

CARDIN, UN SISTEMA PARA LA SIMULACION DE LA PROPAGACION DE INCENDIOS FORESTALES

**J. MARTINEZ MILLAN
S. VIGNOTE
J. MARTOS
D. CABALLERO**

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid, España

RESUMEN

El Sistema CARDIN que simula la propagación de fuegos forestales de superficie, sobre la pantalla de un microordenador, tipo PC-AT, ha sido desarrollado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes por encargo del Area de Defensa contra Incendios del ICONA. Para ello se necesitan dos coberturas digitales, una de cotas y otra de tipos de combustibles, que se pueden crear con un sistema autónomo de digitalización, llamado DIGICAR.

Los datos de humedad de los combustibles, así como los de comportamiento del fuego, se obtienen del sistema BEHAVE del USDA Forest Service. Estos datos, así como las características del viento, que se suponen constantes en la zona de estudio, se pueden modificar en cualquier momento de la simulación.

El comienzo de la simulación se puede hacer a partir de un foco puntual o de una serie de focos puntuales continuos o no. En cualquier momento el usuario puede situar nuevos focos de fuego.

El sistema proporciona a petición del usuario, informes, periódicos o específicos, que dan el contorno del incendio, con su área y perímetro.

Los contornos del incendio se pueden visualizar en la pantalla superpuestos a las coberturas utilizadas o sobre una visión 3D del terreno.

PALABRAS CLAVE: Incendios forestales
Propagación del fuego
Sistema de simulación
Comportamiento del Fuego

INTRODUCCION

El sistema CARDIN para la simulación de la propagación de incendios forestales, ha sido desarrollado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid, por encargo del Area de Defensa contra los Incendios Forestales del ICONA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. España).

Este organismo, está utilizando desde hace años, el sistema BEHAVE del USDA Forest Service, que maneja trece modelos de combustibles y proporciona el comportamiento del fuego de superficie (no de copas de árboles), en el caso de condiciones uniformes del combustible y de la topografía. Por ello el paso a un sistema como el CARDIN capaz de reproducir el avance del fuego sobre un mosaico de distintos combustibles y una topografía

cambiante significa un avance muy importante para el conocimiento del comportamiento del fuego en situaciones definidas y para ayudar a la toma de decisiones para la defensa y el combate del fuego.

Se ha desarrollado un sistema de simulación, fácil de utilizar por el usuario, que necesita para ello un ordenador tipo PC-AT, con tarjeta y monitor VGA y coprocesador matemático, al que se acopla una tableta de digitalización y una impresora.

El sistema ha sido programado en TURBOBASIC y está compuesto de 12 programas principales y unos 50 subprogramas que se expresan en unas 6.000 líneas de código fuente.

Se ha diseñado un sistema de digitalización DIGICAR, que permite la creación de las coberturas digitales de que se alimenta el sistema.

En este artículo se presentan: el fundamento teórico del modelo de simulación, la descripción de los parámetros implicados y el funcionamiento de los distintos módulos de que se compone el sistema.

EL MODELO

CARDIN, en su desarrollo actual, es un modelo determinístico que se desarrolla sobre la pantalla de un ordenador. El marco de desarrollo de la simulación se ha limitado a un cuadrado de 400×400 celdillas (pixels). En este marco se incluyen cuatro módulos cuadrados de mapa de 20×20 cm. La inclusión de cuatro módulos cuadrados, proporciona la flexibilidad suficiente para poder seguir dentro de la pantalla el desarrollo de incendios cuyo desarrollo probable se salga fuera de los límites de un solo módulo. Con ese tamaño se pretende que todas las coberturas digitales que se manejan en el proceso de simulación, se puedan almacenar en un disquete de 3,5". Los límites de los módulos de mapa se hacen coincidir con la retícula kilométrica UTM de modo que el norte UTM coincide con la dirección vertical de la pantalla.

La propagación del fuego se verifica como consecuencia del análisis de los siguientes elementos:

- Cobertura de combustibles.
- Humedad y protección de los combustibles.
- Modelo digital del terreno.
- Datos del viento.

y de la aplicación de unas pautas de comportamiento del fuego.

A continuación se desarrollan, en los apartados siguientes, cada uno de estos aspectos.

Cobertura de combustibles

La cobertura de combustibles es el resultado de la digitalización, de las fronteras de un mapa, que contiene los tipos de combustibles y las zonas incombustibles.

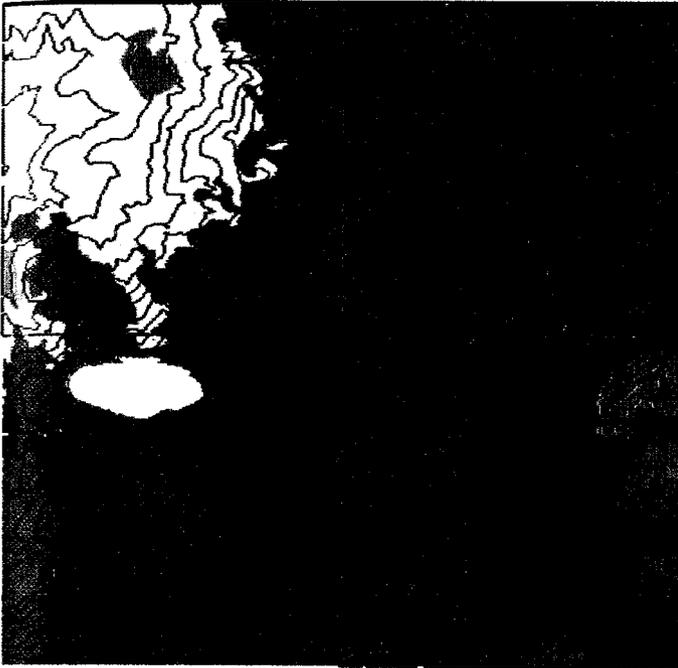
Los tipos de combustible se asimilan a los trece modelos del sistema BEHAVE.

ICONA ha llevado a cabo un estudio que permite asimilar los combustibles más corrientes de los montes españoles a los citados modelos norteamericanos. Cada celdilla de la pantalla, en la cobertura de combustibles se traduce en un color característico, como se puede ver en la Figura 1. En la que se puede observar el aspecto de la pantalla en el proceso de simulación de un incendio sobre la cobertura de combustibles.

SIMULACION: DD/MM/AA SIMULACION DE PRUEBA
 PUNTOS ANALIZADOS: 2305

1 Km

ESCALA 1: 26247



ESC=SALE AL MENU

HR: 1: 0: 8

TS: 1: 0: 8

VIENTO= 30.0 Km/h

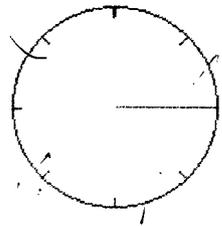


Fig. 1.—Vista de la pantalla en una simulación.

Screen's view in a simulation.

Humedad y protección de los combustibles

El sistema BEHAVE, utilizado para determinar el comportamiento del fuego, necesita para cada modelo de combustible cinco valores de la humedad en tanto por ciento, de los distintos combustibles existentes en el suelo. Los tres primeros se refieren a los combustibles muertos, clasificados según 1 hora, 10 horas y 100 horas de retardo y los dos últimos a los combustibles vivos, herbáceos y leñoso respectivamente. El usuario debe introducir estos valores. El sistema BEHAVE proporciona la humedad probable de los combustibles en función de la época del año y hora del día y de la meteorología habida.

El factor de protección expresa el mayor o menor grado en que la cubierta vegetal existente sobre el suelo, limita la velocidad del viento que se mide a unos 6 m de altura sobre el suelo. El usuario, para un modelo de combustible en una zona, asigna el valor del grado de protección, 1, cuando es «sin protección»; 2, si es «poco protegido»; 3 si es «protegido» y 4 si se trata de un combustible «muy protegido». Cada uno de estos grados de protección se traduce en un factor de reducción del viento a la altura de la llama que proporciona el sistema BEHAVE. Si el terreno es llano y no hay viento el programa BEHAVE proporciona el valor de la velocidad V_0 de propagación del fuego en estas condiciones.

Modelo digital del terreno

Para la creación del modelo digital del terreno, necesario para la simulación de la propagación del fuego, se parte de la digitalización de una serie de cotas, mediante el sistema DIGICAR. Para ello se digitalizan sobre un mapa topográfico una serie de puntos a los que se asigna su correspondiente cota. Se deben seleccionar los puntos singulares y los puntos de inflexión y más características de las curvas de nivel de modo que con el mínimo de puntos se pueda reproducir la topografía del modo más fiable.

Mediante un programa de interpolación se genera una matriz de cotas que asigna a cada celdilla su correspondiente cota Z. Esta cobertura de cotas se utiliza posteriormente para la visión 3 D del terreno.

De la cobertura de cotas se generan dos coberturas, una de pendientes, P y otra de orientaciones, O. Para ello se utilizan los algoritmos siguientes que se basan para una determinada celdilla en las cotas de los ocho puntos de alrededor.

$$\begin{array}{lll}
 1 & 2 & 3 & A = (Z1 + Z2 + Z3 - Z7 - Z8 - Z9)/6.1 \\
 4 & 5 & 6 & B = (Z3 + Z6 + Z9 - Z1 - Z4 - Z7)/6.1 \\
 7 & 8 & 9 & P5 = (A^2 + B^2)^{1/2} \\
 & & & O5 = \arctg (B/A)
 \end{array}$$

Para poder llevar a cabo estos algoritmos y los previos de interpolación se digitalizan en los bordes datos exteriores al modelo de mapas en un marco de 5 celdillas de ancho. Figura 2.

Datos del viento

Los datos del viento se refieren al viento a 6 m de altura sobre el suelo y se expresan en km/h. También se da su dirección en grados sexagesimales medidos con respecto al Norte UTM y en el sentido de las agujas del reloj.

Se supone que estas características del viento son uniformes para toda la zona de estudio, pero el usuario en cualquier momento de la simulación puede cambiar su fuerza y dirección permitiendo de este modo adaptarlo a los cambios reales que se estén verificando o simular vientos locales en determinados momentos de la simulación.

En función de los datos del viento a 6 m y de los factores de reducción, un módulo del programa BEHAVE, incluido en el sistema, proporciona para un determinado combustible con unas determinadas humedades y para una pendiente y orientación dadas la dirección de máxima propagación y la velocidad Vm máxima del fuego en esa dirección.

Este es el dato básico de comportamiento del fuego en que se basa la simulación del desarrollo del incendio.

EL MODELO TEORICO

El modelo teórico (continuo), en que se basa el sistema CARDIN, se deriva de una ley de composición de dos velocidades.

La primera Vo que es la velocidad de propagación, para un determinado combustible con viento nulo y en terreno llano.

La segunda Vi es el incremento de velocidad que resulta, en la dirección de máxima propagación, como consecuencia de los efectos combinados del viento y la pendiente.

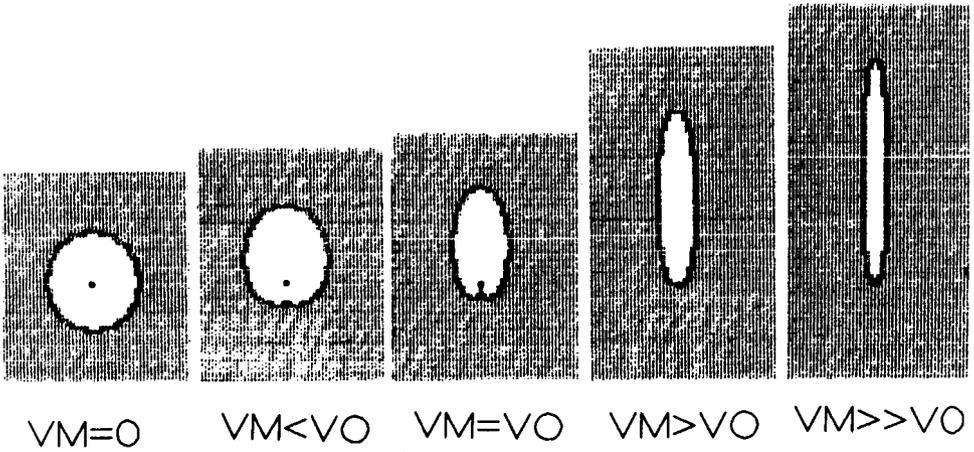
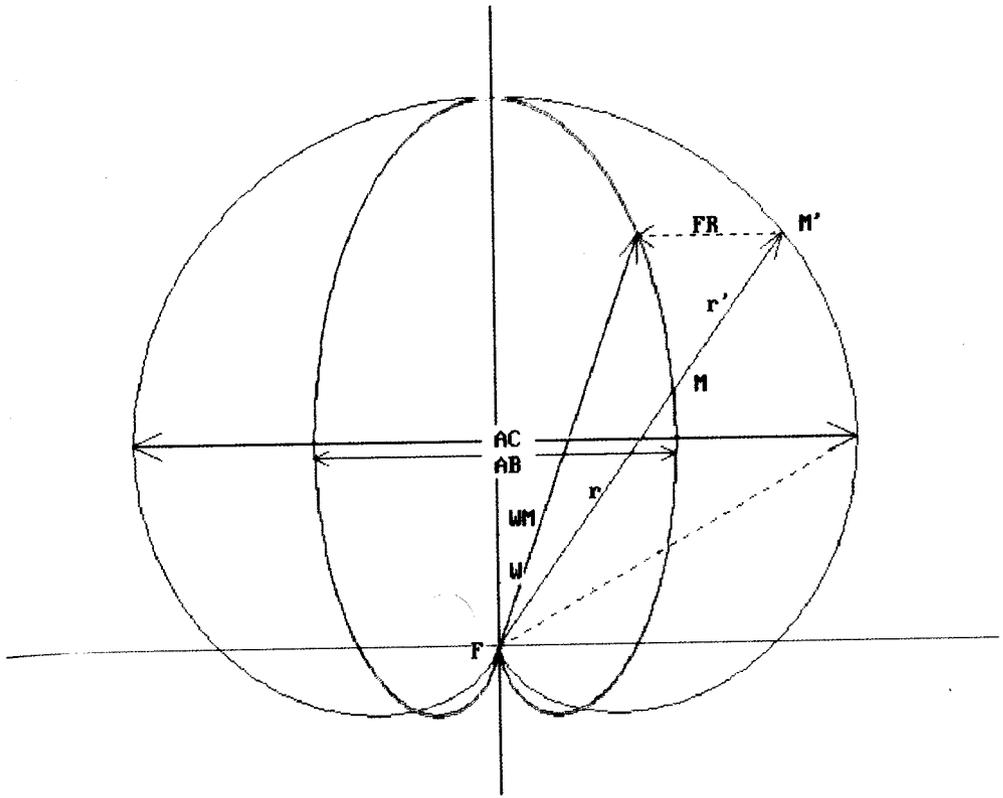


Fig. 2.—Fundamentos teóricos.
Theoretical basis.

La expresión general de la ley de composición de velocidades se basa en la ecuación:

$$r' = V_o + V_i \cos. a$$

siendo r' el radio vector desde el foco F del incendio y a el ángulo con la dirección de máxima propagación.

Las formas que adoptan las curvas (r), se presentan en la Figura 3.

El primer caso proporciona círculos.

Los dos siguientes los llamados, óvalos de Cassini.

El último caso proporciona las curvas llamadas «cardioides» de cuya expresión se deriva el nombre del sistema «CARDIN».

El ancho máximo de las curvas es siempre superior al que proporciona el sistema BEHAVE, debido a que no se ha tenido en cuenta el efecto de estrechamiento del fuego en la dirección normal a la de máxima propagación. Este efecto se simula aplicando a las figuras anteriores un factor de reducción, F_r en la dirección perpendicular a la de máxima propagación, que se calcula como el cociente entre el ancho máximo AB de la elipse BEHAVE, y al ancho máximo AC de la figura CARDIN. El ancho máximo CARDIN, corresponde a un ángulo WM, tal que:

$$WM = \arccos \frac{(V_o^2 + 8V_i^2)^{1/2} - V_o}{4 V_i}$$

y el valor del ancho máximo es:

$$(3V_o + (V_o^2 + 8V_i^2)^{1/2}) \cdot (4V_i^2 - 2V_o^2 - V_o (V_o^2 + 8V_i^2)^{1/2}) / 16V_i^2$$

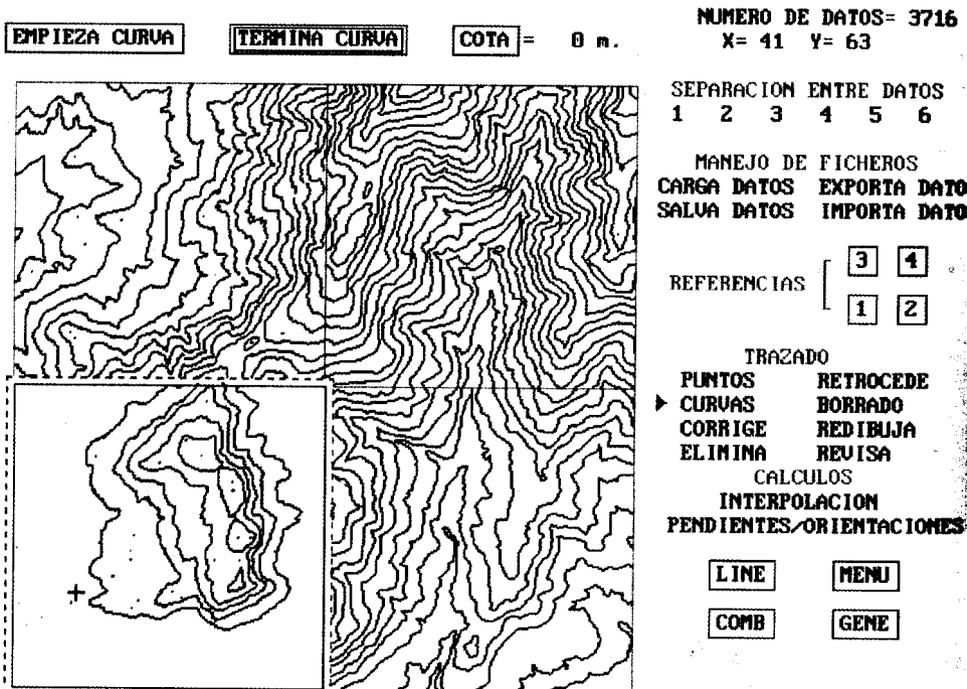


Fig. 3.—Proceso de la digitalización de la topografía.

Topography digitizing process.

La expresión analítica de la propagación del fuego al aplicar el factor de reducción Fr es (Fig. 3):

$$Fr = AB/AC$$

$$r = (V_o + V_i \cos a) (\sin^2 a \cdot Fr^2 + \cos a)^{1/2}$$

que se puede expresar como: $r = FM$

$$r' = FM'$$

$r = r' \cdot Fa$, siendo Fa el factor variable de reducción que permite pasar del radio vector (cardioides) al del modelo CARDIN.

$$Fa = (\sin^2 a \cdot Fr^2 + \cos^2 a)^{1/2}$$

La expresión del área quemada, en un tiempo t, según los valores relativos de V_o y V_i es la siguiente:

$$\text{Caso } V_o > V_i \quad A = 3,1416 \cdot t^2 (V_o^2 + V_i^2/2)$$

Caso $V_o < V_i$

$$A = t^2 \cdot ((V_o^2 + V_i^2/2) \cdot WL + (V_i^2 - V_o^2)^{1/2} \cdot 3V_o/2)$$

siendo $WL = \pi - \arccos(V_o/V_i)$ el ángulo en radianes que corresponde a un lazo interno que aparece en la figura teórica.

El área así expresada viene en unidades equivalentes al cuadrado de las unidades métricas en que venga expresada la velocidad. (Por ejemplo si la velocidad viene en km/hora el área vendrá en km^2).

Así como la fórmula que expresa el área quemada es exacta, el perímetro P se obtiene a partir de una integral elíptica que se tiene que estimar por métodos aproximados. El resultado es el siguiente:

Caso $V_o \geq V_i$

$$P = 2\pi t (V_o^2 + V_i^2) (1 - k^2/16 - 15 \cdot k^4/1024 - 105 k^6/16384)$$

siendo $k = 2 V_o V_i / (V_o^2 + V_i^2)$

Caso $V_o < V_i$

$$P = 2t (V_o^2 + V_i^2)^{1/2} \cdot (WL + (k/2) \cdot s - (k^2/16) \cdot (S.C. + WL) + (k^3/48) \cdot (SC^2 + 25) - (5k^4/128) \cdot (S.C.^3/4 + 3SC/8 + 3WLk/8) + \dots)$$

donde $C = \cos WL$ y $S = \sin WL$

La aplicación del factor de reducción Fr a las figuras teóricas anteriores, proporciona unos valores del área corregida AC, $AC = Fr \cdot A$

y del perímetro corregido PC, que se obtiene de una fórmula empírica investigada.

$$PC = Fr^{1/2} + 0,1 \cdot (a/b - 1) = Fr^{1/2} + 0,1 ((V_o + V_i)/V_o - 1)$$

siendo a y b la mitad del largo y ancho máximo de la elipse teórica que proporciona el sistema BEHAVE.

La expresión general de la ley de composición de velocidades se basa en la ecuación:

$$r' = V_o + V_i \cos. a$$

siendo r' el radio vector desde el foco F del incendio y a el ángulo con la dirección de máxima propagación.

Las formas que adoptan las curvas (r), se presentan en la Figura 3.

El primer caso proporciona círculos.

Los dos siguientes los llamados, óvalos de Cassini.

El último caso proporciona las curvas llamadas «cardioides» de cuya expresión se deriva el nombre del sistema «CARDIN».

El ancho máximo de las curvas es siempre superior al que proporciona el sistema BEHAVE, debido a que no se ha tenido en cuenta el efecto de estrechamiento del fuego en la dirección normal a la de máxima propagación. Este efecto se simula aplicando a las figuras anteriores un factor de reducción, F_r en la dirección perpendicular a la de máxima propagación, que se calcula como el cociente entre el ancho máximo AB de la elipse BEHAVE, y al ancho máximo AC de la figura CARDIN. El ancho máximo CARDIN, corresponde a un ángulo WM, tal que:

$$WM = \arccos \frac{(V_o^2 + 8V_i^2)^{1/2} - V_o}{4 V_i}$$

y el valor del ancho máximo es:

$$(3V_o + (V_o^2 + 8V_i^2)^{1/2}) \cdot (4V_i^2 - 2V_o^2 - V_o(V_o^2 + 8V_i^2)^{1/2}) / 16V_i^2$$

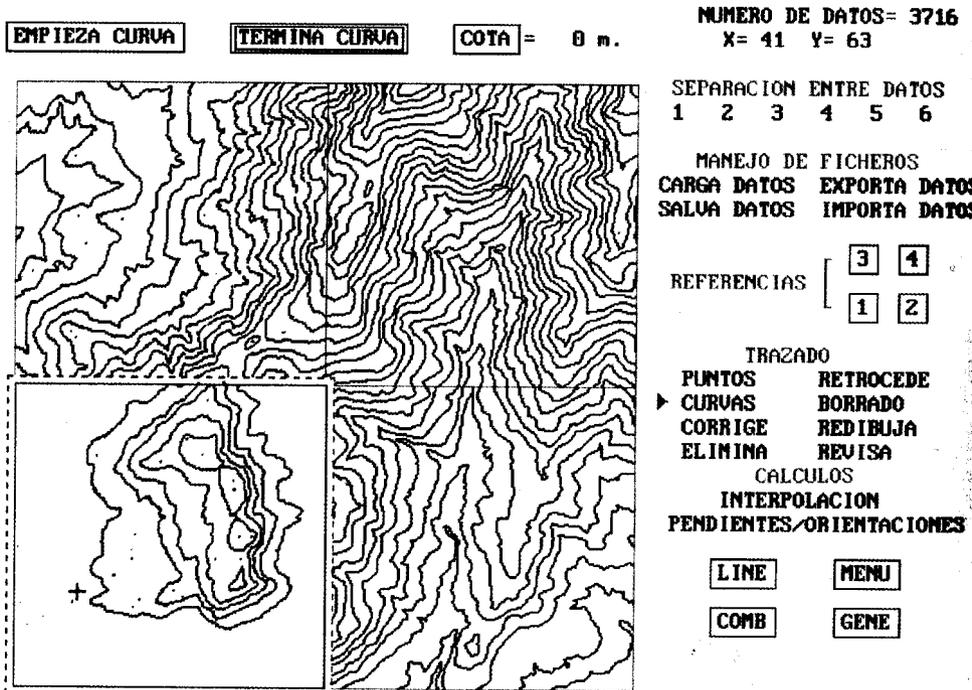


Fig. 3.—Proceso de la digitalización de la topografía.

Topography digitizing process.

La expresión analítica de la propagación del fuego al aplicar el factor de reducción Fr es (Fig. 3):

$$Fr = AB/AC$$

$$r = (V_o + V_i \cos a) (\sin^2 a \cdot Fr^2 + \cos a)^{1/2}$$

que se puede expresar como: $r = FM$

$$r' = FM'$$

$r = r' \cdot Fa$, siendo Fa el factor variable de reducción que permite pasar del radio vector (cardioides) al del modelo CARDIN.

$$Fa = (\sin^2 a \cdot Fr^2 + \cos^2 a)^{1/2}$$

La expresión del área quemada, en un tiempo t, según los valores relativos de V_o y V_i es la siguiente:

$$\text{Caso } V_o > V_i \quad A = 3,1416 \cdot t^2 (V_o^2 + V_i^2/2)$$

Caso $V_o < V_i$

$$A = t^2 \cdot ((V_o^2 + V_i^2/2) \cdot WL + (V_i^2 - V_o^2)^{1/2} \cdot 3V_o/2)$$

siendo $WL = \pi - \arccos(V_o/V_i)$ el ángulo en radianes que corresponde a un lazo interno que aparece en la figura teórica.

El área así expresada viene en unidades equivalentes al cuadrado de las unidades métricas en que venga expresada la velocidad. (Por ejemplo si la velocidad viene en km/hora el área vendrá en km²).

Así como la fórmula que expresa el área quemada es exacta, el perímetro P se obtiene a partir de una integral elíptica que se tiene que estimar por métodos aproximados. El resultado es el siguiente:

Caso $V_o \geq V_i$

$$P = 2\pi t (V_o^2 + V_i^2) (1 - k^2/16 - 15 \cdot k^4/1024 - 105 k^6/16384)$$

siendo $k = 2 V_o V_i / (V_o^2 + V_i^2)$

Caso $V_o < V_i$

$$P = 2t (V_o^2 + V_i^2)^{1/2} \cdot (WL + (k/2) \cdot s - (k^2/16) \cdot (S.C. + WL) + (k^3/48) \cdot (SC^2 + 25) - (5k^4/128) \cdot (S.C.^3/4 + 3SC/8 + 3WLk/8) + \dots)$$

donde $C = \cos WL$ y $S = \sin WL$

La aplicación del factor de reducción Fr a las figuras teóricas anteriores, proporciona unos valores del área corregida AC, $AC = Fr \cdot A$ y del perímetro corregido PC, que se obtiene de una fórmula empírica investigada.

$$PC = Fr^{1/2} + 0.1 \cdot (a/b - 1) = Fr^{1/2} + 0,1 ((V_o + V_i)/V_o - 1)$$

siendo a y b la mitad del largo y ancho máximo de la elipse teórica que proporciona el sistema BEHAVE.

MODELO DISCRETO

El modelo de propagación discreto debe reproducir, del modo más correcto posible, el modelo teórico continuo, sobre la pantalla del ordenador.

El elemento de análisis mínimo es un pixel de la pantalla de forma cuadrada. El desarrollo del incendio se verifica sobre una zona de la pantalla de 400×400 pixels compuesto de 4 módulos de mapa de 20×20 centímetros.

La utilización de cuatro módulos de mapa proporciona gran flexibilidad para controlar que el incendio no se escapa fuera de la pantalla. El tamaño de los mapas se ha determinado de modo que todas las coberturas implicadas en una simulación se puedan almacenar en un disquete de 3,5".

El fuego se origina en un foco puntual representado por un pixel o por varios pixels constituyendo un foco lineal. Se supone que el tiempo transcurrido es nulo, una vez definido el foco inicial F.

En cada pixel se tiene un valor de la máxima pendiente y de su orientación. Si llamamos a al ángulo que forma esta dirección con el Norte UTM y w la dirección de análisis.

$$w = 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 \text{ y } 315$$

La velocidad de propagación en la dirección w se calcula como:

$$V_w = (V_0 + w \cdot \cos(w - a)) \cdot F_w$$

y el tiempo que tarda el fuego en recorrer el pixel en la dirección w será:

$$t_w = l/V_w = l/(v_0 + w \cdot \cos(w - a))F_w, \text{ para } w = 0, 90, 180 \text{ y } 270$$

$$t_w = l\sqrt{2}/V_w \text{ para } W = 45, 135, 225 \text{ y } 315$$

siendo l, la longitud del pixel.

Si se utilizan módulos cuadrados de mapa de 20 cm equivalentes a un cuadrado en la pantalla de 200×200 pixels, el valor de un pixel l, es equivalente a $d/1000$ m, siendo d, el denominador de la escala del mapa digitalizado. (Por ejemplo para un mapa de escala $1/50.000$ $d = 50$ m).

Para simular la propagación del fuego, se analizan los tiempos que tardaría en recorrer el fuego cada una de las celdillas contiguas al pixel ya quemado. Si estas celdillas son incombustibles o ya están quemadas no intervienen en el análisis.

Como consecuencia de aplicar las fórmulas se obtienen una serie de tiempos de recorrido t_i , que se ordenan de menor a mayor. El tiempo mínimo t_m , sumado a la hora del análisis proporciona la hora a la que estaría quemado el próximo pixel. Se resta este tiempo mínimo a los tiempos de recorrido, se analizan los pixels próximos al últimamente quemado, añadiendo los correspondientes tiempos de recorrido al vector de tiempos. Se ordenan de menor a mayor, y se vuelve a repetir el proceso.

Un mismo pixel puede ser analizado desde diferentes caminos dependiendo de la procedencia del contagio del fuego, que se traduce en un ángulo w, diferente y por tanto en un tiempo t_w diferente de recorrido. Como es lógico en estos casos, se computa el camino de tiempo mínimo.

Los puntos que están ardiendo en un determinado momento constituyen el perfil o perímetro del fuego.

El cálculo del área en el modo discreto se hace contabilizando las celdillas quemadas, que se multiplican por el área que representa un pixel, a la que se añade la mitad del área, representada por los pixels del perímetro del fuego.

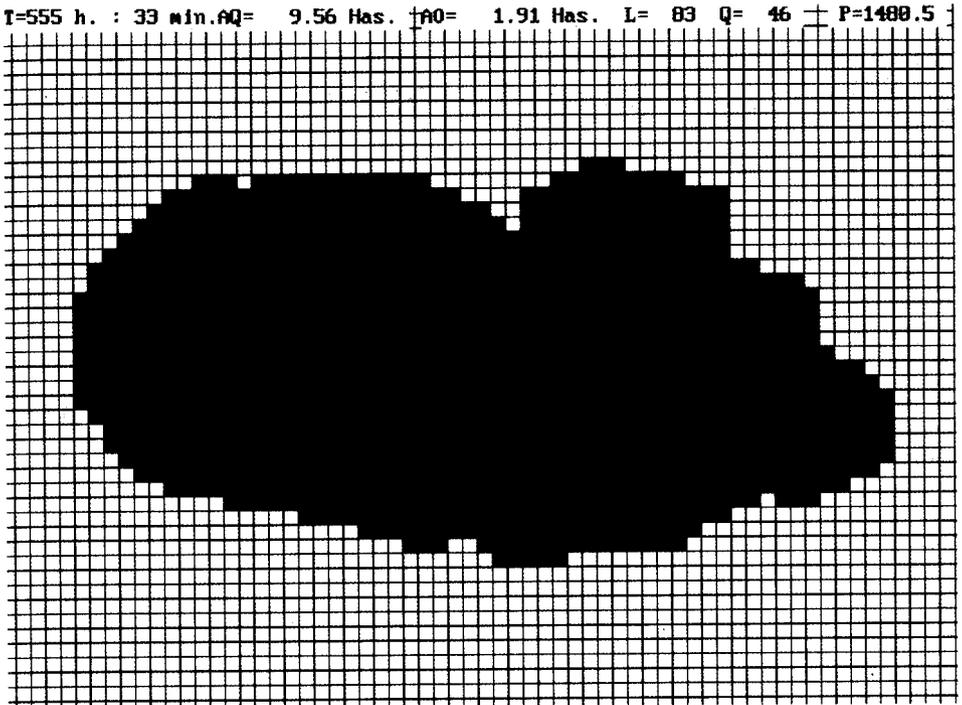


Fig. 4.—Módulo de análisis.

Analysis module.

El perímetro del incendio se calcula contabilizando la suma de las longitudes de los pixels del perímetro, que se valoran como 1, cuando son tramos rectos continuos de pixels y como $1\sqrt{2}$ cuando son quiebros entre un pixel y su siguiente. Esto se puede controlar mediante el módulo de análisis. Figura 4.

MODULOS PRINCIPALES DEL SISTEMA

La versión 2.0 del sistema CARDIN se utiliza a partir de un menú de persianas en el que se encuentran los siguientes módulos:

USUARIO, ENTRADA, PARAMETROS, DESARROLLO, INFORMES E IMAGENES

A continuación se describe someramente cada módulo con sus correspondientes opciones.

USUARIO: Contiene las opciones:

Colores: Que permiten ver los colores utilizados para representar los distintos combustibles.

Al estar normalizados no se pueden cambiar.

Monitor: Se introduce el valor de la longitud de la diagonal del monitor en pulgadas que sirve de base para el cálculo de la escala de representación gráfica.

Directorio: Permite ver el directorio del disco que se especifique.

ENTRADAS: Contiene las opciones que permiten al usuario entrar los datos que necesita el sistema para una simulación.

Mapas: Controla los mapas que se están utilizando en la simulación. La información comprende escala, tipo de mapas y coordenadas SW de los módulos de mapas.

Nombre: Define el nombre de la simulación en curso.

Hora: Permite introducir la hora de comienzo del incendio.

Focos: Permite definir cuales son el foco o focos puntuales y/o lineales a utilizar en la simulación. Se pueden definir mediante coordenadas UTM o mediante un cursor sobre la pantalla. Hay una opción que permite mostrar en cualquier momento la situación de los focos iniciales del fuego. También está permitida la introducción de nuevos focos en cualquier momento de la simulación. Los focos quedan definidos por sus coordenadas y por su nombre.

PARAMETROS: Este módulo controla los parámetros que afectan a los combustibles como son el viento, las humedades y el grado de protección que ya se han explicado anteriormente. Pueden ser modificados por el usuario en cualquier momento de la simulación.

DESARROLLO: Este módulo controla el proceso de desarrollo del incendio y contiene las opciones Modo y Proceso.

Modo: Define si el modo de desarrollo es Automático o Manual. En el modo Automático, se producen informes y se guardan los perfiles del incendio a intervalos de tiempo prefijados. En el modo Manual el usuario decide sobre la marcha el momento del informe.

Proceso: Se ordena el comienzo o continuación de la simulación, hasta un tiempo límite que puede fijar el usuario.

INFORMES: Este módulo proporciona informes sobre las áreas y perímetros del incendio y sobre los perfiles del mismo, las opciones que incluye son:

Áreas: Calcula el área de un contorno determinado del incendio, que se determina, situando el cursor filar sobre el mismo.

Perímetros: Calcula un perímetro determinado, situando el cursor filar sobre el área cuyo perímetro se desea determinar.

Perfiles: Este módulo produce informes análogos a los del modo Automático, incluyendo áreas, perímetro y perfil del incendio.

IMAGENES: Este módulo maneja los programas de presentación de imágenes, 2D o 3D, incluyendo la selección del fondo sobre el que se quiera ver los resultados del incendio.

Visión 2 D: Permite visualizar los resultados del incendio sobre la cobertura de usos o de combustibles o fondo negro. Los subprogramas incluidos permiten visualizar las áreas, quemadas en negro, los perfiles del fuego a las horas que se haya determinado y de reposición del incendio, distinguiendo entre zonas de llamas, zonas con brasas y zonas totalmente apagadas.

Visión 3 D: Permite presentar en perspectiva cónica, el modelo digital del terreno, al que se pueden superponer las coberturas de uso de los combustibles y resultados de incendio. El usuario puede seleccionar el punto de vista, la escala y la profundidad de campo mediante el teclado y obtener la visión previa con la situación de los perfiles del incendio. Figura 5. Una vez seleccionada la imagen se procede a crear una imagen 3D, con la cobertura de fondo que se desea y respetando las zonas vistas y no vistas.

RETURN=CAMBIA POSICION

ESCAPE=VUELTA AL MENU

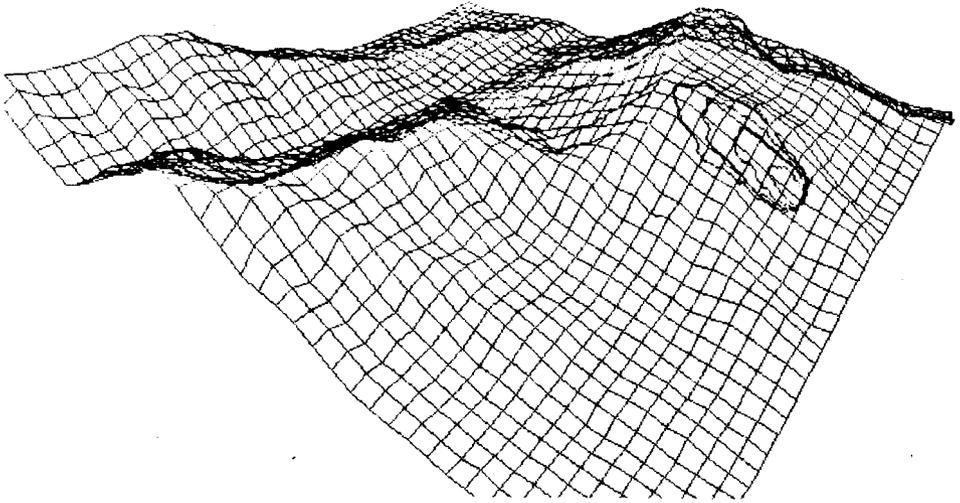


Fig. 5.—Visión tridimensional.
3D view.

PRUEBAS DEL MODELO

Los modelos, tanto teórico como discreto, han sido comprobados como se expone a continuación:

Pruebas del modelo teórico

El modelo teórico se ha comprobado mediante la comparación de los resultados que proporciona al sistema BEHAVE para el caso de combustibles homogéneos y terreno con pendiente uniforme con los que resultan de aplicar las fórmulas del área y perímetro dadas en el aparato anterior, que se obtienen mediante un programa auxiliar llamado DISCARD.

Para relaciones de largo/ancho entre 1.2 y 2.2 se han obtenido relaciones de área CARDIN/ área BEHAVE de 1.01 ($V_0 > V_i$) y valores próximos a 0,94 ($V_i < V_0$).

Para el perímetro con los mismos supuestos se han obtenido valores de 1,07 ($V_0 > V_i$) y valores muy próximos a 1, ($V_i < V_0$) para el resto.

Otras comprobaciones aisladas han dado resultados comparables, con diferencias que nunca son mayores del 7 p. 100 para las áreas, ni del 4 p. 100 para los perímetros.

Pruebas del modelo discreto

Como una primera comprobación, se han comparado las cifras teóricas de áreas y perímetros, con las que resultan del desarrollo de la simulación sobre combustibles homogéneos y pendientes uniformes, en el ordenador.

La comprobación se hace contando sobre las figuras que produce el módulo Análisis (Figura 4), el número de celdillas quemadas. Como ejemplo en un incendio de 1 hora sobre combustibles homogéneos con velocidad de propagación de 55 m/min y relación ancho/largo de 0,275 se han obtenido los siguientes valores:

	Area	Perímetro
BEHAVE TEORICO	246,8 ha	8.009 m
CARDIN	251,0 ha	7.780 m

El modelo discreto CARDIN está siendo comprobado con un incendio real [Valle del Tiétar (Avila), 21, 22 y 23 de julio de 1986]. Modificando convenientemente los parámetros que afectan al desarrollo del fuego se pueden reproducir a grandes rasgos las formas y velocidades producidas pero faltan objetivamente datos para que se reproduzcan de un modo continuo las distintas etapas de desarrollo, que incluyen intervenciones de lucha intermedias, fuego de copas, focos secundarios, etc.

PLANES FUTUROS

Se está desarrollando un sistema de simulación de las acciones de combate del fuego. Para ello se ha diseñado previamente un programa para la creación de ficheros, uno con los elementos de combate del fuego (número, clase y situación) y otro con la infraestructura utilizada en el combate (puntos de agua, carreteras, etc.).

En el futuro se podrán simular vientos locales, el efecto «chimenea» y la transmisión del fuego mediante focos secundarios.

Esperamos que este sistema una vez terminado, pueda ayudar al mejor conocimiento de la propagación del fuego así como a una mejor asignación de los medios de combate.

SUMMARY

CARDIN: a Computer System for the simulation of wildland fire spread

CARDIN is a computer user-driven forest fire behavior simulation system based on digital geographic data, namely fuel distribution and topographical coverages, working on a PC computer. Other inputs belongs to general wind properties (intensity and direction), and fuel status (moisture and wind protection degree).

It is allowed to modify the parameters at any time user requests as the simulation progress. There is no limit about the number, size and shape of the initial focus points, and new ones can be added at any time within the simulation.

CARDIN digital coverages are provided by its own digitizing system, DIGICAR.

The calculus and fire spread fundamentals are much the same as used in BEHAVE system.

Periodic reports about the perimeters, areas and shapes of burned surfaces, are provided automatically at user pre-set intervals of time.

Graphics representations are given to evaluate the geographic situation and fire shape over 2D coverages, and visual impact of burned areas on a more realistic 3D images.

Nowadays a simulation system for forest fire fighting is being developed, which includes a database with background fixed data points and the mobile fighting elements implied in the fire management.

INCENDIOS FORESTALES

Future improvements of the system will include local wind areas and creek effect.

This project is been supported by the «Area de Defensa contra Incendios Forestales», Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza. Madrid, España.

KEY WORDS: Wildland fire
Fire Spread
Simulation system
Fire behavior

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ANDERSON H. E., 1983. Predicting wind-driven wild land fire size and shape. Research Paper INT-305. Intermountain Forest and Range Experiment Station. USDA Forest Service.
- ANDREWS P. L., 1986. BEHAVE. Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System. Burn Subsystem. Part 1. General Tech. Rep. INT-194 Intermountain Research Station. USDA Forest Service.
- ANDREWS P. L., CHASE C. H., 1989. BEHAVE. Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System. Burn Subsystem, Part. 2. General Tech. Rep. INT-260. Intermountain Research Station. USDA Forest Service.
- BRIGGS I. C., 1974. Machine contouring using minimum curvature. Geophysics. Vol. 39. Núm. 1 (feb. 1974), pp. 39-48.
- BURGAN R. E., ROTHERMEL R. C., 1984. BEHAVE. Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System. Fuel Subsystem. General Tech. Rep. INT-167. Intermountain Forest and Range Experiment Station. USDA Forest Service.
- KOURTZ P. H., 1982. Mini-computer production of gridded elevation data from contour maps. Inform. Rep. Pi-X-18. Petawawa Nat. For. Dist. Canadian Forest Service.
- MITCHELL G., KAPRON J., 1987. A Preliminary Forest Fire Spread Model. CARIS, School of Forestry, Lakehead University, Thunder Bay, Ontario, Canadá P7B 5E1.
- ROTHERMEL R. C., 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. General Tech. Rep. INT-143. Intermountain Forest and Range Experiment Station. USDA Forest Service.