

# SIMULACIÓN ESPACIAL DE DISPERSIÓN DEL FUEGO EN FUNCIÓN DE LA CARGA DE COMBUSTIBLE Y PENDIENTE

José Germán Flores Garnica<sup>1</sup>, David Arturo Moreno González<sup>1</sup>  
y Juan de Dios Benavides Solorio<sup>1</sup>

## RESUMEN

La distribución espacial de los combustibles forestales tiende a ser discontinua y variable. Asumir una homogeneidad podría subestimar su influencia en el comportamiento del fuego. La intención de usar modelos de combustibles no es viable cuando las quemaduras prescritas se aplican en áreas de pequeñas dimensiones (5-20 ha), como sucede en México. Como alternativa se elaboran mapas temáticos desde la perspectiva "raster", aunque en el país no se cuenta con un modelo espacial que considere esta fuente de información. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue desarrollar un modelo para simular los cambios espaciales de la dispersión del fuego, debidos a la variación de la carga de combustibles de una hora de retardo y la pendiente en un área con bosque de pino-encino dentro de la Sierra Madre Occidental, al noroeste de Chihuahua. El modelo generado describe el patrón espacial de la propagación del fuego desde un tiempo inicial hasta un periodo dado, cambios que están en función del tiempo y la velocidad de dispersión simulada determinísticamente. La perspectiva "raster" facilita el proceso de programación, ayudando a entender el por qué de la propagación del fuego en cierta dirección. Sin embargo, la precisión está altamente relacionada con el tamaño y forma de las celdas. No obstante, el modelo obtenido tiene como principal limitante no considerar todos los argumentos requeridos en la simulación del comportamiento del fuego. En futuros trabajos, se sugiere integrar otros tipos de combustibles (10 ó 100h de retardo y vivos) y su contenido de humedad.

**Palabras clave:** Bosque de pino-encino, carga de combustibles forestales, comportamiento del fuego, modelado espacial, perspectiva "raster", quemaduras controladas.

Fecha de recepción: 2 de mayo de 2005.

Fecha de aceptación: 9 de enero de 2006.

---

<sup>1</sup> Campo Experimental Centro–Altos de Jalisco, Centro de Investigación Regional Pacifico Centro, INIFAP. Correo-e: [flores.german@inifap.gob.mx](mailto:flores.german@inifap.gob.mx)

## ABSTRACT

The spatial distribution of forest fuels is rather discontinuous and highly variable. The assumption of fuel homogeneity could underestimate the influence of fuel distribution on fire behavior. Therefore, the use of the fuel-model concept is not allowed when the surface of a forest fire is small (5-20 ha), which is the situation of most of prescribed fires in Mexico. As an alternative, thematic maps were designed following the raster approach, even though there is not a spatial model that works with this source of information in Mexico. Thus, the objective of this study was to develop a spatial model in order to simulate spatial changes in fire rate of spread due to variations in one hour fuel loadings and slope. The study area is located within a coniferous-oak forest of the Sierra Madre Occidental, at the northwest of Chihuahua State, Mexico. Fire rate of spread is simulated deterministically. The model describes fire rate of spread changes, from a initial time to a given elapsed time, which is based on the rate of spread at a certain period. This also helps to have a better understanding of the reasons involved the fire spread following a particular direction. The spatial precision of this kind of models is highly related to the cell size and shape. Moreover, the main limitation of the model is that it does not consider all the required arguments for a fire behavior simulation. Therefore, in future studies, it is suggested to integrate other parameters, such as other fuel types (10h, 100h of lag time and live fuels), and humidity of fuels.

**Key words:** Pine-oak forest, forest fuel loading, forest fire behavior, spatial model, raster approach, prescribed fires.

## INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de incendios no sólo altera la planificación del manejo forestal, sino que su combate implica inversión de tiempo y recursos; no obstante, se acepta que el fuego puede mejorar el potencial productivo del bosque. Por ejemplo, favorece la regeneración al disminuir la capa de hojarasca y reducir la competencia herbácea, o simplemente por aumentar la fertilidad del suelo (Martínez *et al.*, 1990).

En este sentido es posible incluir el uso del fuego en el manejo forestal mediante quemas controladas, las que se aplican con objetivos claros y en condiciones ambientales conocidas, también denominadas quemas prescritas (QP). Así se podría organizar un calendario de quemas prescritas (CQP) tanto para disminuir el riesgo de un incendio, como para mejorar a los ecosistemas forestales.

El fuego, como herramienta silvícola, ha sido utilizado en países con vegetación y topografía similares a las de México (Aguirre, 1978; Hudson y Salazar, 1981);

sin embargo, en este último, la práctica de quemas controladas ha sido restringida (González-Cabán y Sandberg, 1989) y poco documentada. La razón principal es que el conocimiento sobre el comportamiento del fuego en los bosques mexicanos para diferentes períodos y ambientes es escaso (Flores y Benavides, 1993), pero representa un requisito indispensable para aplicar un CQP.

Una alternativa de solución para subsanar la falta de información es simular el comportamiento del fuego antes de proceder a la quema en el campo. Para ello pueden usarse algunos de los sistemas que actualmente existen, tales como: FARSITE (Finney, 1996), BURN (Veach *et al.*, 1994) y EMBYR (Hargrove, 1994) que se basan en un grupo de 13 patrones de dispersión, definidos por el tipo y frecuencia de combustibles que contienen (Rothermel, 1983), a partir de los cuales las áreas forestales se ordenan en una serie de grandes polígonos de tamaño variable, dependiendo de la homogeneidad de las superficies evaluadas y de acuerdo al criterio de los expertos. Esto implica que cualquier estimación del comportamiento del fuego, dentro de cada uno de ellos es homogénea, a excepción de las variaciones en la topografía, dirección y velocidad del viento.

Dado que en México las quemas prescritas se practican en áreas reducidas, los modelos de simulación deben considerar cambios en la distribución espacial de los combustibles dentro de superficies de 5 a 20 ha; por lo tanto, los modelos señalados tienen limitantes para su aplicación. Además, se carece de la clasificación de bosques por modelos de combustibles, por lo que es necesario desarrollarlos; para ello se deben tener mapas con la ubicación de los combustibles que reflejen su variación espacial en distancias cortas, por ejemplo de 100 m.

## Requerimientos y productos al estimar el comportamiento del fuego

Los requerimientos de un modelo que estime el comportamiento del fuego en un incendio forestal (Figura 1) (Campbell *et al.*, 1996), pueden agruparse en cuatro primarios (Omi, 1997; Veach *et al.*, 1994):

- 1) El complejo de combustibles determina cómo se afecta la propagación del fuego bajo diferentes condiciones de vegetación. En general, se utiliza la clasificación de combustibles por el tiempo de retardo o el necesario para que la humedad interna del combustible se equilibre con la del medio ambiente. De esta forma se tienen combustibles de 1, 10, 100 y 1000 h, sus grosores varían de 0 a 0.60, 0.61 a 2.50, 2.51 a 7.5 y mayores de 7.5 cm, respectivamente.
- 2) La humedad de combustibles tiene un fuerte impacto en la intensidad del fuego y su ritmo de dispersión.
- 3) La dirección y velocidad del viento constituyen la influencia más variable sobre el comportamiento del fuego.

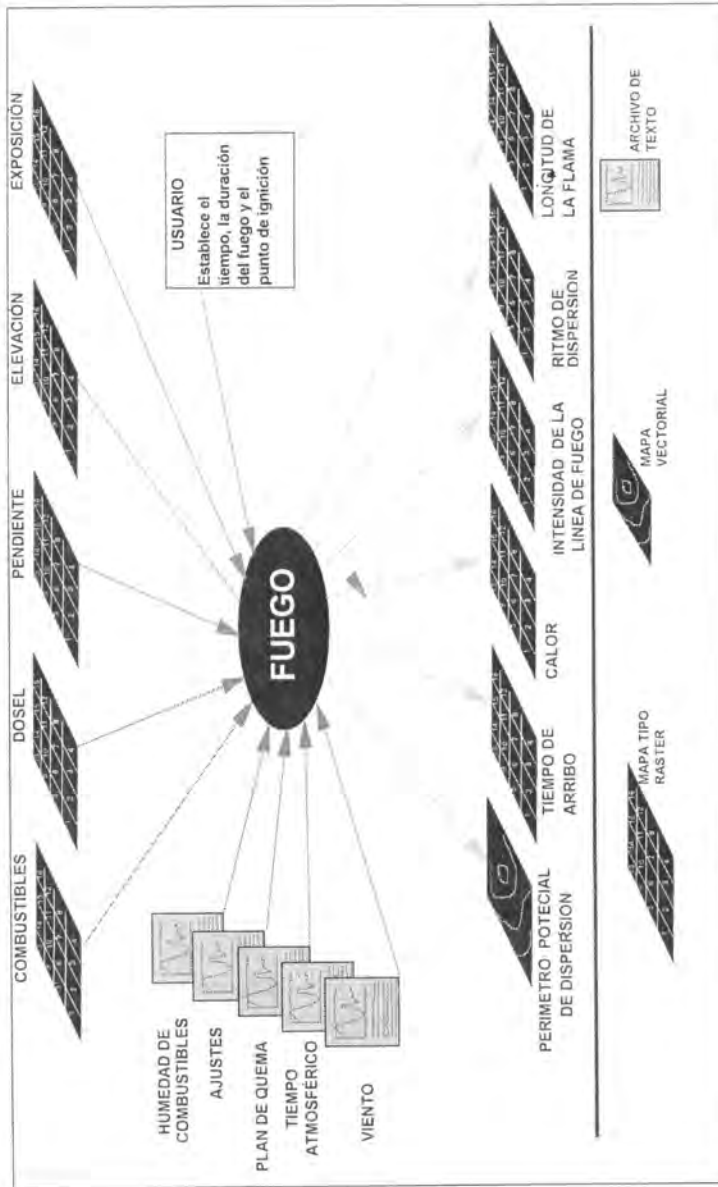


Figura 1. Diagrama de requerimientos y resultados en un proceso de simulación del comportamiento del fuego, basado en Campbell *et al.* (1996).

- 4) La pendiente del terreno permite la propagación del incendio más rápido cuando el fuego se mueve de la parte baja hacia arriba de una ladera, en comparación con un terreno plano donde el avance está supeditado al viento.

Un modelo de simulación sobre el comportamiento espacial del fuego genera los siguientes productos (Campbell *et al.*, 1996):

- 1) Velocidad de dispersión (m/minuto) a la cual el frente del incendio avanza;
- 2) Calor por unidad de área ( $\text{kJ/m}^2$ ), que indica la cantidad de calor liberada por unidad de superficie durante cierto tiempo en un área dada del frente de la flama;
- 3) Intensidad de la línea de fuego ( $\text{kW/m}$ ), que corresponde a la cantidad de calor generada en un segundo por unidad de longitud del frente del fuego;
- 4) Longitud de flama (m), que es el promedio de longitud de la flama hacia un punto de proyección;
- 5) Distancia de dispersión (m/tiempo), que señala el probable movimiento de avance del incendio en un periodo específico;
- 6) Mapa de distancia (m), que muestra el progreso del frente del fuego;
- 7) Área (ha), que consiste en la estimación de la superficie que abarca el incendio;
- 8) Componente de ignición (%), que define la probabilidad de que una brasa cause una ignición que pueda evolucionar en una nueva conflagración;
- 9) Intensidad de reacción ( $\text{KJ/m}^2/\text{seg}$ ), que es el calor liberado por unidad de superficie y tiempo.

### Velocidad y área de propagación del fuego

La velocidad de propagación de un incendio resulta de la combinación de los factores descritos. No obstante, en el caso de una quema controlada la situación se simplifica, ya que se elige el día en el que se realizará y, con ello, se pueden predecir las condiciones meteorológicas, así como el terreno donde ocurrirá.

Rothermel (1983) propuso una ecuación que toma en cuenta dichos elementos. Con base en esta perspectiva se formuló el siguiente juego de ecuaciones que permiten, para el caso de las quemadas controladas, estimar el área incendiada:

$$ROS = - 5.321429 + (0.454762 * S) + (0.560714 * F) \dots \dots \dots (1)$$

$$FSA = \sum_{t=0}^{t=x} \sum_{c=1}^{c=1} 1 / (ROS / CS) \dots \dots \dots (2)$$

Sustituyendo (1) en (2):

$$FSA = \sum_{t=0}^{t=x} \sum_{c=1}^{c=1} 1 / (- 5.321429 + (0.454762 * S) + (0.560714 * F) / CS) \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

- ROS* = Velocidad de propagación calculada (m/h)
- S* = Pendiente (%)
- F* = Carga de combustibles de 1h (ton/ha)
- FSA* = Área de propagación del fuego en un periodo dado (ha/h)
- CS* = Longitud de la celda (m)
- t* = Tiempo
- x* = Periodo de tiempo dado (h)
- c* = Número de ciclos o tiempo en horas que tarda el fuego en quemar un pixel, en relación al tamaño del pixel y la velocidad de propagación del fuego (*c* = 1 cuando *c* < 1)

El valor de *FSA* es cero cuando *S* y *F* son cero, no obstante que esto implicaría un valor de *ROS* negativo, en cuyo caso se considera como nulo.

### Modelos conceptuales de incendios forestales

Los incendios forestales son un fenómeno complejo, pueden iniciarse en un punto en particular y, posteriormente, generar igniciones subsecuentes que producen incendios secundarios, lo que constituye una de las formas más importantes para su propagación, misma que se ha explicado mediante aproximaciones heurísticas del comportamiento del flujo del fuego, que facilitan la estimación de la distancia máxima donde se presentarían tales igniciones secundarias.

Por lo tanto el modelado de incendios forestales requiere de un sistema de información que soporte búsquedas y análisis tanto espaciales, como temporales. Hasta los inicios de la última década del siglo XX el problema fundamental había sido el almacenamiento eficiente de datos, en espacio y tiempo (Yuan, 1994); en la actualidad el aumento de la velocidad y capacidad de los equipos de cómputo

permite desarrollar mejores algoritmos numéricos y, con ello, procedimientos de modelado más precisos.

En general, existen cuatro modelos conceptuales para el diseño de un sistema de información geográfica [SIG] del comportamiento del fuego en los incendios forestales (Figura 2), comprendidos en términos de un razonamiento espacio-temporal (Yuan, 1997).

- 1) Delimitación por ubicación.- que hace énfasis en las unidades espaciales y su localización son predeterminadas, la realidad es descrita mediante unidades espaciales. Varios estudios de predicción de incendios se basan en este modelo, ya que mucha de la información que necesitan está derivada de datos de sensores remotos, donde los "píxeles" son predeterminados. El fuego se aborda desde el punto de vista de la ubicación del incendio (Yuan, 1994), es decir, las unidades espaciales son determinadas antes de la descripción del fuego y de las características ambientales. Se basa en una perspectiva centrada en la ubicación, con el propósito de razonar primero "el dónde", después "el cuándo" y finalmente "el qué".
- 2) Entidad del incendio.- que se usa para describir la dispersión y movimiento del fuego de acuerdo a sus posiciones espaciales e individuales a través del tiempo. En contraste con el sistema anterior se describe la realidad desde la perspectiva de la ocurrencia del incendio. De tal forma que se razona en principio sobre "el qué", luego "el cuándo" y por último "el dónde" (Yuan 1994).
- 3) Delimitación por entidad.- éste difiere del modelo de "delimitación por ubicación" en que las descripciones se hacen con el enfoque de una entidad, tal como un incendio, en lugar de referirlas a una ubicación predeterminada; se presenta la realidad desde la perspectiva de la existencia del incendio.
- 4) Mosaico de incendios.- que utiliza una serie de polígonos, cada uno de los cuales difiere de sus vecinos en términos de un cierto atributo. Su enfoque es parecido al de delimitación por ubicación, pues también considera al fuego desde el punto de vista de la localización del incendio (Yuan, 1994).

De acuerdo con lo anterior, el objetivo de este trabajo es generar un modelo de simulación espacial sobre el comportamiento del fuego en una quema controlada, con base en el cual se podrá determinar el tamaño del área, su forma y la ubicación geográfica de la dispersión del fuego.

Se asume la siguiente hipótesis nula: la distribución espacial de la variación de las cargas de combustibles y de la pendiente no son suficientes para modelar el comportamiento del fuego.

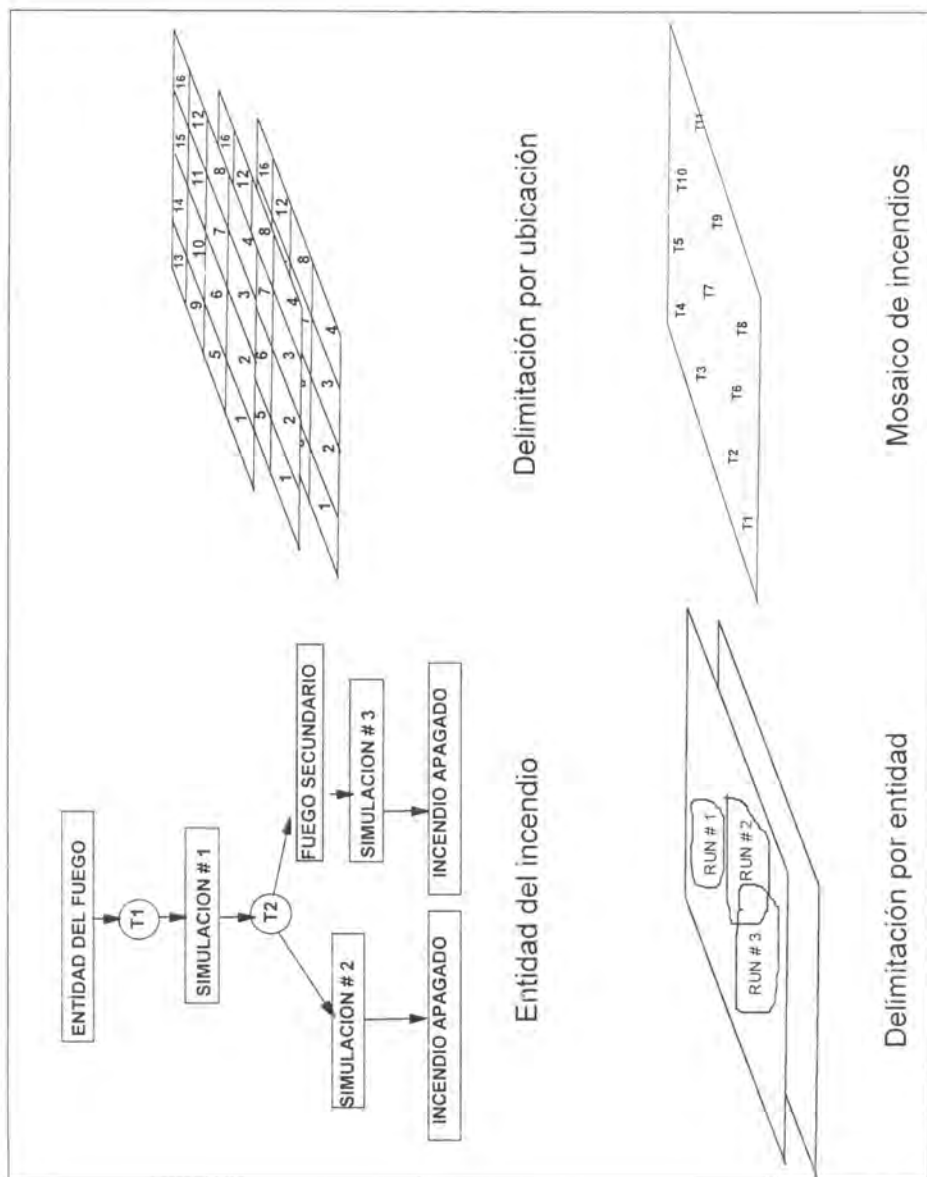


Figura 2. Cuatro de los principales modelos conceptuales sobre el razonamiento espacio-temporal de los incendios forestales, basado en Yuan (1997).



## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El presente trabajo se llevó a cabo con la información tomada en una superficie arbolada de 1200 ha del ejido El Largo y Anexos, el cual es representativo del Complejo de Ecosistemas del Bosque Apache-Madreano; se localiza en la región de la Mesa del Huracán, al NO del estado de Chihuahua (Figura 3). La topografía es montañosa, con algunas áreas planas que definen pequeños valles dentro de un rango altitudinal que varía de 1400 a 2300 msnm. Las especies arbóreas predominantes son: *Pinus durangensis* Martínez, *P. arizonica* Engelm., *P. engelmannii* Carr. y *Quercus sideroxyla* Humb. et Bonpl. La mezcla de especies produce una carga de combustibles muy particular, especialmente en lo que se refiere a los finos o menores a 0.6 cm, representando un riesgo de incendio elevado durante la época de sequía, que ocurre entre marzo y junio (UCODEFO No 2, 1997).

### Toma de datos

Los datos de pendiente y distribución de combustibles, se obtuvieron mediante un inventario específico de 554 sitios de 1000 m<sup>2</sup> (Flores, 2001), distribuidos al azar en 43 rodales definidos por: especie, densidad y exposición. La ubicación del centro de cada sitio se georreferenció con un sistema global de geoposicionamiento (GPS). Las coordenadas respectivas se corrigieron diferencialmente, para conseguir una precisión nominal menor a 10 m.

Debido a que los materiales inflamables de dimensiones pequeñas tienen más influencia en el comportamiento del fuego (Flores y Benavides, 1996), sólo se consideraron combustibles de una hora de tiempo de retardo [1h]. Estos incluyen hojarasca y ramillas con diámetro menor a 0.6 cm y su evaluación se basó en las técnicas descritas por Brown *et al.* (1982).

Los sitios fueron circulares, dentro de ellos se ubicaron transectos de 2.5 m para estimar las toneladas por hectárea de los combustibles finos, lo cual se complementó con la toma de muestras de hojarasca, que se secaron y pesaron, con esta información se calcularon las toneladas correspondientes por hectárea (Figura 4).

Los valores de combustibles de 1h y sus respectivas coordenadas se usaron para correr interpolaciones simples, con el propósito de definir su distribución espacial (Figura 5).

Para la estimación de la pendiente se utilizó un modelo de elevación digital con resolución de 90 x 90 m.

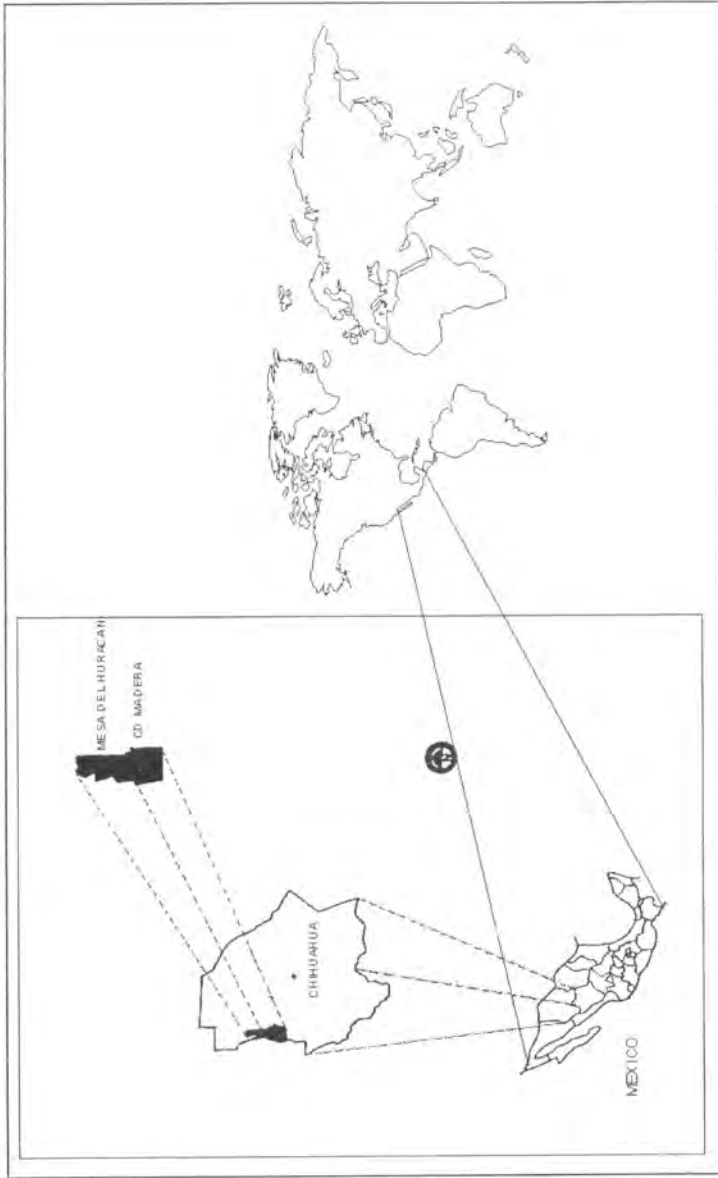


Figura 3. Ubicación de la Mesa del Huracán, al NO del estado de Chihuahua.

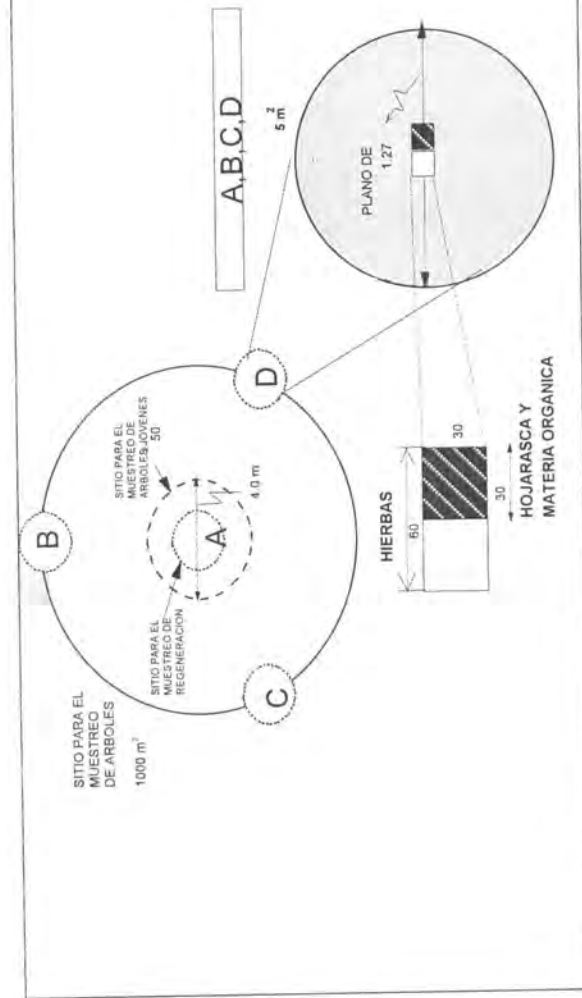


Figura 4. Diseño del sitios de muestreo usado para la evaluación de combustibles forestales, adaptado de Brown et al. (1982).



Figura 5. Distribución espacial de combustibles de una hora, con resolución de 90 x 90 m., en un área de corta del ejido El Largo, Madera, Chihuahua.

## Supuestos y consideraciones

- 1) En este estudio, el uso de la simulación se restringe a quemas controladas, considerando que el día que se apliquen será con pleno conocimiento de las condiciones ambientales, sobre terrenos forestales de 5 a 20 ha.
- 2) Como en la simulación se desea determinar el tamaño de la superficie, su forma y la ubicación geográfica de la dispersión del fuego, se requiere disponer de mapas temáticos de pendiente y combustible.
- 3) Los combustibles finos, hojarasca y ramillas con diámetro menor a 0.6 cm, representan un mayor riesgo de incendio, por lo que fueron los únicos que se analizaron.
- 4) La variación espacial de la pendiente y la carga de combustibles sobre áreas pequeñas de 90 x 90 m, conocidas como el pixel o celda en la técnica "raster", permiten determinar la evolución del fuego.
- 5) La simulación se realiza de acuerdo con una estimación de la velocidad de propagación del fuego desde una perspectiva centrada en la ubicación del incendio para describir la realidad.
- 6) Se acepta que las ecuaciones simplificadas de Rothermel (1983) estiman la velocidad de propagación del incendio, a partir de la pendiente del terreno y la disponibilidad de material inflamable.
- 7) Para el cálculo del área de propagación del fuego, el modelo asume un contenido de humedad del 9% en los combustibles y un viento a media flama de 9 km/h con dirección norte.
- 8) La simulación del fuego actúa sobre un patrón espacial, desde un tiempo inicial ( $t$ ) hasta un periodo dado ( $t + t_n$ ), en función de la velocidad de propagación, con ciclos temporales de una hora.
- 9) Al dividir la longitud de un lado de la celda entre la velocidad de propagación del incendio, los valores de uno o menores indican que se ha quemado toda el área.
- 10) Por tratarse de una quema controlada, el incendio sólo se propagará por contacto de celdas contiguas.
- 11) Se considera la simulación del comportamiento del fuego a partir de un solo punto inicial; es decir, no se incluyen incendios simultáneos.

## Desarrollo de la simulación de dispersión espacial del fuego

La predicción del comportamiento del fuego se realizó estimando la velocidad de propagación (Zack y Minnich, 1991) mediante el modelo de "delimitación por ubicación".

El modelo simula el área de propagación del fuego (APF) en forma determinística, basado en la variación espacial de la carga de combustibles de 1h y la pendiente

Para el cálculo del APF, se asume un contenido de humedad en los combustibles de 9% y un viento a media flama con dirección norte de 9 km/h. Los parámetros de propagación se definieron según lo que señala el National Wildfire Coordinating Group (1994). La relación del viento con la pendiente fue variable, según la topografía del terreno. Cualquier otro factor se consideró constante.

La ecuación 1 determina la velocidad de propagación del fuego a partir de la carga de combustible y la pendiente del terreno, y para estimar los cambios de la propagación del patrón espacial, desde un tiempo inicial ( $t$ ) hasta un periodo dado ( $t + t_n$ ), en función del tiempo especificado y la velocidad de propagación (ecuaciones 2 y 3).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo desarrollado bajo la perspectiva "raster", celda o pixel, permite trabajar con cambios puntuales tanto en la cantidad de combustibles, como en la pendiente. Aunque, la simulación se desarrolló con el Sistema de Información Geográfica ARC/Info<sup>®</sup> en ambiente UNIX<sup>®</sup>, el cómputo para determinar la propagación potencial se hizo con un programa externo.

La base de datos o mapas temáticos se generó en ARC/Info<sup>®</sup>, conectada al programa externo, elaborado en lenguaje "C", mediante un programa intermedio basado en Arc Macro Language (AML). La arquitectura general comprende el proceso en tres módulos (Figura 6).

Módulo I: la información espacial para correr el programa en "C" debe estar en un formato ASCII exportable desde ARC/Info<sup>®</sup>, compuesto por: a) un encabezado con información acerca de la ubicación geográfica de la base de datos, el número de renglones y columnas, además del tamaño o longitud de la celda, que es cuadrada y; b) una matriz con el valor de toneladas de combustible por hectárea de cada celda; por lo que los mapas temáticos o matrices de pendiente y combustible son convertidos a archivos ASCII, derivados por el comando "asciigrd". Se asume que, previamente, el usuario del modelo ha definido tales mapas temáticos.

Módulo II: aquí se desarrolló la mayoría del algoritmo. El programa en "C" trabaja con los siguientes cinco argumentos: a) archivo ASCII de pendientes (%); b) archivo ASCII de combustibles (ton/ha); c) nombre del archivo ASCII de salida, presenta la dispersión del fuego; d) tiempo deseado de simulación (h) y; e) coordenadas UTM (XY) del punto de inicio.

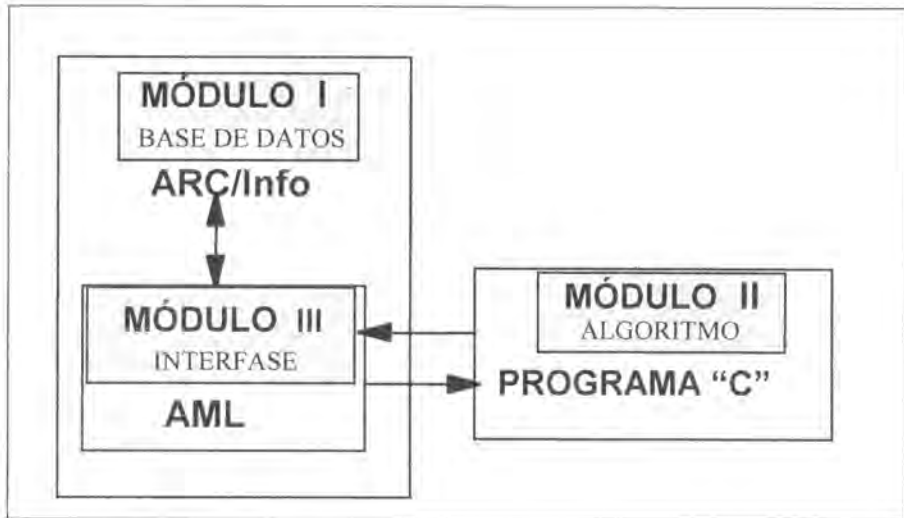


Figura 6. Estructura básica que soporta al algoritmo usado en el desarrollo del modelo de simulación espacial.

Primero, el programa lee los archivos "asciigrid" de pendiente y combustible, después trabaja con los valores de las matrices correspondientes, utilizando el valor del ROS (Ecuación 1), todas las celdas de la matriz de pendiente son procesadas junto con las celdas correspondientes a la de combustible (Figura 7).

Como resultado se obtiene una matriz de la velocidad de propagación, que sirve para generar otros cuadros, entre ellos, la fracción de las celdas que son quemadas en una hora, dividiendo los valores correspondientes de dicha matriz entre el tamaño de celda. Si se quiere conocer cuántas horas o ciclos son necesarios para quemar cada celda en su totalidad, se divide la longitud de uno de sus lados entre el número de metros que se quemarían en una hora, a cierta velocidad de propagación (ecuaciones 2 y 3). El algoritmo considera que los valores que resulten menores a uno se igualarán a la unidad, pues la celda se ha consumido en un solo ciclo y el fuego pasa a la celda contigua.

A partir de la última matriz o cuadro, se genera la descripción del avance del fuego, la celda donde se "inicia" se ubica por medio de sus coordenadas UTM (Figura 8). Después, en el primer ciclo, el algoritmo verifica si las ocho celdas alrededor de la inicial cumplen con las siguientes condiciones: 1) presencia de una celda en una dirección dada; 2) que la celda no sea nula (NODATA, fuera de los límites de la matriz), igual a cero (cuando ya fue "quemada"), ni negativa (no es posible, pero por precaución se especifica esta condición); 3) las celdas con datos mayores a la unidad no han sido consumidas por el fuego, por lo que no se consideran "quemadas"; su valor disminuye una unidad en cada ciclo; 4) cuando

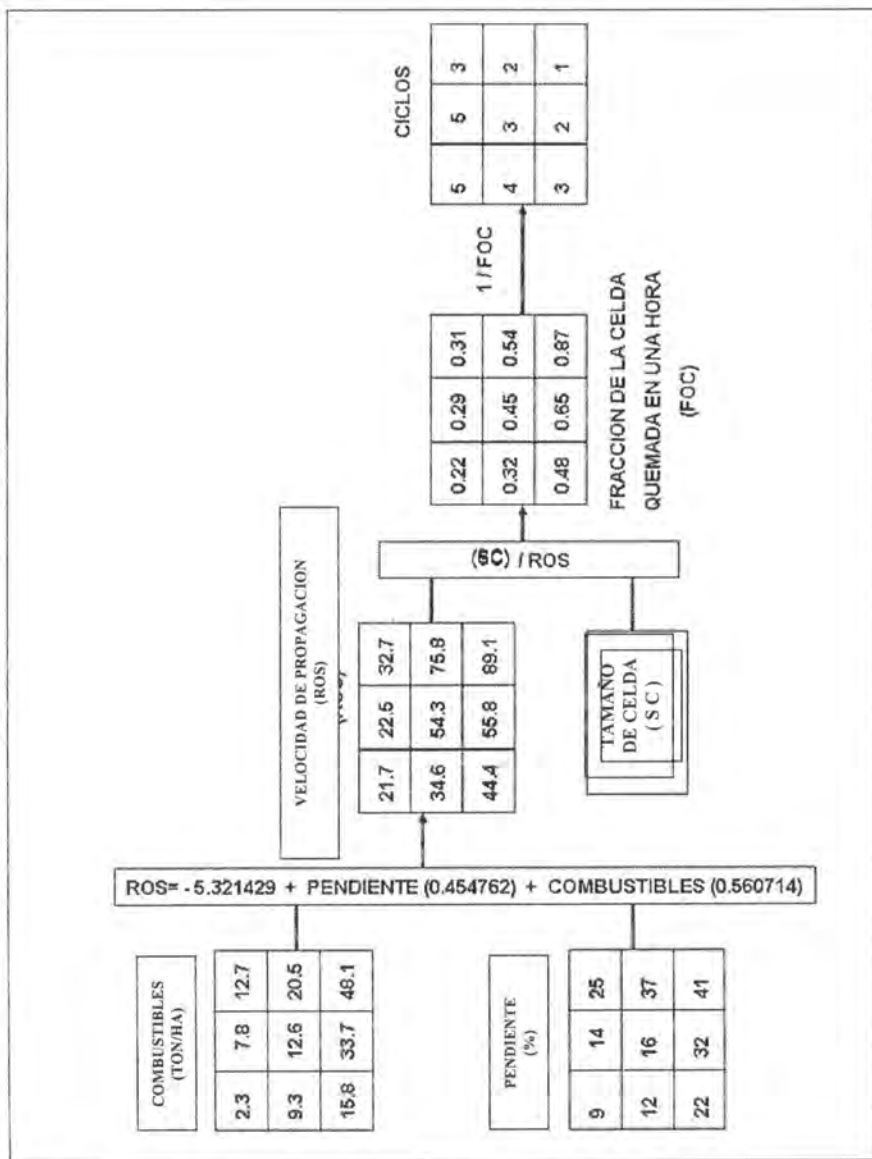


Figura 7. Algoritmo en el que se define el número de ciclos u horas requeridas para quemar completamente una celda.



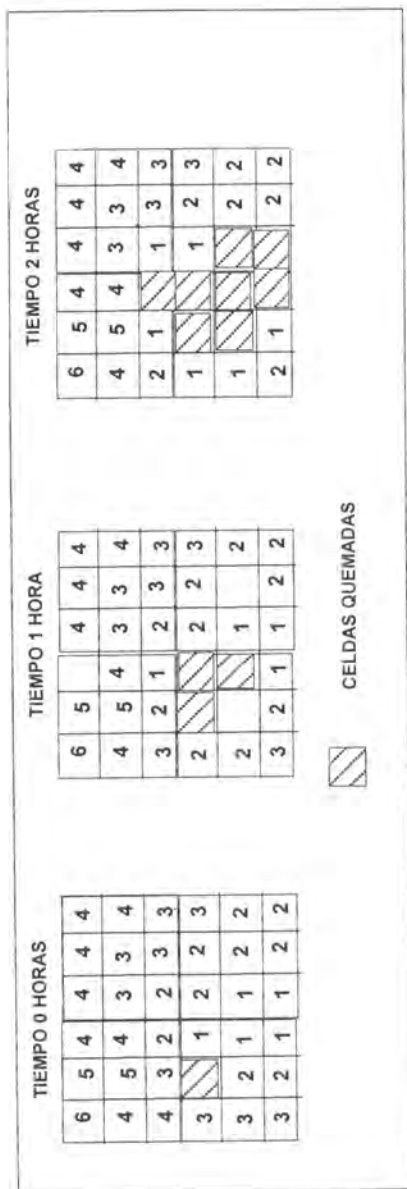


Figura 8. Secuencia del algoritmo para simulación de la propagación del fuego. Los valores de las celdas indican el número de horas requeridas para que una celda dada se quemara completamente.

una celda sea representada por el número uno se marca como "quemada", y se considera como una nueva celda o "chispa", capaz de propagar el fuego a las adyacentes mientras exista al menos una celda colindante válida.

En el siguiente ciclo, las celdas "chispa" continúan el mismo proceso, originando nuevas, hasta que se cumpla el número total de ciclos preestablecidos, es decir, la duración en horas de la quema controlada; este número se define al especificar el tiempo de duración de la simulación.

En el archivo ASCII, las celdas "quemadas" son marcadas con el valor de uno. Finalmente, según su tamaño y número, el programa calcula la cantidad de hectáreas quemadas y su porcentaje en relación al área total.

Módulo III: el programa en AML sirve de interfase entre ARC/Info<sup>®</sup> y el programa en "C" y su función es preparar todos los argumentos requeridos. Primero, solicita al usuario que seleccione la cobertura deseada del área de estudio (desplegada en la pantalla de la computadora); así como sus correspondientes coberturas de pendiente y carga de combustibles. Con la herramienta de "cruz" (hair cross), el usuario apunta en la pantalla la celda donde se desea iniciar la simulación de propagación del fuego. Como resultado se definen las coordenadas UTM de dicho punto inicial. A continuación, el programa pregunta por el periodo en que se desea correr la simulación y el nombre del mapa que contendrá los datos. Con estos argumentos, el programa en AML llama al programa en "C", el cual genera el mapa (archivo ASCII) con los resultados, que es convertido a un archivo propio de ARC/Info (con el comando "asciigrd") y se despliega en la pantalla (Figura 9).

El modelo generado para simular el área de propagación de una quema controlada tiene varias limitaciones. La más importante radica en que no abarca todos los argumentos requeridos, como son: humedad de combustibles, combustibles de 10 h, dirección y velocidad del viento, dirección del fuego hacia arriba o debajo de la pendiente, entre otros. La inclusión de estas condiciones en el algoritmo podría alterar principalmente la forma del área quemada resultante de la simulación.

La perspectiva de celdas (raster) favorece la inclusión de cambios espaciales de los factores que influyen en el comportamiento del fuego a varias escalas. Esa es una de las grandes ventajas del manejo de celdas, al compararla con el uso de polígonos bajo concepción vectorial. La razón principal es que el uso de polígonos considera las características de los factores que influyen en el comportamiento del fuego como homogéneas a lo largo del polígono.

Esto ocurre, por ejemplo, bajo la perspectiva del uso de modelos de combustibles, en donde un área forestal es dividida en varios polígonos, cada uno con características espaciales homogéneas, lo que revela un comportamiento del

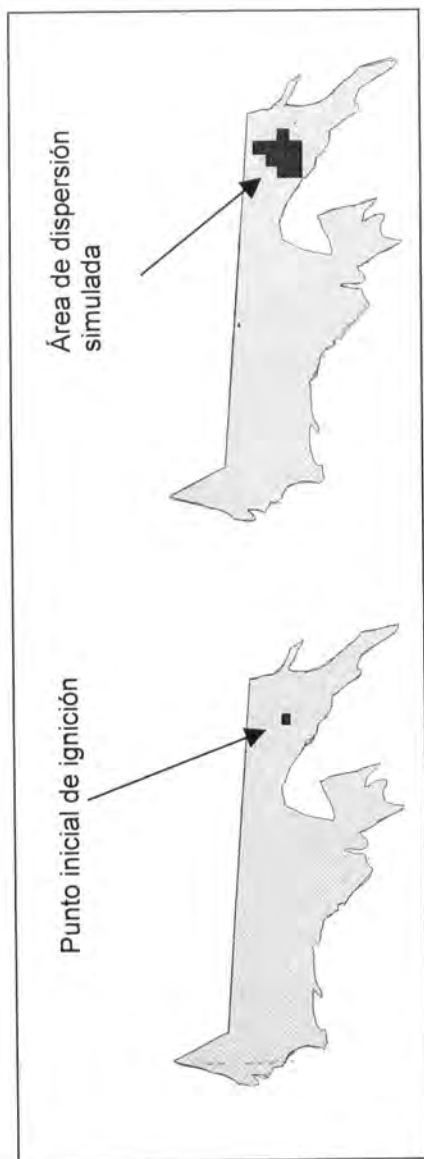


Figura 9. Área de propagación del fuego que resultó después de siete horas de tiempo de simulación, desde un punto inicial de ignición.

fuego único en cada uno de los polígonos. Lo anterior no permite apreciar o incorporar cambios de los factores que inciden en el comportamiento del fuego a escalas mayores.

## CONCLUSIONES

Los resultados sugieren rechazar la hipótesis nula, ya que fue posible modelar el comportamiento del fuego en función de la variación espacial de la carga de combustibles (ton/ha) y la pendiente (%).

La perspectiva de celdas o "raster" hace relativamente más fácil el proceso de programación, ayudando a entender el porqué de la propagación del fuego hacia cierta dirección. Sin embargo, la precisión espacial de este tipo de modelado está altamente relacionada con el tamaño de la celda.

Las dimensiones de las celdas utilizadas (90 x 90 m), limitan la interpretación de la propagación del fuego para áreas pequeñas, aunque el método propuesto puede usarse con tamaños menores de celda.

El procedimiento ilustrado plantea bases firmes para el desarrollo de modelos completos, no sólo para simular el área de dispersión, sino también otros factores del comportamiento del fuego como son altura de flama y calor por unidad de área.

## REFERENCIAS

- Aguirre B., C. 1978. Efecto del fuego en las propiedades físicas, químicas, biológicas y erosión del suelo. Tesis Profesional. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. de México. 287 p.
- Brown J., K., R. D. Oberheu and C. M. Johnston. 1982. Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the interior West. USDA, Forest Service. General Technical Report INT-129. 48 p.
- Campbell, J., K. Green, D. Weinstein and M. Finney. 1996. Fire growth modeling in an integrated GIS environment. *In*: Proc. of the Southern Forestry Geographic Information Systems Conference. Athens, GA. pp. 133-142.
- Finney M., A. 1996. FARSITE Fire Area Simulator. User's guide and technical documentation. Systems for Environmental Management. Version 2.0. Missoula, MT. USA. 116 p.
- Flores G., J. G. 2001. Modeling the spatial variability of forest fuel arrays. Ph. D. Dissertation. Dept of Forest Sciences. Colorado State University. Fort Collins, CO, USA. 184 p.
- Flores G., J. G. y J. de D. Benavides S. 1993. Quemadas controladas y su efecto en los nutrimentos del suelo en un rodal de pino. Boletín de Difusión Amatl Vol. VII (1-2): 3-6.

- Flores G., J. G. y J. de D. Benavides S. 1994. Efecto de las quemas prescritas sobre algunas características del suelo en un rodal de pino. *Revista Terra* 12 (4): 393-400.
- Flores G., J. G. y J. de D. Benavides S. 1996. Soil chemical changes due to fire when prescribed burns are applied in a temperate forest of Mexico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 12 (2):75-81.
- González-Cabán A. and D. V. Sandberg. 1989. Fire management and research needs in Mexico. *Journal of Forestry* 87(8): 20-26.
- Hargrove, W. W. 1994. Using EMBYR, a large scale probabilistic fire model, to recreate the Yellowstone Forest Lake fire. <http://research.esd.ornl.gov/EMBYR/embyr.html> (9 de Septiembre de 2004).
- Hudson J., y M. Salazar. 1981. Las quemas prescritas en los pinares de Honduras. Serie Miscelánea No. 1. Escuela Nacional de Ciencias Forestales. Siguatepeque, Honduras. 58 p.
- Martínez M., A., J. G. Flores G. y J. de D. Benavides S. 1990. Índices de riesgo de incendio en la sierra de Tapalpa, Estado de Jalisco. *Rev. Cien. For. en Méx.* 15 (67): 3-34.
- National Wildfire Coordinating Group. 1994. Intermediate wildland fire behavior. *In: S-290 Course. Student Workbook NFES2378. National Interagency Fire Center. Boise, Idaho. USA. pp. 335-360.*
- Omi, P. N. 1997. Forest fire management. *In: F424 Course. University Text. Colorado State University. Fort Collins, CO. USA. 117 p.*
- Rothermel, R. C. 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. USDA, Forest Service. General Technical Report INT-143. 161 p.
- Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal (UCODEFO) No 2. 1997. Aplicación del inventario forestal continuo (I.F.C.) en los bosques del ejido "El Largo". UCODEFO No 2. Ciudad Madera, Chihuahua, México. 34 p.
- Veach, M. S., P. D. Coddington and G. C. Fox. 1994. BURN: A simulation of forest fire propagation. <http://citeseer.nj.nec.com/119736.html> (4 de Noviembre de 2004).
- Yuan, M. 1994. Representation of wildfire in Geographical Information Systems. Ph.D. thesis, State University of New York at Buffalo. USA. 247 p.
- Yuan, M. 1997. Knowledge acquisition for building wildfire representation in Geographic Information Systems. *The International Journal of Geographic Information Systems*, 11(8): 723-745.
- Zack, J. A. and R. A. Minnich. 1991. Integration of geographic information systems with a diagnostic wind field model for fire management. *Forest Science*, 37(2): 560-573.