hacia la selva. En el caso de los caminos, es lógico que un mayor acceso aumente la probabilidad de incendios por fogatas, colillas, quema de derechos de vía o por intención.

Las variables del Cuadro 1 se observaron en cartografía digital de usos del suelo de INEGI (2004) en cuadros de 5×5 km (2500 ha), cuyo centro correspondió a las coordenadas de los conglomerados muestreados. Además se contabilizó el número de puntos de calor diurnos por año y el total de puntos de calor para el periodo 2003-2007, dentro de los cuadros, a partir de una cartografía digital (formato shapefile) proporcionada directamente por la Comisión Nacional para la Biodiversidad (CONABIO).

La presencia/ausencia de puntos de calor en los cuadros referidos y las demás variables consideradas permitieron correr modelos logísticos (Hosmer y Lemeshow, 2000) con el procedimiento Logistic del programa SAS para microcomputadoras (v. 9.0) (SAS Institute, 2002), para obtener probabilidad de ocurrencia de incendio (P) y elegir los modelos significativos. Tal probabilidad no es predictiva, pero relaciona estadísticamente las áreas de mayor ocurrencia de 2003 a 2007 con las variables explicatorias elegidas. Después de correr pruebas con las variables y sus combinaciones, se obtuvo la siguiente expresión con el perímetro de áreas agropecuarias (X_1 , en km), la única variable que resultó significativa (componente de riesgo):

$$P = 1 / (1 + e^{-(0.9069 + 0.2096 X_1)}) \quad (1)$$

El modelo fue significativo ($p \leq 0.0001$), al igual que el intercepto y la variable explicatoria ($p = 0.0228$ y $p \leq 0.0001$). Razón

format) directly provided by the National Commission for Biodiversity (CONABIO).

The presence/absence of hotspots in the squares referred to and the other variables considered allowed to run logistic models (Hosmer and Lemeshow, 2000) with the Logistic procedure of the SAS program for microcomputers (V.9.0) (SAS Institute, 2002), to obtain probability of fire occurrence (P) and choose the significant models. This probability is not predictive, but statistically relates the areas of higher occurrence from 2003 to 2007 with the explanatory variables chosen. After running the tests with the variables and their combinations, the following expression was obtained with the perimeter of agricultural areas (X_1 , in km), the only variable that became significant (risk component):

$$P = 1 / (1 + e^{-(0.9069 + 0.2096 X_1)}) \quad (1)$$

The model was significant ($p \leq 0.0001$), as the intercept and the explanatory variable ($p = 0.0228$ and $p \leq 0.0001$). Odds ratio = 1.23, confidence interval (95 %) of 1.14 to 1.34, concordance = 89.8 % (Figure 2).

For the danger component (Pe) it was empirically taken into account the proportion of the load of a given conglomerate with regard to the maximum load of fuel:

$$Pe = C / CM \quad (2)$$

where C = total load of fuels in the conglomerate (Mg ha^{-1}); CM = maximum load found in the sampling (Mg ha^{-1}).

While the light fuels tend to govern the behavior of fire, it is also true that they break down quickly, and the increase caused by the hurricane will last a little while. In contrast the total load is more representative of the accumulation of fuel over several years, as the wood takes longer to decompose. In order to be valid the use of the fire danger index for several years, the total fuel load was used in its estimation.

Cuadro 1. Variables explicatorias elegidas.

Table 1. Selected explanatory variables.

Peligro	Riesgo
Carga total de combustibles forestales	Número de áreas agrícolas o pecuarias por cuadro de 5×5 km Área de áreas agrícolas o pecuarias por cuadro de 5×5 km Perímetro de áreas agrícolas o pecuarias por cuadro de 5×5 km Densidad de caminos (número de ramales ha^{-1}) por cuadro de 5×5 km Longitud de caminos (km/ha) por cuadro de 5×5 km

⁶ CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2009. Reporte de incendios forestales. CONAFOR. Folleto.

de momios = 1.23, intervalo de confianza (al 95 %) de 1.14 a 1.34, concordancia = 89.8 % (Figura 2).

Para el componente de peligro (Pe), de manera empírica se tomó en cuenta la proporción que la carga de un conglomerado dado representa con respecto a la carga máxima de combustibles:

$$Pe = C / CM \quad (2)$$

donde, C = carga total de combustibles en el conglomerado (Mg ha^{-1}); CM = carga máxima hallada en el muestreo (Mg ha^{-1}).

Si bien los combustibles ligeros tienden a gobernar el comportamiento del fuego, también es cierto que se descomponen rápidamente, y su aumento originado por el huracán durará poco tiempo. En cambio, la carga total es más representativa de la acumulación de combustibles a lo largo de varios años, pues la madera tarda más en descomponerse. Para que el índice de peligro de incendios sea válido durante varios años, se usó la carga total de combustibles en su estimación.

El peligro de incendio forestal (PI) propuesto se estableció como un promedio del componente de riesgo (P) y del componente de peligro (Pe):

$$PI = ((P + Pe) / 2)(100) \quad (3)$$

Finalmente, el índice de peligro de incendio forestal ($IPIF$), se ajustó a 100 % como valor máximo mediante una proporción, de tal forma que el máximo hallado de entre todos los conglomerados muestreados fue 100, mientras que el mínimo fue 22:

$$IPIF = (PI / \text{Máx } PI) (100) \quad (4)$$

donde, Máx PI = máximo peligro de incendio registrado.

Las clases del $IPIF$ consideradas fueron: bajo (<40), medio-bajo (40-49.9), medio (50-59.9), alto (60-69.9), muy alto (70-79.9) y extremo (≥ 80). En la definición de estas clases influyeron los valores mínimo y máximo de $IPIF$ obtenidos, así como el número de categorías de peligro que usa el sistema canadiense (Van Wagner y Pickett, 1985; Arnaldos *et al.*, 2004).

Para definir las áreas prioritarias de protección se consideró el valor del peligro de incendio, además de variables subjetivas típicas en la literatura (Pyne *et al.*, 1996) para determinar este tipo de áreas, en este caso: la presencia de asentamientos humanos dentro del cuadro de 5×5 km (debido al peligro que puede representar el fuego para las poblaciones), áreas bajo aprovechamiento forestal (muchas de las zonas afectadas por el huracán estaban bajo aprovechamiento) y reservas de la biosfera (por su relevancia para la conservación de la biodiversidad).

The forest fire danger (PI) proposed was established as an average of the risk component (P) and of the danger component (Pe):

$$PI = ((P + Pe) / 2)(100) \quad (3)$$

Finally, the forest fire danger index ($IPIF$), was adjusted to 100 % as maximum value by a proportion, so that the maximum found among all sampled conglomerates was 100, while the minimum was 22:

$$IPIF = (PI / \text{Máx } PI) (100) \quad (4)$$

where Max PI = maximum fire danger recorded.

The classes of the $IPIF$ considered were: low (<40), medium low (40-49.9), medium (50-59.9), high (60-69.9), very high (70-79.9) and extreme (≥ 80). In the definition of these classes influenced the minimum and maximum $IPIF$ obtained, and the number of categories of danger that the Canadian system uses (Van Wagner and Pickett, 1985; Arnaldos *et al.*, 2004).

To define priority areas for protection the value of fire danger is considered as well as subjective variables typical in the literature (Pyne *et al.*, 1996) to determine these areas, in this case: the presence of human settlements within the square of 5×5 km (because of the danger that fire may represent for the populations), areas under logging (much of hurricane-affected areas were in use) and biosphere reserves (for its relevance for the conservation of biodiversity).

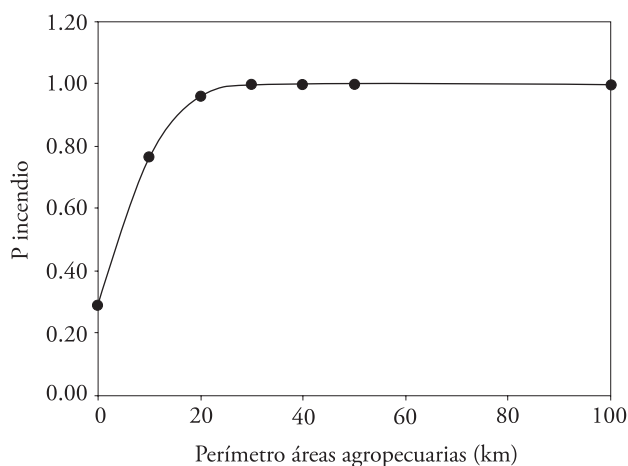


Figura 2. Probabilidad de presencia de puntos de calor (incendios forestales) como función del perímetro de las áreas agropecuarias.

Figure 2. Probability of presence of hotspots (forest fires) as a function of the perimeter of the agriculture/livestock areas.

Análisis espacial y elaboración de mapas

Para modelar el comportamiento de la carga de combustibles y del índice de peligro de incendio forestal, se efectuó un análisis estadístico espacial usando las coordenadas de cada sitio de muestreo, así como varias respuestas asociadas a cada sitio. Se consideró de interés la predicción de la variable respuesta de interés, en puntos no muestreados, mediante la técnica geo-estadística de krigado (kriging) (Cressie, 1993; Ripley, 1981). La razón de usar esta técnica y no métodos elementales como distancia inversa o alguna de sus variantes, es que el krigado es un método de predicción óptima con sustento teórico sólido (Cressie, 1993), que permite efectuar predicciones de la respuesta en puntos no observados, así como estudiar el posible efecto de covariables sobre tales predicciones.

El análisis espacial preliminar consideró un análisis del variograma, definido por $2\gamma(\mathbf{h}) = \text{Var}(Z(s + \mathbf{h}))$, donde s es el punto asociado a coordenadas espaciales dadas y $\mathbf{h}$ es un vector que representa un punto específico en el espacio de interés. Para seleccionar un semi-variograma teórico, $\gamma(\mathbf{h})$, que representara la tendencia muestral, se analizó el semivariograma empírico robusto (Cressie, 1993), el cual se calculó con base en los datos observados. A partir de tal información se eligió el semi-variograma exponencial como modelo teórico.

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} 0, & \mathbf{h} = 0 \\ \theta_0 + \theta_1 (1 - \exp(-3\|\mathbf{h}\|/\alpha)), & \mathbf{h} \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

En la expresión anterior θ_j y α son parámetros, $j = 1, 2$ y la variable respuesta es el valor del semi-variograma empírico; la estimación de los parámetros del semi-variograma teórico se efectuó mediante mínimos cuadrados no lineales.

Para el presente caso, la variable respuesta de interés, digamos Z , representa una de dos variables específicas: el índice de peligro calculado para el sitio con longitud X y latitud Y , o bien la carga total de combustibles correspondiente a tal sitio. Usando como respuesta los valores del índice de peligro, se obtuvieron las estimaciones $\hat{\theta}_0 = 159.6$, $\hat{\theta}_1 = 93.41$ y $\hat{\alpha} = 2.798$, pseudo- $R^2 = 0.92$. Para decidir si existía componente de tendencia en los valores del índice, y la subsecuente necesidad de eliminar tal componente de tendencia se estimó un modelo de regresión cuadrático en las coordenadas, usando el índice de peligro como variable respuesta. Los resultados muestran que no existe efecto de tendencia significativo para tales datos ($\hat{\alpha} = 0.72$) por lo que se efectuó un krigado ordinario. El error estándar residual, obtenido de la estimación asumiendo un proceso estocástico Gaussiano estacionario de segundo orden, fue 2.052 unidades del índice.

Con respecto a la variable carga total, el semi-variograma teórico sugerido por los datos también fue el exponencial; en

Spatial analysis and mapping

To model the behavior of the fuel load and the forest fire danger index, a spatial statistical analysis was carried out using the coordinates of each sampling site, as well as a number of responses associated to each site. It was considered of interest the prediction of the response variable of interest, in non-sampled points, using the geo-statistics technique of kriging (Cressie, 1993; Ripley, 1981). The reason for using this technique and not basic methods such as inverse distance or some of its variants, is that kriging is an optimal prediction method with strong theoretical support (Cressie, 1993), which allows for predictions of the response in points not observed, as well as to study the possible effect of covariates on such predictions.

The preliminary spatial analysis considered an analysis of the variogram, defined by $2\gamma(\mathbf{h}) = \text{Var}(Z(s + \mathbf{h}))$, where s is the point associated to spatial coordinates given and $\mathbf{h}$ is a vector representing a specific point in the space of interest. To select a theoretical semi-variogram, $\gamma(\mathbf{h})$, representing the sample trend, the robust empirical semi-variogram was analyzed (Cressie, 1993), which was calculated based on the observed data. From such information the exponential semi-variogram was selected as a theoretical model.

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} 0, & \mathbf{h} = 0 \\ \theta_0 + \theta_1 (1 - \exp(-3\|\mathbf{h}\|/\alpha)), & \mathbf{h} \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

In the previous expression θ_j and α are parameters, $j = 1, 2$ and the response variable is the value of the empirical semi-variogram; the estimation of the parameters of the theoretical semi-variogram was performed by nonlinear least squares.

For this case, the response variable of interest, say Z , represents one of two specific variables; the danger index calculated for the site with longitude X and latitude Y or the total fuel load for that site. Using as response the values of the danger index, the following estimations were obtained $\hat{\theta}_0 = 159.6$, $\hat{\theta}_1 = 93.41$ and $\hat{\alpha} = 2.798$, pseudo- $R^2 = 0.92$. To decide whether there was trend component in the index values and the subsequent need to eliminate this trend component it was estimated a quadratic regression model in the coordinates, using the danger index as the response variable. The results show that there is no significant trend effect for such data ($\hat{\alpha} = 0.72$) so an ordinary kriging was utilized. The residual standard error, obtained from the estimation assuming a Gaussian stationary stochastic process of second order, was 2.052 units of the index.

With respect to the total load variable, the theoretical semi-variogram suggested by the data was also the exponential; in this

este caso las estimaciones fueron $\hat{\theta}_0 = 435.2$, $\hat{\theta}_1 = 989.5$, $\hat{\alpha} = 8.2506$ y $\text{pseudo-R}^2 = 0.94$. El efecto de tendencia en las coordenadas fue no significativo ($\hat{\alpha} = 0.84$), y debido a esto también se utilizó un krigado ordinario para predecir esta variable respuesta. El error estándar residual obtenido de la estimación fue 3.04 unidades de carga total.

Aunque en ocasiones se realizan particiones del conjunto de observaciones y con base en éstas se hacen predicciones que permiten la validación cruzada, aún hay controversia de la validez de tales técnicas bajo algunas estructuras de autocorrelación (Cressie, 1993). Así, en este caso se consideraron criterios suficientes la optimalidad predictiva del krigado y el ajuste satisfactorio de los semi-variogramas muestrales. Las Figuras 3 y 4 muestran los semi-variogramas estimados.

Las estimaciones requeridas se efectuaron usando funciones escritas por el usuario en el programa S-Plus y usando el módulo Spatial Statistics V 1.5 (Insightful Corporation, 2002). La sistematización de datos de los sitios de muestreo se realizó con el SIG Arc View (v. 3.2, Environmental Systems Research Institute, 1999), para obtener mapas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La superficie afectada a distintas intensidades fue: 1 278 589 ha (alta intensidad), 986 979 ha (media) y 2 788 971 ha (baja); 5 054 539 ha en total. La selva mediana subperennifolia tuvo 840 620 ha de alta afectación, por su amplia extensión donde el huracán causó los mayores impactos, en la región este de la Península de Yucatán.

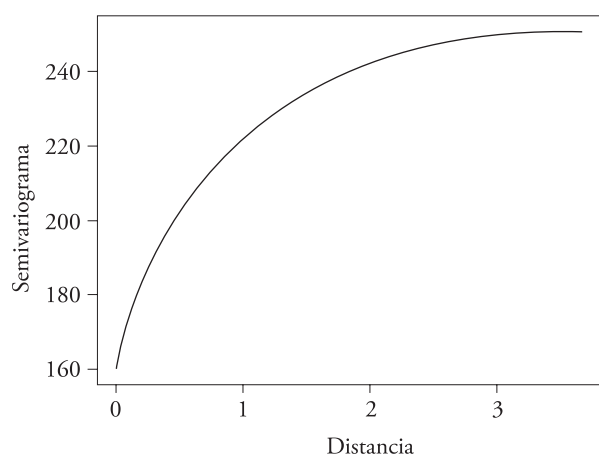


Figura 3. Semivariograma estimado para la variable índice de peligro.

Figure 3. Semi-variogram estimated for the danger index variable.

case the estimates were $\hat{\theta}_0 = 435.2$, $\hat{\theta}_1 = 989.5$, $\hat{\alpha} = 8.2506$ and $\text{pseudo-R}^2 = 0.94$. The effect of trend in the coordinates was not significant, ($\hat{\alpha} = 0.84$), and because of this it was also used an ordinary kriging to predict this response variable. The residual standard error obtained from the estimation was 3.04 units of total load.

Although sometimes partitions of the set of observations are carried out and based on these partitions, predictions are made that allow cross-validation, there is still controversy as to the validity of such techniques in some structures of autocorrelation (Cressie, 1993). So in this case sufficient criteria were considered the predictive optimality of kriging and the satisfactory adjustment of the sample semi-variogramas. Figures 3 and 4 show the estimated semi-variogramas.

The required estimations were done using functions written by the user in the program S-Plus and using the module Spatial Statistics V 1.5 (Insightful Corporation, 2002). Data systematization of the sampled sites was performed with the SIG Arc View (v. 3.2, Environmental Systems Research Institute, 1999), to obtain maps.

RESULTS AND DISCUSSION

The area affected at different intensities was: 1 278 589 ha (high intensity), 986 979 ha (medium intensity) and 2 788 971 ha (low intensity); 5 054 539 ha in total. The medium semi-evergreen tropical forest had 840 620 ha of high damage, for its wide extension where the hurricane cause the greatest impact, in the eastern region of the Yucatán peninsula.

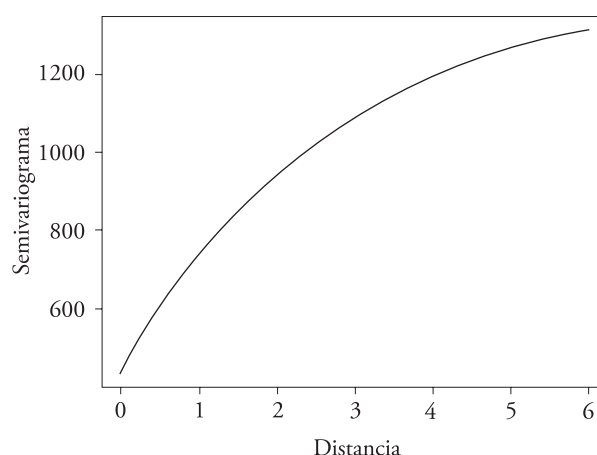


Figura 4. Semi-variograma estimado para la variable carga total.

Figure 4. Semi-variogram estimated for the total load variable.

Carga de combustibles forestales

La categoría de carga más común fue del intervalo 20 a 40 Mg ha⁻¹ (2 200 000 ha; 43.1 % de la superficie), seguida por las clases de 40 a 60 Mg ha⁻¹ (1 200 000 ha; 22.9 %) y <20 Mg ha⁻¹ (1 400 000 ha; 28.1 %) (Cuadro 2). Las mayores cargas (>60 Mg ha⁻¹) se observaron en Quintana Roo, en selvas medianas (Cuadro 2), en áreas de importancia forestal o de conservación, como la Organización de Productores Canan ka'achx y parte de la Reserva Xian Kaan (Figura 5), destacando así la necesidad de protegerlas. La carga media fue 40.4 Mg ha⁻¹ (máximo 137 y mínimo 10.9 Mg ha⁻¹). La máxima se observó en selva mediana subperennifolia y fue menor al máximo de 179.1 Mg ha⁻¹ referido por CONAFOR *et al.* (2005)^[7] en áreas afectadas por el Huracán Wilma en 2005, aunque este último usó muestreo selectivo. Los combustibles leñosos con un TR de 1000 h representaron casi 30 % de la carga media (11.994 Mg ha⁻¹), en tanto que el total de los combustibles leñosos alcanzó casi 64 %.

En bosques tropicales húmedos no perturbados, 24.7 % de la carga correspondió a combustibles con TR de 1000 h, en tanto que 36.9 % fue hojarasca y capa de fermentación (Gould *et al.*, 2008). Estas proporciones son semejantes a las halladas en el

Forest fuel load

The most common load category was in the range 20 to 40 Mg ha⁻¹ (2 200 000 ha; 43.1 % of the surface) followed by classes from 40 to 60 Mg ha⁻¹ (1 200 000 ha; 22.9 %) and <20 Mg ha⁻¹ (1 400 000 ha; 28.1 %) (Table 2). The higher loads (>60 Mg ha⁻¹) were observed in Quintana Roo, in medium tropical forests (Table 2), in areas of forest importance or conservation areas such as the Organization of Producers of Canan ka'achx and part of the Xian Kaan Reserve (Figure 5), emphasizing thus the need to protect them. The average load was 40.4 Mg ha⁻¹ (maximum 137 and minimum 10.9 Mg ha⁻¹). The maximum was observed in a semi-evergreen forest and was less than the maximum of 179.1 Mg ha⁻¹ referred to by CONAFOR *et al.* (2005)^[7] in areas affected by Hurricane Wilma in 2005, although the latter used selective sampling. The woody fuels with a TL of 1000 h accounted for almost 30 % of the average load (11.994 Mg ha⁻¹), while the total wood fuels reached almost 64 %.

In undisturbed tropical rain forests, 24.7 % of the load corresponded to fuels with TL of 1000 h, while 36.9 % was litter and fermentation layer (Gould *et al.*, 2008). These percentages are similar to those found in this study. The proportion of fuels

Cuadro 2. Superficie (ha) por categoría de carga de combustibles y tipo de vegetación.
Table 2. Area (ha) by category of fuel loads and vegetation type.

Vegetación	Carga de combustibles forestales (Mg ha ⁻¹)						Total por vegetación
	< 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100	>100	
Manglar	815.8	1820.9	105 829.5	12 098.4	5119.4		125 683.9
Palmar		3012.2					3012.2
Pastizal cultivado	183 173.8						183 173.8
Pastizal inducido	23 510.2						23 510.2
Sabana	3631.9	6082.0					9713.8
Selva baja caducifolia	72 771.2						72 771.2
Selva baja subcaducifolia			1167.9	9343.4	14 114.0		24 625.3
Selva baja subperennifolia	116 711.0	451 685.1	177 213.9	20 957.9	3317.2		769 885.1
Selva mediana subcaducifolia	534 596.7	458 438.2	32 911.0	2768.8			1 028 714.7
Selva mediana subperennifolia	352 048.9	1 254 886.6	839 637.5	192 424.2	39 963.6	2591.27	2 681 552.1
Tular	130 895.8						130 895.8
Total por intervalo de carga	1 418 155.2	2 175 924.9	1 156 759.8	237 592.7	62 514.2	2591.27	5 053 538.1
%	28.1	43.1	22.9	4.7	1.2	0.05	100.0

⁷ CONAFOR, SEMARNAT, CONANP, USDA FS, TNC, PRONATURA. 2005. Evaluación del riesgo de incendios forestales por el Huracán Wilma. Reporte inédito.

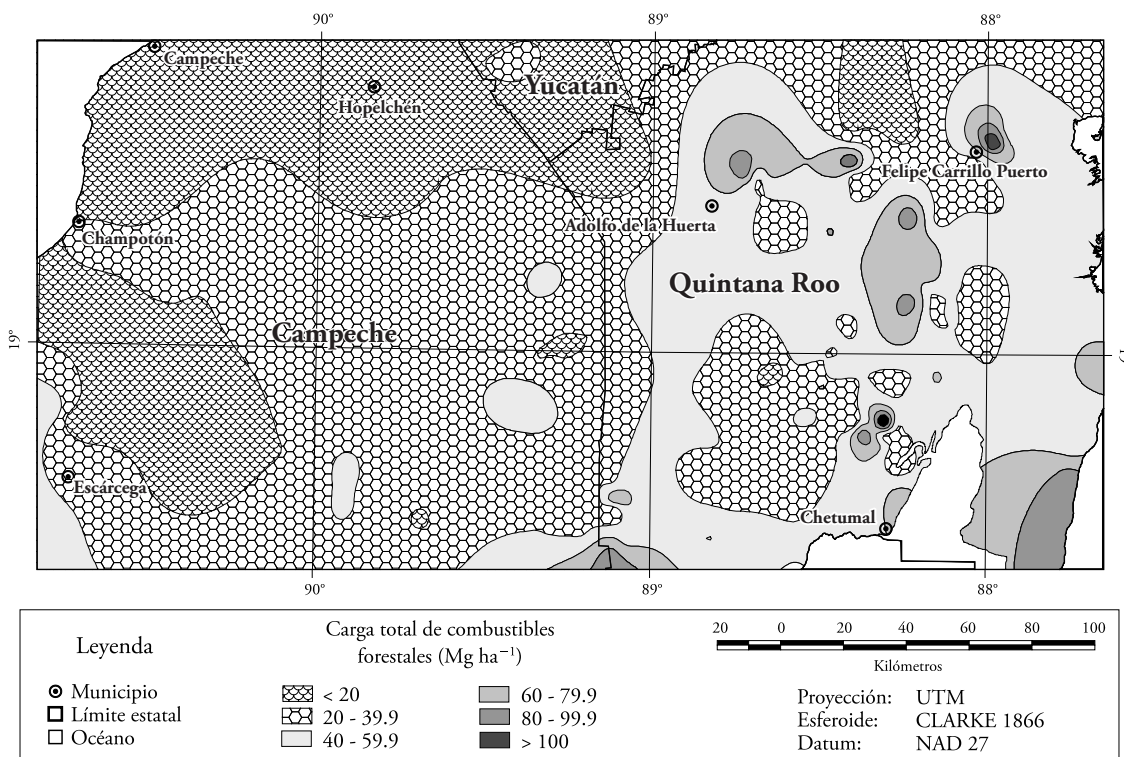


Figura 5. Mapa de cargas de combustibles forestales.

Figure 5. Map of loads of forest fuels.

presente estudio. La proporción de combustibles con TR 1000 h no exhibió cambios importantes en los distintos niveles de afectación. Los promedios de la proporción de combustibles con TR 1000 h fueron 29.2, 28.9 y 27.1 % para las intensidades alta, media y baja. A su vez, la proporción de hojarasca y capa de fermentación fue 38.3, 39.0 y 30.7 %, con lo que todos estos combustibles mantienen su proporción a distintos niveles de afectación aunque su carga sí cambie (Cuadro 3).

Cargas por tipo de vegetación

En las zonas de alta afectación la selva mediana subperennifolia tuvo una carga media de 49.6 Mg ha^{-1} , mayor que en la selva baja subperennifolia (38.6 Mg ha^{-1}). La máxima carga (137 Mg ha^{-1}) correspondió a selva mediana con afectación alta (Cuadro 3). La carga media entre tipos de vegetación en la zona de alto impacto fue 48.8 Mg ha^{-1} . Respecto a zonas de afectación media, la selva mediana subcaducifolia (38.3 Mg ha^{-1}) y la mediana subperennifolia (38.2 Mg ha^{-1}) superaron a la selva baja subperennifolia (34.8 Mg ha^{-1}). En este nivel

with TL 1000 h showed no significant changes in the different levels of damage. The average ratios of fuel with TL 1000 h were 29.2, 28.9 and 27.1 % for high, medium and low intensities. In turn, the litter and fermentation layer ratio was 38.3, 39.0 and 30.7 %, with what all of these fuels maintain their ratio to different levels of damage although does change its load (Table 3).

Loads per vegetation type

In areas of high damage the semi-evergreen tropical forest had a medium load of 49.6 Mg ha^{-1} , higher than the low-evergreen tropical forest (38.6 Mg ha^{-1}). The maximum load (137 Mg ha^{-1}) corresponded to medium forest tropical which was highly affected (Table 3). The medium load between types of vegetation in the area of high impact was 48.8 Mg ha^{-1} . With regard to areas of medium damage, the medium sub-deciduous tropical forest (38.3 Mg ha^{-1}) and the semi-evergreen tropical forest (38.2 Mg ha^{-1}) exceeded the low semi-evergreen tropical forest (34.8 Mg ha^{-1}). In this level of damage, the

Cuadro 3. Cargas de combustibles forestales (Mg ha^{-1}) por nivel de afectación del huracán.
Table 3. Forest fuel loads (Mg ha^{-1}) by level of affected areas by hurricane.

Combustibles	Baja			Media			Alta		
	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo
1 h	1.325	2.304	0.225	1.764	5.845	0.000	2.100	6.322	0.014
10 h	3.585	8.802	0.391	3.307	6.063	0.000	4.691	16.626	0.000
100 h	6.476	28.315	0.000	7.188	43.808	0.000	9.136	55.027	0.534
1,10,100 h	11.022	33.534	0.000	10.310	56.484	0.000	13.994	68.563	0.000
1000 h F	3.405	26.489	0.000	7.197	36.067	0.000	8.906	47.626	0.000
1000 h P	3.891	39.225	0.000	3.857	17.782	0.000	5.441	42.492	0.000
1000 h F+P	7.297	56.708	0.000	11.054	36.945	0.000	14.347	76.165	0.000
Leñosos totales	18.682	72.411	4.102	23.313	78.200	0.000	30.274	121.160	0.548
Hojarasca	2.327	6.811	0.023	4.015	10.030	0.481	5.646	17.021	0.407
Capa de fermentación	5.943	28.625	0.149	10.887	31.815	1.852	13.143	53.891	1.926
Carga total	26.952	83.760	10.880	38.215	94.677	11.099	49.063	137.002	13.696

F = firmes; P = en descomposición ♦ F = solid; P = in decomposition.

de afectación, la carga máxima fue 84.7 Mg ha^{-1} en selva mediana subperennifolia y la media entre tipos de vegetación fue 38.2 Mg ha^{-1} . Para las áreas con baja afectación, la selva baja subperennifolia mostró el mayor promedio (37.4 Mg ha^{-1}), seguida por la mediana subperennifolia (33.7 Mg ha^{-1}) y la mediana subcaducifolia (16.2 Mg ha^{-1}). La carga media en este nivel de afectación fue 29.5 Mg ha^{-1} . Similarmente, Rodríguez *et al.* (1989) refieren que la carga aumentó en tipos de vegetación con más biomasa, como las selvas altas y medianas, luego del paso del huracán Gilberto.

Las medias de 49.6 , 38.2 y 33.7 Mg ha^{-1} , para los niveles de afectación alto a bajo en selva mediana subperennifolia ($2\,700\,000 \text{ ha}$ afectadas), son superiores a las cargas reportadas por Gould *et al.* (2008) de 27.9 Mg ha^{-1} y 19.7 Mg ha^{-1} en bosques tropicales húmedos y en los secos, ambos no perturbados.

Análisis por clase de combustibles

Con base en las estimaciones (superficies de respuesta) de los combustibles forestales (no mostradas), la hojarasca y la capa de fermentación exhiben sus mayores valores hacia el noreste y el sureste de la zona estudiada. De los materiales leñosos con 1 h de TR, las mayores cargas se aprecian en los sectores sureste y centro-este de la zona de mayor afectación (este). La distribución de estos materiales finos es relevante porque, según Pyne *et al.* (1996), controlan la dirección de propagación del fuego. Además,

maximum load was 84.7 Mg ha^{-1} in the semi-evergreen tropical forest and the average between types of vegetation was 38.2 Mg ha^{-1} . For areas with low damage, the low semi-evergreen tropical forest showed the highest average (37.4 Mg ha^{-1}) followed by the medium semi-evergreen tropical forest (33.7 Mg ha^{-1}) and the medium semi-deciduous tropical forest (16.2 Mg ha^{-1}). The average load in this level of damage was 29.5 Mg ha^{-1} . Similarly, Rodríguez *et al.* (1998) report that the load increased in vegetation types with more biomass, as high and medium tropical forests, after the passage of Hurricane Gilbert.

The means of 49.6 , 38.2 and 33.7 Mg ha^{-1} , for the levels of high to low affected areas in medium semi-evergreen tropical forest ($2\,700\,000 \text{ ha}$ affected), are higher than the loads reported by Gould *et al.* (2008) of 27.9 Mg ha^{-1} and 19.7 Mg ha^{-1} in rainforests and seasonal tropical forests both undisturbed forests.

Analysis by type of fuels

Based on the estimates (response surfaces) of forest fuels (not shown), litter and fermentation layer show their highest values to the northeast and southeast of the studied area. Of woody materials with 1 h of TL, the highest loads are seen in the southeast and east-central sectors of the most affected area (east). The distribution of these fine materials is relevant because according to Pyne *et al.* (1996), control the direction of fire spread. Moreover, the

el patrón y características de combustibles como hojarasca y capa de fermentación, influyen en la probabilidad de incendios subterráneos, los que emiten más partículas suspendidas a la atmósfera (Cochrane y Ryan, 2009). La capa de fermentación tarda más que la hojarasca en iniciar su combustión, pero libera más energía y hace más severos los incendios subterráneos, comparados con los superficiales (Neri *et al.*, 2008). Los incendios subterráneos son difíciles de combatir y con frecuencia imparables. Los combustibles con 10 h de TR tuvieron una tendencia similar a los de 1 h de TR. La mayor concentración de combustibles con 100 h de TR está en la porción NE y en la centro-este. En análisis combinado de combustibles de 1-100 h de TR, la tendencia de los de 100 h prevalece.

Hay cargas altas de combustibles leñosos con TR de 1000 h desde la costa hasta los límites de Yucatán y Campeche, por la pérdida de fuerza del huracán. Con materiales más pesados como estos últimos, el fuego adquiere mayor intensidad, lo que dificulta el control (Pyne *et al.*, 1996), además cuentan con mayor tiempo de residencia. Finalmente, la carga total muestra una tendencia semejante a la anterior. Para todos los combustibles leñosos, hay picos intercalados entre partes más o menos planas u onduladas. Este comportamiento, y la relativa escasez de combustibles con TR de 1 y 10 h al NE y una relativamente menor presencia de combustibles con TR de 100 h al SE, obedecen a distintos efectos del huracán en regiones con diferentes tipos y proporciones de selvas y usos de suelo.

Peligro de incendio forestal

El peligro de incendio fue alto en 2 400 000 ha (46 % de la superficie), muy alto en 906 000 ha (17 %), y extremo en 85 923 ha (1.6 %). En Campeche influye más el riesgo de incendio por igniciones agropecuarias, pero en Quintana Roo hay peligro y riesgo por la acumulación de combustibles y la presencia de agostaderos y áreas agrícolas. Considerando sólo selvas medianas en Quintana Roo, 1 800 000 ha tuvieron peligro de alto a extremo; el peligro es mayor al E (Figura 6). Los vientos del SE dominantes en la primavera (Suárez y Rivera, 1998), la temporada de incendios, implican peligro adicional pues dirigirán los incendios a áreas con más combustibles.

pattern and characteristics of fuels such as litter and layer of fermentation influence the likelihood of underground fires, which emit more particulate matter into the atmosphere (Cochrane and Ryan, 2009). The fermentation layer takes longer than litter to start burning, but it releases more energy and makes more severe underground fires, compared to surface fires (Neri *et al.*, 2008). The underground fires are difficult to control and often they are unstoppable. Fuels with 10 h of TL had a trend similar to the 1 h of TL. The highest concentration of fuels with 100 h of TL is at NE and Central-East sections. In combined analysis of fuels of TL 1-100 h the trend of 100 h prevails.

There are high loads of woody fuels with TL of 1000 h from the coast to the borders of Yucatán and Campeche, due to the loss of strength of the hurricane. With heavier materials like the latter, the fire becomes more intense, making it difficult to control (Pyne *et al.*, 1996), also they are those that have longer residence time. Finally, the total load shows a similar trend to the previous one. For all woody fuels, there are peaks interspersed between parts more or less flat or wavy. This trend and the relative scarcity of fuels with TR of 1 and 10 h to NE and a relatively smaller presence of fuels with TL of 100 h to SE are due to various effects of the hurricane in regions with different types and proportions of forests and land uses.

Forest fire danger

The fire danger was high in 2 400 000 ha (46 % of the surface), very high in 906 000 ha (17 %), and extreme in 85 923 ha (1.6 %). In Campeche the risk of fire by agricultural ignitions has more influence but in Quintana Roo there is danger and risk for the accumulation of fuels and the presence of rangeland and agricultural areas. Considering only medium tropical forests in Quintana Roo, 1 800 000 ha had high to extreme danger; the danger is greater to the East (Figure 6). The prevailing SE winds in spring (Suárez and Rivera, 1998), the fire season, involve additional danger because the fires will lead to areas with more fuels.

The increase in fuel loading indicates danger not only per se, but also by the reduction in the canopy cover which facilitates the drying and combustion of materials brought down by hurricanes (Myers and

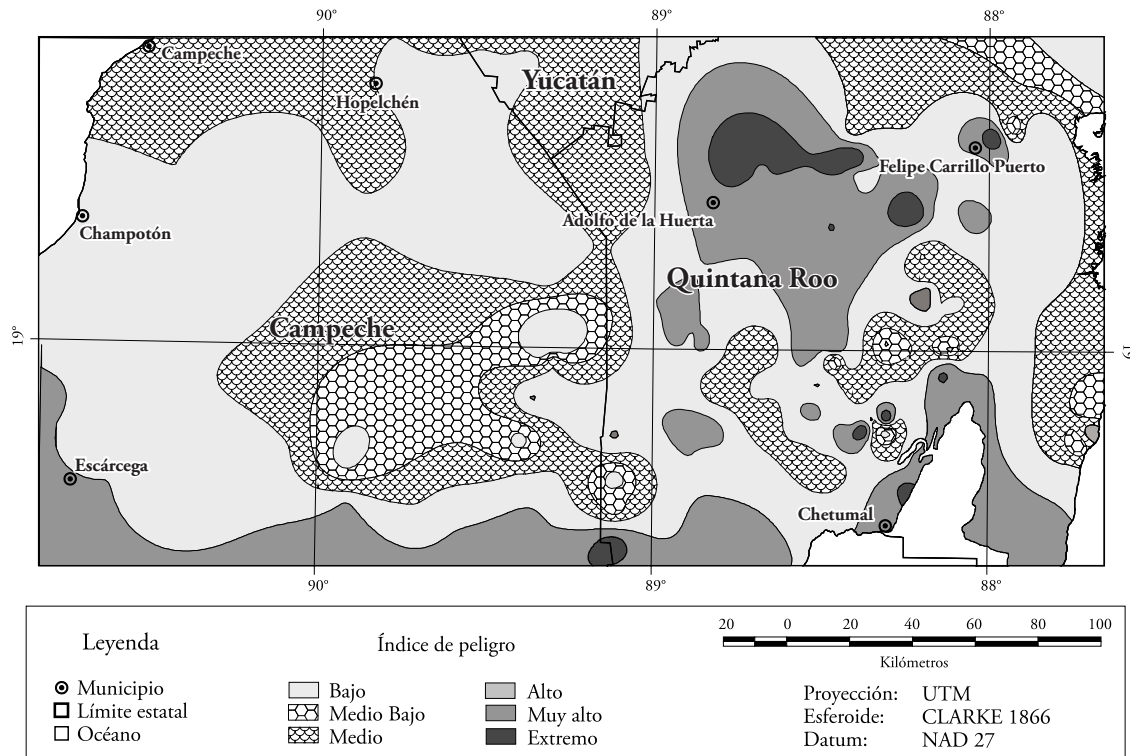


Figura 6. Mapa de índice de peligro de incendio forestal.

Figure 6. Map of forest fire danger index.

El aumento en la carga de combustibles indica peligro no sólo per se, sino también por la reducción en la cobertura de copas que facilita el secado y la combustión de los materiales derribados por huracanes (Myers y van Lear, 1998). En selvas, los incendios superficiales pueden propiciar incendios subterráneos, dependiendo de la profundidad de los materiales orgánicos (Cochrane y Schulze, 1999), entre otros factores, lo que genera más severidad al quemar el suelo (Jain *et al.*, 2008).

Históricamente se han presentado incendios en regiones afectadas por huracanes en el sureste de México: 1) en las áreas afectadas por el huracán Janet (década de 1950), 2) en 1989 hubo incendios en 119 233 ha en áreas afectadas por el huracán Gilberto (Villa *et al.*, 1990), y 3) incendios forestales en 2009 en áreas impactadas por el huracán Wilma en 2005. Así, la conjugación de factores como sequía intensa relacionada con fenómenos como el Niño o la Niña, se presenta desde el mismo año o hasta unos cuatro años después del paso del huracán, propiciando los incendios forestales ante el continuo y amplio uso y mal uso del fuego en la región. Según Cooke *et al.* (2007), el paso de cualquier huracán aumenta

van Lear, 1998). In tropical forests, surface fires can cause underground fires, depending on the depth of organic materials (Cochrane and Schulze, 1999), among other factors, which generates more severity when burning the soil (Jain *et al.*, 2008).

Historically fires have been present in regions affected by hurricanes in southeastern México: 1) in the affected areas by the hurricane Janet (decade 1950), 2) in 1989 there were wildfires in 119 233 ha in areas affected by the Hurricane Gilberto (Villa *et al.*, 1990), y 3) forest fires in 2009 in areas impacted by the Hurricane Wilma in 2005. Thus, the combination of factors such as severe drought associated with El Niño or La Niña, comes from the same year or until about four years after the passage of the hurricane, leading to the forest fires related to the continued and broad use and misuse of fire in the region. According to Cooke *et al.* (2007), the passage of any hurricane increases fuels and fire danger, such as Katrina, which increased from 3 to 13 % the areas with very high fire danger in southern Mississippi.

High loads influences more on severe fires and on a low ecological restoration and forest

combustibles y peligro de incendio, como Katrina, que incrementó de 3 a 13 % las áreas con muy alto peligro de incendio al sur del Mississippi.

Las cargas altas repercuten en incendios más severos y en una lenta recuperación ecológica y de la producción forestal, así como se favorece el cambio de uso del suelo. Rodríguez *et al.* (1989) reportan que 88 % de los árboles estaban derribados en las áreas afectadas por el huracán Gilberto (1988) e incendios forestales (1989), y 54 % en las áreas afectadas sólo por huracán.

Áreas prioritarias de protección

Estas áreas se concentran en Quintana Roo donde están las mayores cargas de combustibles; además están representadas por selvas medianas con aprovechamiento forestal, selvas medianas y otros tipos de vegetación, como los humedales en las áreas naturales protegidas de XianKaan, Quintana Roo, y Calakmul, Campeche. Hay áreas con aprovechamiento forestal que antes del huracán estaban en buena condición y con bajo riesgo de incendio por actividades agropecuarias. Sin embargo, luego de los embates de los vientos huracanados estas áreas pueden degradarse más en caso de incendios forestales, pues son ecosistemas sensibles al fuego. Las áreas prioritarias de protección están divididas en alta (gran acumulación de combustibles, selvas bajo manejo o de conservación), media (selvas bajas incluso en zonas con alto impacto del huracán) y baja (en Campeche, a reserva del riesgo de incendio por actividades agropecuarias) (Figura 7).

CONCLUSIONES

En la región hay más de 2 millones ha con peligro alto, muy alto o extremo de incendio forestal. Debido a que en la definición de peligro de incendio se tomó en cuenta la carga de todos los combustibles forestales, incluidos los combustibles pesados por su lenta descomposición y disponibilidad durante la época de sequía, y al extendido uso agropecuario del fuego en la región, la zonificación relativa a peligro de incendio forestal y la de áreas prioritarias de atención, estarán vigentes durante varios años. A mayor porte de la vegetación, mayor la carga de combustibles generada, como las selvas medianas, que además tienen la más amplia distribución entre

producción recovery, as well as the change of the land use is favored. Rodríguez *et al.* (1989) reported that 88 % of the trees were felled in the areas affected by Hurricane Gilbert (1988) and forest fires (1989), and 54 % in areas affected only by hurricane.

Priority areas for protection

Priority forest areas for protection were concentrated in Quintana Roo where the highest loads of fuels are located; in addition, they are represented by rainforests with forest exploitation, semi-evergreen forests and other type of vegetation, such as wetlands in the natural protected areas of XianKaan, Quintana Roo, and Calakmul, Campeche. There are areas with forest exploitation that before the hurricane were in good condition and with low risk of fire by agriculture-livestock activities. However, after the strike of the hurricane winds, these areas may be more degraded in case of forest fires, because they are fire-sensitive ecosystems. Priority areas for protection are divided into high priority (large accumulation of fuels, forests under management or conservation), medium priority (low tropical forests including areas with high impact of hurricane) and low priority (in Campeche, subject to the fire risk by agricultural activities) (Figure 7).

CONCLUSIONS

In the region there are over 2 million ha with high, very high or extreme forest fire danger. Due to the fact that in the definition of fire danger the load of all forest fuels was taken into account, including the heavy fuels by their slow decomposition and availability during the drought season, and the widespread agricultural use of fire in the region, the division into zones related to the forest fire danger and the priority areas for protection, will be in effect for several years. The higher the size of vegetation, the greatest the load of fuels generated, such as medium tropical forests, which also have the widest distribution among the forests of the area. There was a gradient of affected areas and loads of fuels, with the highest levels to the east and the lowest to the west, as the hurricane decreased its strength.

The higher level of risk corresponded to the eastern region, with high loads and agriculture/

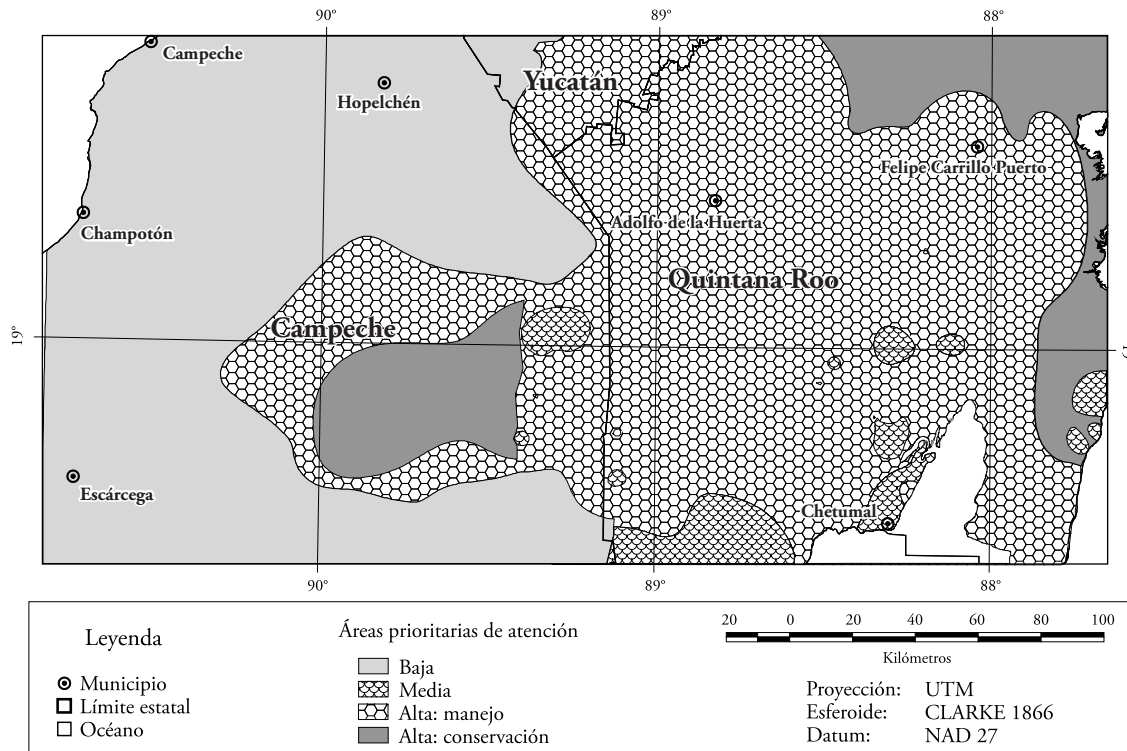


Figura 7. Mapa de áreas prioritarias de protección.
Figure 7. Map of priority areas for protection.

las selvas de la zona. Hubo un gradiente de afectación y cargas de combustibles, con los mayores niveles al este y los menores al oeste, en la medida en que el huracán disminuyó su fuerza.

El mayor nivel de peligro correspondió a la región este, con elevadas cargas y uso agropecuario de fuego. Hacia el oeste, con menores cargas, las actividades agropecuarias imprimen riesgo. Las áreas prioritarias de protección, incluyen zonas con altos niveles de peligro, como las áreas bajo aprovechamiento forestal, las reservas de la biosfera y poblaciones.

La hipótesis se cumplió parcialmente pues de todas las variables probadas sólo el perímetro de las áreas agropecuarias resultó significativo para estimar la presencia de incendios forestales. Se considera que los modelos utilizados fueron apropiados para alcanzar los objetivos planteados.

La información de este estudio es útil para quienes toman decisiones de manejo del fuego y de ecosistemas en la región.

AGRADECIMIENTOS

A CONAFOR, que autorizó uso de datos del proyecto: "Programa de prevención y combate de incendios forestales y manejo

livestock use of fire. To the west, with smaller loads, the agriculture/livestock activities fix risk. Priority areas for protection include areas with high danger, such as areas under forest exploitation, the biosphere reserves and populations.

The hypothesis was partially fulfilled because from all variables tested only the perimeter of the agricultural areas resulted significant to estimate the presence of forest fires. It is considered that the models used were appropriate to achieve the posed objectives.

The information of this study is useful to decision makers of fire management and ecosystem management in the region.

—End of the English version—



del fuego en las áreas afectadas por el huracán Dean en las áreas tropicales del sureste de México", elaborado por la UACH. A: Ing. Víctor Sosa Cedillo, Ing. Roberto Martínez Domínguez, Dr. J. Germán Flores G., Dr. Juan de D. Benavides S., y a los Ings. o M.C. Kuc Uc Gener D., Juan O. Hernández L., Isaac Mendiola G., Mauricio R. Castañeda M., Rosa L. Carrillo, Diana Lahoz

G., Karina Colín Y., Diana L. Sánchez V., G. Elena Islas M. y Elsa Berenice.

LITERATURA CITADA

- Arnaldos V., J., X. Navalón N., E. Pastor F., E. Planas C., y L. Zárate L. 2004. Manual de Ingeniería Básica para la Prevención y Extinción de Incendios Forestales. Mundi Prensa. Madrid. 414 p.
- Brown, J. K. 1974. Handbook for Inventorying Downed Woody Material. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-16.
- Challenger, A., y J. Soberón M. 2008. Los ecosistemas terrestres. Vol. I. Conocimiento actual de la biodiversidad. *In*: Sarukhán K., J. Capital Natural de México. CONABIO. México, D. F. pp: 87-108.
- Chandler, C., P. Cheney, P. Thomas, L. Traub, and D. Williams. 1983. Fire in Forestry. Vol. II. Wiley. New York. 298 p.
- Cochrane, M. A., and M. D. Schulze. 1999. Fire as a recurrent event in tropical forests of the eastern Amazon: effects on forest structure, biomass and species composition. *Biotropica* 31: 2-16.
- Cochrane, M. A., and K. C. Ryan 2009. Fire and fire ecology: concepts and principles. *In*: Cochrane, M. A. (ed). Tropical Fire Ecology. Climate Change, Land Use and Ecosystem Dynamics. Springer-Praxis. Chichester, U.K. pp: 25-62.
- Cooke, W. H., K. Grala, D. Evans, and C. Collins. 2007. Assessment of pre- and post-Katrina fuel conditions as a component of fire potential modeling for Southern Mississippi. *J. For. (Dec)*: 389-397.
- Cressie N., A. C. 1993. Statistics for Spatial Data. Wiley. New York. 900 p.
- Cuesta R., R. M., and J. Martínez V. 2006. Effectiveness of protected areas in mitigating fire within their boundaries: Case study of Chiapas, México. *Cons. Biol.* 20(4): 1074-1086.
- Environmental Systems Research Institute. 1999. Arc View GIS 3.2. Redland, California, USA.
- Flores G., J. G., O. G. Rodríguez Ch., M. Meléndez G., y O. G. Rosas A. 2008. Sitios de muestreo para el monitoreo de combustibles forestales SIMMCOF. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro, Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, INIFAP. Folleto Técnico no. 1. 47 p.
- Gould, W., G. González, A. T. Hudak, T. Nettleton H., and J. Hollingsworth. 2008. Forest structure and downed woody debris in boreal, temperate, and tropical forest fragments. *Ambio* 37(7-8): 577-587.
- Hosmer, D. W., and S. Lemeshow. 2000. Applied Logistic Regression. Wiley. New York. 392 p.
- INEGI. 2004. Carta de Uso del Suelo y Vegetación, 1:250 000. Insightful Corporation. 2002. S-plus v. 8.p for Windows. Enterprise Developer Edition. Washington, USA.
- Jain, T. B., W. A. Gould, R. T. Graham, D. S. Pilliod, L. B. Lentile, and G. González. 2008. A soil burn severity index for understanding soil-fire relations in tropical forests. *Ambio* 37(7-8): 563-568.
- López P., J., M. Keyes, A. González E., F. Cabrera, y O. Sánchez. 1990. Los incendios de Quintana Roo: ¿Catástrofe ecológica o evento periódico? *Ciencia y Desarrollo* 16(91): 43-57.
- Maeda, E. E., A. R. Formaggio, Y. E. Shimabukono, G. F. B. Arcoverde, and M. C. Hansen. 2009. Predicting forest fire in the Brazilian Amazon using Modis imagery and artificial neural networks. *Int. J. Applied Earth Observation and Geoinformation* 11(4): 265-272.
- Maeda, E. E., G. F. B. Arcoverde, P. K. E. Pellikka, and Y. E. Shimabukoro. 2011. Fire risk assessment in the Brazilian Amazon using Modis imagery and change vector analysis. *Appl. Geography* 31(1): 76-84.
- Muñoz R., C. A., E. J. Treviño G., J. Verástegui Ch., J. Jiménez P., y O. A. Aguirre C. 2005. Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la Sierra Madre Oriental de México. *Investigaciones Geográficas* 56: 101-117.
- Myers, R. K., and D. H. van Lear. 1998. Hurricane-fire interactions in coastal forests of the south: a review and hypothesis. *For. Ecol. Manag.* 103: 265-276.
- Neri, A. C., D. A. Rodríguez T., y R. Contreras A. 2008. Inflamabilidad de combustibles forestales en las selvas de Calakmul, Campeche. *Universidad y Ciencia* 25(2): 125-132.
- Pyne, S. J., P. L. Andrews, and R. D. Laven. 1996. Introduction to Wildland Fire. 2nd. ed. Wiley. New York. 769 p.
- Ripley, B. D. 1981. Spatial Statistics. Wiley. New York. 252 p.
- Rodríguez F., C., G. Vera C., F. Carrillo A., J. Chavelas P., J. C. Escoto P., y C. Paraguirre L. 1989. Evaluación de daños en la zona afectada por el huracán Gilberto y el incendio ocurrido el presente año. CIFAP-Méx. Reporte Técnico. 100 p.
- Rodríguez T., D. A., H. Ramírez M., H. Tchikoué, y J. Santillán P. 2008. Factores que inciden en la siniestralidad de incendios forestales. *Ciencia For. Méx.* 33(104): 37-58.
- SAS Institute. 2002. Statistical Analysis System. v. 9.0 for Microcomputers. Cary, North Carolina, USA.
- Suárez M., E., y E. Rivera A. 1998. Zooplankton e hidrodinámica en zonas litorales y arrecifales de Quintana Roo, México. *Hidrobiológica* 8: 19-32.
- Uriarte, M., and M. Papaik. 2007. Hurricane impacts on dynamics, structure and carbon sequestration potential of forest ecosystems in southern New England, USA. *Tellus* 59A: 519-528.
- Van Wagner, C. E., and T. L. Picket. 1985. Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Forestry Technical Report 33. Canadian Forest Service. Ottawa, Ontario. 18 p.
- Villa S., A. B., E. A. Hernández O., y V. E. Sosa C. (eds). 1990. Plan de manejo silvícola integral de la zona norte de Quintana Roo. AMPF, A. C. México, D. F. 100 p.