

PROBABILIDAD DE IGNICION, GRANDES INCENDIOS Y DIFICULTAD DE EXTINCION

D.M. MOLINA¹, M. BARDAJÍ¹ & M. CASTELLNOU²

RESUMEN

En este artículo, analizamos los factores estructurales y meteorológicos que influyen sobre la probabilidad de ocurrencia de un gran incendio (> 500 ha). Distinguimos probabilidad de ignición, y probabilidad de que la ignición se convierta en gran incendio. Utilizamos BEHAVE para simular la propagación del fuego y observar sus efectos sobre dichas probabilidades en un territorio heterogéneo (en pendiente, orientación, modelo de combustible...). La probabilidad de gran incendio, al considerar explícitamente la meteorología, se explica por la coexistencia de tres condiciones: una situación sinóptica determinada, un bajo contenido de humedad del combustible vivo y un alto peligro de incendio ligado a la temperatura, viento y contenido de humedad de los combustibles muertos de 10 horas de tiempo de retardo.

Palabras clave: Probabilidad de ignición, gran incendio, dificultad de extinción, condiciones sinópticas.

INTRODUCCION

La descripción del peligro espacial de incendios constituye un apoyo para decidir las inversiones a realizar sobre el territorio en prevención, detección y extinción de incendios forestales. Las variaciones de peligro en el espacio se pueden cuantificar a través de diversos índices, como el índice de riesgo local (IRL) o el índice de dificultad de extinción (IDE). Estos resultan de considerar varios factores (topografía, causalidad, combustible, etc.) y, en definitiva, pretenden recopilar y simplificar ordenadamente aquellos aspectos relativos a la distribución de incendios en la superficie.

Para el cálculo de estos índices se utiliza el concepto de modelo de combustible (ROTHERMEL, 1972). Estos modelos caracterizan el comportamiento del fuego en la vegetación forestal. Esto es, qué longitud adquieren las llamas en ellos, a qué velocidad se propagan, etc. A partir de

muchos experimentos de laboratorio y monte, no sólo caracterizamos dicho comportamiento del fuego sino también el justo peso que en dicho comportamiento tienen las variaciones de los distintos factores ambientales (viento, pendiente, temperatura del aire, humedad de cada tipo de los materiales vivos o en descomposición, etc.).

ROTHERMEL (1972) estableció 13 modelos de combustibles forestales que responden a la mayoría de las situaciones en USA. Estos modelos se distribuyen en cuatro grupos: «pastos», «matorral», «hojarasca bajo arbolado», y «restos de operaciones silvícolas». ANDERSON (1982) confeccionó una clave fotográfica encaminada a facilitar la asignación de modelo en monte. Estos modelos estandar son aplicables a España y el ICONA desarrolló una clave fotográfica para permitir su clara identificación en nuestros montes. MOLINA (1997a) señala cómo particularizar las claves de asignación de modelo para ámbitos comarcales de actuación atendiendo al carácter más o menos xérico de los rodales. Más detalle sobre particularización de modelos estandar y planificación puede verse en MOLINA Y BARDAJÍ (1998).

Ahora bien, previo al cálculo de los índices es necesario realizar una zonificación del territorio o ámbito de estudio, es decir, debemos decidir

¹ Departamento de Producción Vegetal y Ciencia Forestal, Universidad de Lleida. Av. Rovira Roure, 177. E-25198 Lleida. España. Tel.: 973 70 25 00. Ext. 5007. Fax: 973 23 82 64. E-mail: dmolina@pvcf.udl.es

² Centre Tecnològic Forestal del Solsonès, Solsona (Lleida).

cómo dividir la superficie en unidades espaciales que posean cierto significado respecto a la finalidad planteada. Con frecuencia, se ha zonificado la superficie en estudio según límites meramente administrativos (términos municipales) o cuadrículas UTM (10 × 10 km). Esta metodología simplifica notablemente el tratamiento de datos (por ejemplo, corresponde a la que se utiliza actualmente para procesar los datos sobre incendios en la base de datos EGIF*). Sin embargo, tal división del territorio no deja de responder a límites administrativos y convenciones, que si bien en muchos casos hacen más sencilla la manipulación de datos, por lo general no consideran la realidad presente sobre el territorio. Es decir, estas teselas (municipio o cuadrícula), difícilmente serán unidades homogéneas en su interior o con cierto carácter por sí mismas, como compartimentos a gestionar diferencialmente en prevención y extinción de incendios.

Por ello, parece más lógico dividir el territorio en estudio en «macizos forestales» cuyos límites, sean naturales (sierras, ríos...) o infraestructuras establecidas (carreteras o pistas), puedan servir de apoyo para establecer una compartimentación del mismo con fines de lucha contra incendios. Al trabajar de este modo, el valor de los índices que reflejan el peligro de incendios en el espacio debe particularizarse para cada uno de estos macizos. Es cierto que tal tratamiento supone cierta complejidad, pero los resultados se ajustan a una visión más real del territorio.

Para definir la vulnerabilidad del territorio (dividido en macizos forestales) frente a los incendios, se pueden distinguir dos aspectos que están relativamente ligados: la probabilidad de ignición y la propagación o probabilidad de gran incendio. En este trabajo analizamos la influencia de los factores estructurales sobre dicha vulnerabilidad. La simulación con BEHAVE (ANDREWS, 1986; ANDREWS & CHASE, 1989) permite observar el efecto de las variaciones de las características del territorio (definidas como topografía, condiciones del combustible, etc. en cada macizo), sobre la probabilidad de ignición y de gran incendio

estructurales, y de este modo atribuir el peso adecuado a cada uno de los factores implicados en los índices IRL o IDE.

Si bien es cierto que cada macizo posee una «vulnerabilidad estructural» asociada, no hay que olvidar que el análisis también se puede realizar considerando las variables coyunturales. Estas variables coyunturales afectan de distinta manera a los macizos según su estructura, condicionando directamente la probabilidad de ignición y de gran incendio.

Por tanto, para completar el análisis basado exclusivamente en factores estructurales, es necesario integrar la meteorología. Una misma condición sinóptica posee un efecto diferencial entre dos macizos vecinos estructuralmente distintos; por tanto, dicha condición sinóptica deja de ser coyuntural al interactuar con el territorio, para convertirse en estructural. Estas consideraciones se hacen más complejas si el análisis no es estático sino dinámico, integrando la evolución de las situaciones sinópticas globales y su manifestación en forma de gran incendio.

MÉTODOS

Los índices IRL e IDE resultan de considerar múltiples factores como: pendiente, orientación, fracción de cabida cubierta, modelo de combustible y causalidad entre otros. De estos, la causalidad no será objeto de este trabajo (puede verse en VÉLEZ, 1990; ERVITI & ERVITI, 1994; MOLINA, 1997b). Este estudio se realiza fundamentalmente en términos de probabilidad estructural de ignición, probabilidad estructural de incendio y probabilidad estructural de gran incendio. El carácter estructural indica que no se consideran aspectos meteorológicos, es decir, los cálculos se efectúan en primera instancia para cada macizo en función de sus variables no coyunturales. Finalmente se integra la meteorología, a través de situaciones sinópticas concretas y su interacción con los factores estructurales analizados.

Probabilidad estructural de ignición (Peig)

La probabilidad de ignición indica la posibilidad existente de que el combustible forestal (en concreto el fino muerto) entre en ignición al ponerse

* Estadística General de Incendios Forestales (Dir. Gen. Conservación Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente).

en contacto con una fuente de calor (pavesa, etc.). En el Anexo 1 se muestran todas las variables que intervienen en su cálculo que, en última instancia se resumen en tres: temperatura del aire, humedad del combustible muerto de una hora de tiempo de retardo (o combustible fino muerto -CFM-) y sombreado del combustible (ANDREWS, 1986; ANDREWS & CHASE, 1989). De todas ellas, se han seleccionado cuatro factores, que representan el conjunto de condiciones estructurales determinantes de dicha probabilidad.

1. Orientación (Tabla I)
2. Pendiente (Tabla II)
3. Sombreado del combustible (definido mediante cubierta arbórea y características del arbolado) (Tabla III)
4. Exposición de los combustibles al viento (Tabla IV)

TABLA I
LA ORIENTACION EN EL CALCULO DE LA
PROBABILIDAD ESTRUCTURAL DE IGNICION

Orientación	Exposición representativa
Solana	Sur (S)
Umbría	Norte (N)

TABLA II
LA PENDIENTE EN EL CALCULO DE LA
PROBABILIDAD ESTRUCTURAL DE IGNICION

Intervalo (%)	Valor representativo (%)
<5	2
6-25	15
26-35	30
36-55	45
>55	50

TABLA III
EL SOMBREADO DEL COMBUSTIBLE

Sombreado	Cubierta arbórea (%)	Ratio 1: longitud copa/altura árbol	Ratio 2: longitud copa/diámetro copa
Nulo	0		
Muy bajo	5	0,9	0,8
Medio-bajo	35	0,7	1,5
Medio-alto	65	0,5	2,2
Casi completo	95	0,3	3,3

* Los ratios 1 y 2 se utilizan en diversas opciones de BEHAVE, como SITE del módulo FIRE1 o MOISTURE del módulo FIRE2 (ANDREWS, 1986; ANDREWS & CHASE, 1989).

TABLA IV
LA EXPOSICION DE LOS COMBUSTIBLES
AL VIENTO

Exposición	Posición en la ladera
Expuestos	Cumbre
Parcialmente cubiertos	Ladera
Muy cubiertos	Fondo valle

Aunque en una primera aproximación se consideró la altitud como variable estructural, finalmente se fijó su valor en 600 m, dada la escasa influencia que ejercía sobre las oscilaciones de la probabilidad de ignición estructural, en las condiciones estudiadas (Anexos 3 y 4). Esta influencia era nula en estaciones con cubierta arbórea superior al 30 %, y en las inferiores, aunque modificaba ligeramente la humedad del combustible muerto de una hora, únicamente determinaba cambios en la probabilidad de ignición en algún caso con pendiente nula en exposición de solana, o con pendiente muy elevada en umbría.

Probabilidad estructural de incendio (Pein)

Corresponde a la valoración del comportamiento potencial del fuego (intensidad lineal de llama, velocidad de propagación y consumo de combustible). Se basa en el modelo de combustible (carga y estructura) y la fenología del mismo (descartando la consideración de la humedad del mismo que no se recoja en dicho estado fenológico, así como los vientos).

Esta probabilidad está muy relacionada con el índice de peligro (ICONA, 1993), que más propiamente se podría denominar «riesgo meteorológico de incendio». De dicho riesgo, extraemos únicamente los factores estructurales que intervienen, según se muestra en la figura siguiente.

Probabilidad estructural de gran incendio (Pegi)

Los días críticos de gran incendio forestal (entendiendo como tal el que supera las 500 ha), se pueden definir en términos meteorológicos. No es necesario más que observar la estadística de incendios y los registros meteorológicos para comprobar que muchos de los grandes incendios se producen bajo condiciones sinópticas muy

concretas (asociadas por ejemplo a fuertes vientos) o resultado de sequías prolongadas. Pero independientemente de los aspectos coyunturales o meteorológicos que se explican más adelante, se puede plantear la probabilidad de gran incendio en función de algunos factores estructurales. De tal modo que esta probabilidad estructural de gran incendio dependerá de:

1. Probabilidad estructural de ignición (Peig).
2. Condiciones estructurales de propagación.

En el Anexo 2 se muestran todas las variables que intervienen en el cálculo de la velocidad de propagación y área quemada, según los módulos DIRECT y SIZE de FIRE1 del sistema BEHAVE (ANDREWS, 1986; ANDREWS & CHASE, 1989). Entre ellas, las de carácter estructural son:

- Modelo de combustible: a través de un índice representativo del mismo (Tabla V).
- Pendiente (determina la velocidad de propagación).

- Factor de ajuste del viento (es estructural, aunque condicione el valor del viento efectivo) (Tabla VI).

La expresión para calcular la probabilidad de gran incendio estructural sería el producto de los cuatro factores anteriores*; aunque es cuestionable si el peso a otorgar a estos ha de ser el mismo.

Simulación

Se ha empleado el módulo FIRE2 del sistema BEHAVE, versión 4.3 (ANDREWS, 1986; ANDREWS & CHASE, 1989) para calcular el contenido de humedad de los combustibles muertos de una hora de retardo y la probabilidad de ignición estructural (opciones IGNITE y MOISTURE). La simulación se ha efectuado para los valores mostrados en las tablas anteriores, manteniendo constantes en todo momento las variables coyunturales que se presentan en el Anexo 1. Al no existir datos de humedad del combustible fino muerto, se supusieron valores correspondientes al

TABLA V
INDICE DE COMBUSTIBLE

Modelo de combustible	ICONA, 1990	Modelo de combustible	MOLINA Y BARDAJÍ, 1997*
5, 8, 9, Ir	1	8, 9, 10, 11, Ir	1
1, 2, 3	2	1, 2, 5, 7	2,5
4, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13	3	4	6
Ia, Iu	0	Ia Iu	0

* La segunda parte de la tabla es una adaptación de la propuesta por MOLINA Y BARDAJÍ (1997), tras múltiples simulaciones con BEHAVE, para la elaboración del Plan de Prevención de Incendios Forestales del Solsonès.

Ir, Ia, Iu: Improductivo roca, agua y urbano respectivamente.

TABLA VI
FACTOR DE AJUSTE DEL VIENTO (ROTHERMEL, 1983)

Exposición*	Modelo de combustible	Factor de ajuste del viento
Expuestos	4	0,6
	13	0,5
	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	0,4
Parcialmente cubiertos	Todos los modelos	0,3
Muy cubiertos	Todos los modelos/estaciones abiertas	0,2
	Todos los modelos/estaciones densas	0,1

* Los modelos 2 y 7 suelen estar parcialmente cubiertos, y los 8, 9 y 10 muy cubiertos.

* Pegi = Peig * Índice de combustible * Pendiente * Factor de ajuste del viento.

día anterior que oscilaban entre el 4 y el 20 %, para realizar la simulación sin descartar posibilidad alguna por dicho factor. Como limitación operativa en los cálculos hay que indicar que las probabilidades de ignición proporcionadas por BEHAVE se expresan en intervalos del 10 % (por ejemplo, el programa no distingue entre las probabilidades intermedias entre 40 y 50 %). Este redondeo pretende que no aparezcan valores de salidas que presupongan precisiones irrealistas.

Para simular el área quemada se ha usado el módulo FIRE1 (opciones DIRECT y SIZE) de BEHAVE. Al igual que en el caso anterior, los valores utilizados aparecen en las tablas precedentes y en el Anexo 2.

Asociación de las condiciones sinópticas a los grandes incendios

Tomando como ejemplo las sierras del macizo Tivissa - Vandellós (Tarragona), se ilustra como unas condiciones sinópticas determinadas afectan recurrentemente a la zona, originando grandes incendios en la misma. Estas condiciones se dividen en cuatro etapas independientemente de su duración real en días: inicio, progresión, desaparición y estabilización, que se relacionan con la evolución del gran incendio. Los mapas sinópti-

cos utilizados se pueden extraer actualmente de Internet, donde aparece su evolución a intervalos de 12 horas.

RESULTADOS Y DISCUSION

Índice de riesgo local e índice de dificultad de extinción

El índice de riesgo local indica la probabilidad de que haya incendios basada en datos históricos, causas y combustibles, no considerando la meteorología; es importante resaltar que se trata de número de incendios. La expresión de este índice se muestra en la Figura 1.

El índice de dificultad de extinción es el producto de los índices de Pendiente, Exposición, Combustibles y Densidad de Infraestructuras. Considera por tanto todos los parámetros estables que puedan afectar al grado de dificultad en las labores de extinción, faltando sólo la meteorología, de entre los tres elementos que constituyen el triángulo del comportamiento del fuego (Figura 1).

En la Figura 2, la probabilidad estructural de ignición encuadra varios aspectos referidos a la topografía y el combustible. Hay que considerar que estos últimos condicionan la dificultad de extinción y ésta, a su vez, las prioridades de defen-

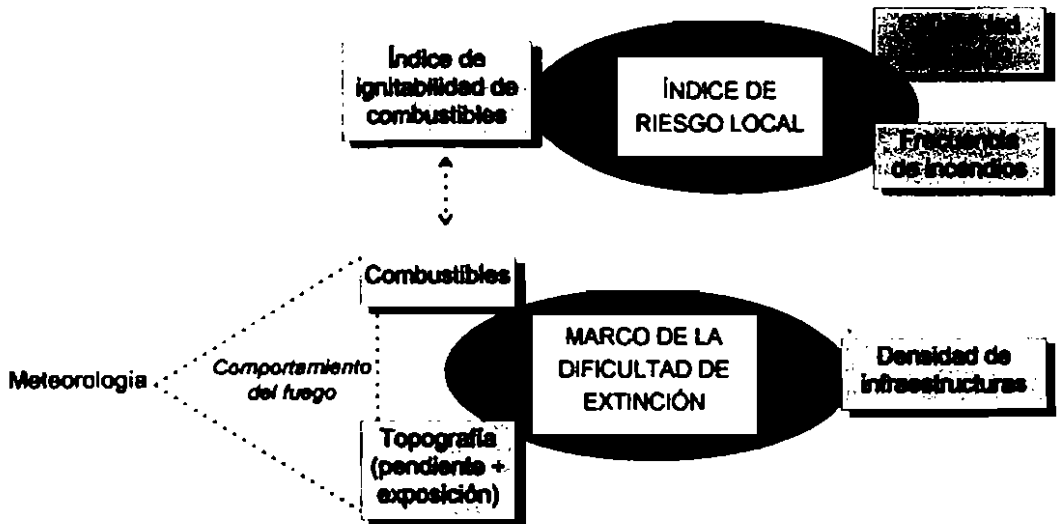


Fig. 1. El índice de riesgo local y el índice de dificultad de extinción.

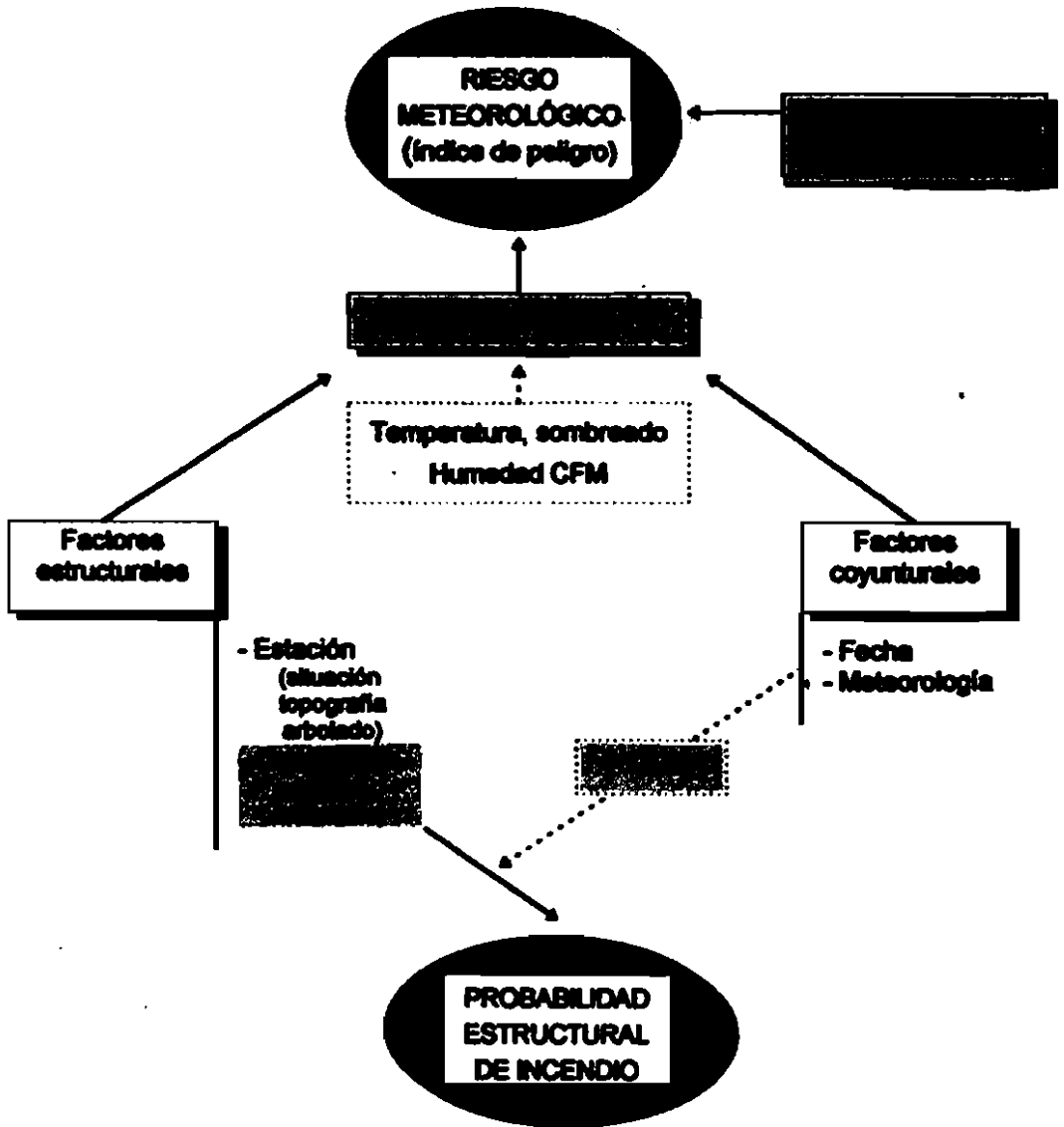


Fig. 2. Probabilidad estructural de incendio. Relación con el riesgo meteorológico.

sa a establecer en la prevención de incendios (siempre teniendo en cuenta el valor del sistema).

Probabilidad estructural de ignición

Centrándonos ahora en la probabilidad estructural de ignición, la Tabla VII resume algunos de los resultados de la simulación efectuada con BEHA-

VE para valores predeterminados de las condiciones coyunturales (fecha, meteorología, tipo de masa arbolada, etc.), y diferentes entradas de los factores estructurales considerados. En los Anexos 3, 4, 5 y 6 se presentan los resultados más notables.

Parece contradictorio plantear las casuísticas de alta exposición de combustibles junto a cubiertas

TABLA VII
 RESULTADOS PARCIALES DE LA SIMULACION EFECTUADA CON BEHAVE:
 % PROBABILIDAD DE IGNICION

Exposición combustibles al viento		Cubierta arbórea (%) y orientación									
		0		5		35		65		95	
		N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
Combustibles expuestos y parcialmente cubiertos*											
	2	50	50	50	50	40	40	30	30	30	30
Pendiente (%)	30	50	50	50	50	40	40	30	30	30	30
	60	40	50	40	50	30	40	30	30	30	30
Combustibles muy cubiertos (estación densa)											
	2	50	50	60	60	40	40	30	30	30	30
Pendiente (%)	30	50	50	50	60	40	40	30	30	30	30
	60	40	50	50	60	40	50	30	30	30	30

Supuestos: 31 de julio a las 14: 00 h, latitud 42 N, a 600 m de altitud. Temperatura de 25°, humedad relativa del 50%, velocidad del viento de 5 km/h, 10% de nubosidad, calma moderada. El contenido de humedad de CFM el día anterior fue de 8%. Modelo de combustible 2, masa de coníferas intolerante, con altura media de 12 m.

* Los resultados expresados en la tabla coinciden, para combustibles expuestos y parcialmente cubiertos.

arbóreas densas y su inversa. Ahora bien, aunque ambos factores suelen estar muy relacionados, representan aspectos diferentes de la probabilidad de ignición. La exposición de los combustibles (posición en la ladera) condiciona la probabilidad al modificar la humedad de los CFM por desecación debida al viento, la cubierta arbórea influye en dos sentidos: por un lado modifica localmente la exposición anterior, al dificultar o no la ventilación, y por otro determina el sombreado que influye en la desecación de los CFM por insolación directa. Por lo tanto, se puede estudiar el efecto de cada uno de estos factores de forma independiente.

Se aprecia con claridad la tendencia decreciente de la probabilidad de ignición en aquellas masas con alta cubierta arbórea. El sombreado del combustible es el factor estructural que más influye en dicha probabilidad. Por su parte, la orientación únicamente acentúa este efecto, de modo que la influencia del sombreado es más importante en las exposiciones de solana que en las de umbría (ver en Anexos la globalidad de resultados). Además, la orientación no influye en modo alguno si la cubierta es elevada.

El efecto de la pendiente varía según la exposición: mientras en las exposiciones de solana la probabilidad de ignición estructural aumenta con la pendiente, en las de umbría ocurre lo con-

trario, encontrándose las mayores probabilidades en los terrenos más llanos. Esto se explica puesto que en las solanas, a la latitud de 42° norte y en verano, se produce una mayor insolación sobre los terrenos en pendiente que sobre los llanos, por lo tanto la humedad de los combustibles muertos es menor en las laderas respecto a los llanos. En el caso de las umbrías esa insolación es siempre menor, pero el carácter de umbría se atenúa en zonas con menor pendiente (más expuestas); en estas áreas aumenta la probabilidad de ignición, respecto a aquéllas que cuentan con mayor pendiente.

En ambas exposiciones, el efecto se aminora cuando la cubierta arbórea es relativamente alta, hasta hacerse nulo en caso de sombreado completo. Por tanto, el factor pendiente será tanto más importante en cuanto se trate de estaciones más desarboladas.

El factor de ajuste del viento únicamente modifica la probabilidad de ignición estructural en las estaciones con cobertura arbórea relativamente baja, representadas en este estudio cuando ésta adquiere los valores de 5 y 35 % (Anexos). La explicación es que dicho factor depende del modelo de combustible y de la posición en la ladera, que determina la exposición del mismo (Tablas IV y VI). Por tanto, en estaciones con alta densidad de arbolado, independientemente de la

posición en la ladera, el efecto del viento sobre el combustible se verá atenuado por la masa arbolada. El efecto opuesto ocurre en estaciones sin arbolado, en que los combustibles siempre se ven afectados por el viento puesto que no hay barrera alguna que obstaculice su efecto. Es decir, altas coberturas arbóreas suelen ir ligadas a poca exposición (en esta ocasión, no por la posición topográfica de la estación, sino localmente, a nivel del interior de dicha estación) y al revés.

En los casos en que el factor de ajuste del viento condiciona la probabilidad de ignición (con cubiertas arbóreas relativamente pobres), su efecto es tal que, a mayor factor de ajuste (es decir, mayor exposición), la probabilidad de ignición también es mayor. Esto se explica puesto que el viento contribuye enormemente a la desecación de los combustibles finos muertos, cuyo contenido de humedad determina dicha probabilidad, por tanto, los combustibles más expuestos serán más susceptibles al efecto desecante. El factor de ajuste del viento ejerce esta influencia sobre la probabilidad de ignición estructural independientemente de las condiciones topográficas de orientación y pendiente.

Probabilidad estructural de gran incendio

La velocidad de propagación y la consecuente extensión afectada por un incendio se pueden apreciar en la Tabla VIII. Se han integrado como variables estructurales el modelo de combustible y la pendiente. Como se ve en la tabla, la superficie quemada sobre el modelo 9 del grupo hojarasca es substancialmente inferior a la afectada sobre el modelo 2 de pastos, y ésta a su vez que la del modelo 4 de matorral. Ello se desprende directamente de las diferentes velocidades de propagación que se registran en cada tipo. El

efecto de la pendiente es también muy pronunciado.

Aunque no aparece explícitamente en la tabla, el viento efectivo está integrado directamente por el sistema como cálculo intermedio. Parece pues que el factor de ajuste del viento interviene dos veces en la estimación de la probabilidad de gran incendio estructural: una formando parte de la probabilidad de ignición estructural, y otra en la velocidad de propagación. Esta apreciación se ajusta correctamente a la realidad, puesto que la influencia del viento (y por tanto del factor de ajuste), es doble e independiente: por un lado deseca los combustibles, facilitando la ignición, y por otro ayuda a la propagación del fuego.

Probabilidad de gran incendio asociado a situaciones sinópticas

En el área global de estudio (macizo de Tivissa - Vandellós) se solapan las influencias del Sistema Ibérico, Valle del Ebro y Sierra Litoral Catalana. Sobre este territorio se han distinguido tres situaciones sinópticas: A, B y C (Figura 3), que son causa de grandes incendios, a su vez con características diferentes y una localización concreta (CASTELLNOU, 1997). Estos grandes incendios únicamente se producen bajo dichas condiciones, siempre y cuando el resto de factores que permiten la propagación sea el adecuado, como la existencia de una relativa sequía, etc. y su duración temporal está sujeta a la de las mismas. El estudio de la historia de incendios en el área global ha permitido identificar una parte de la misma, con una evolución concreta de la situación sinóptica y el evento derivado de gran incendio (que responde a una tipología muy concreta en cuanto a su propagación y desarrollo). Otras partes del área global están asociadas a

TABLA VIII
OCURRENCIA DE GRAN INCENDIO, SEGUN MODELO DE COMBUSTIBLE Y PENDIENTE

	Velocidad Propagación (m/min)			Area quemada (ha)		
	modelo 2	modelo 4	modelo 9	modelo 2	modelo 4	modelo 9
Pendiente						
2%	7	18	2	529	4014	37
30%	9	23	2	816	5658	55
60%	15	37	4	1938	11570	120

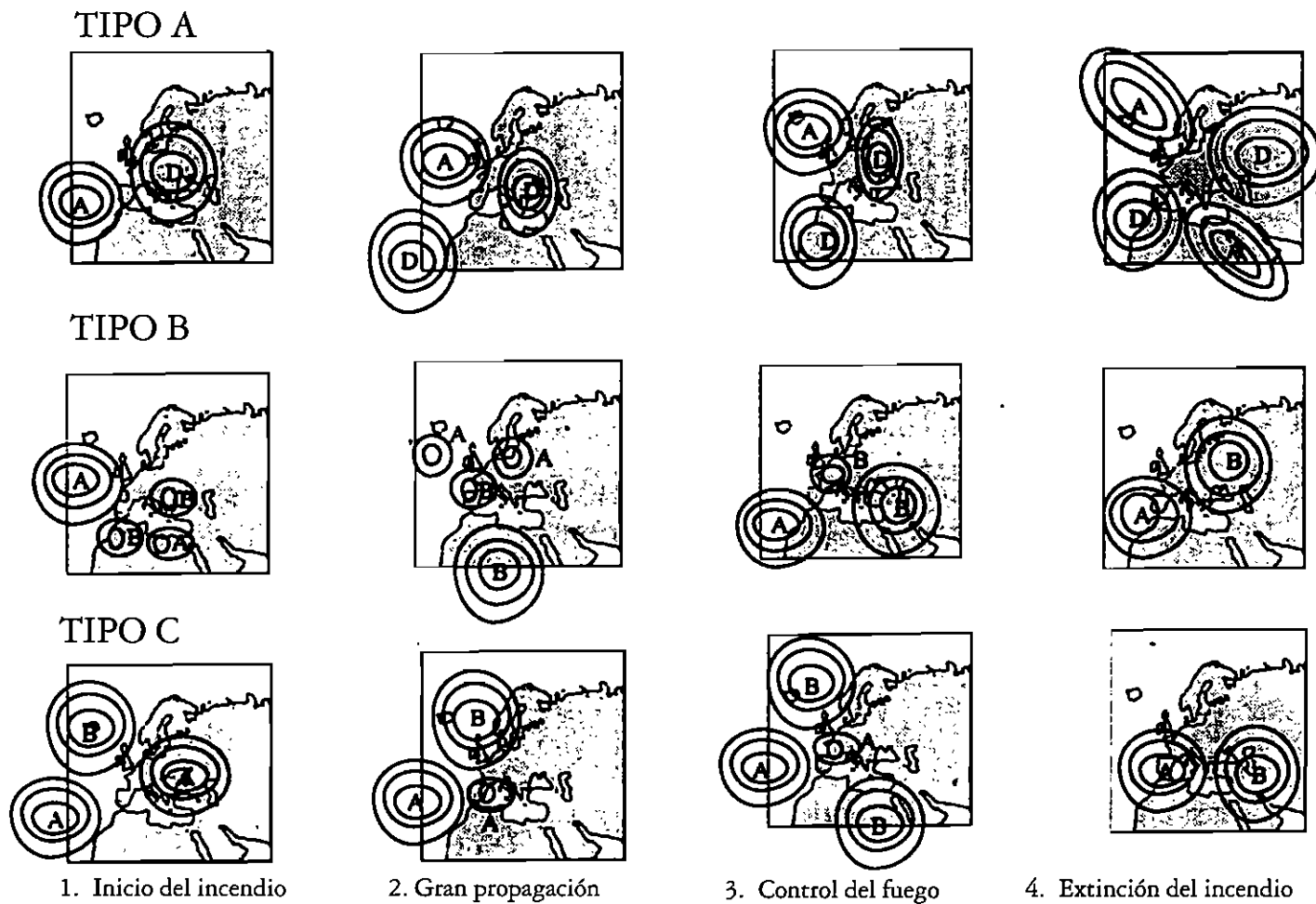


Fig. 3. Condiciones sinópticas divididas en etapas que originan grandes incendios en el área Tivissa - Vandellón. (CASTELLNOU, 1997).

situaciones sinópticas diferentes en cuanto al desencadenamiento y la tipología del gran incendio se refiere.

En definitiva, se ha llegado a una zonificación del área global según condiciones sinópticas (coyunturales), a través de la observación de la respuesta a las mismas, traducida en ignición y desarrollo de grandes incendios (CASTELLNOU, 1997). La zonificación en términos coyunturales se entiende mejor observando los ejemplos de la Figura 3, que corresponden a las condiciones de:

1. *Situación sinóptica A: temporales del noroeste, asociados a fuertes vientos de Poniente (Mistral).*

Esta situación se produce básicamente en primavera y otoño, favorecida por el flujo general atmosférico del oeste, cuando se sitúa un centro de altas presiones sobre el Atlántico y uno de bajas presiones que afecta al Este del Mediterráneo.

2. *Situación sinóptica B: tormentas secas en el Sistema Ibérico.*

Se desarrolla durante el verano, a causa de un centro de bajas presiones sobre la Península Ibérica, originado por calentamiento superficial, que provoca fuertes corrientes convectivas ascendentes, las cuales actúan como auténticas chimeneas, favoreciendo el desarrollo y propagación del incendio (HERNÁNDEZ *et al.*, 1995). En estos días dominan los vientos locales y de convección y, a diferencia del Mistral, encontramos ciclos diarios de viento con diferente velocidad y dirección según la hora.

3. *Situación sinóptica C: Cuña anticiclónica sobre la Península Ibérica.*

Se ven favorecidas las «marinadas» (en el Litoral Catalán son los vientos procedentes del mar, que se dirigen hacia tierra) y viento de Levante. Es una situación típica de verano, cuando el Anticiclón de las Azores se centra y origina esa cuña.

En la Figura 4, se distinguen las tres áreas donde se producen los grandes incendios en cada condición sinóptica respectivamente. Si la situación de los factores estructurales lo permite, al darse las condiciones sinópticas de tipo A, la zona suscep-

tible de sufrir grandes incendios es la de Vandellós - Jovara - Aumet. En estas cuencas de la Sierra Litoral, orientadas en dirección NW, los vientos de Mistral propios de la situación A afectan especialmente, al entrar dirigidos a dicha sierra con mucha fuerza. Por el contrario, si las condiciones son de tipo B, los grandes incendios se producen en el área de la Serra de la Creu y últimas estribaciones del Sistema Ibérico; en ellas, los vientos de convección que acompañan a las tormentas secas se ven reforzados por el efecto del Valle del Ebro y sus vientos de ladera. Finalmente, las condiciones de tipo C originan incendios sobre el área de las cuencas de la Serra de Mar, que se ve especialmente afectada por los vientos procedentes del mar y los de Levante.

Hay que hacer hincapié en que estas condiciones sinópticas no siempre originan incendios. De tal modo que si la humedad en las capas de la atmósfera es elevada y se producen lluvias, si el estado de humedad del combustible (derivado de las condiciones meteorológicas pasadas) no es el propicio, o bien el viento no facilita la propagación, es posible que aunque se produzca la ignición, no se transforme en un gran incendio.

Además, el efecto de la condición sinóptica depende del macizo o área con que interacciona. Por ejemplo, entre los días 24 y 27 de julio de 1997, se desarrolló la condición sinóptica de tipo A para el área Tivissa - Vandellós, pero su núcleo quedó desplazado hacia el noreste originando el gran incendio que afectó a la región de Marsella, sobre un área cuya estructura es muy similar a la de aquella (y por tanto el efecto de la condición sinóptica también). En este caso, el temporal del NW no se transformó en gran incendio en el macizo de Tivissa - Vandellós, puesto que el «grueso» de la condición sinóptica tan sólo rozó esta zona, manifestándose de lleno en la costa Azul (ver Lámina VI). Dicho temporal no iba acompañado de tormentas que produjeran ignición (ésta fue antrópica), pero sí que desencadenó fuertes vientos, que facilitaron la condición de gran incendio. Este ejemplo muestra que las diferentes condiciones sinópticas tienen un marcado dinamismo espacial y a la vez temporal: su duración, inicio y final varían en las distintas épocas del año y sobre diversos territorios.

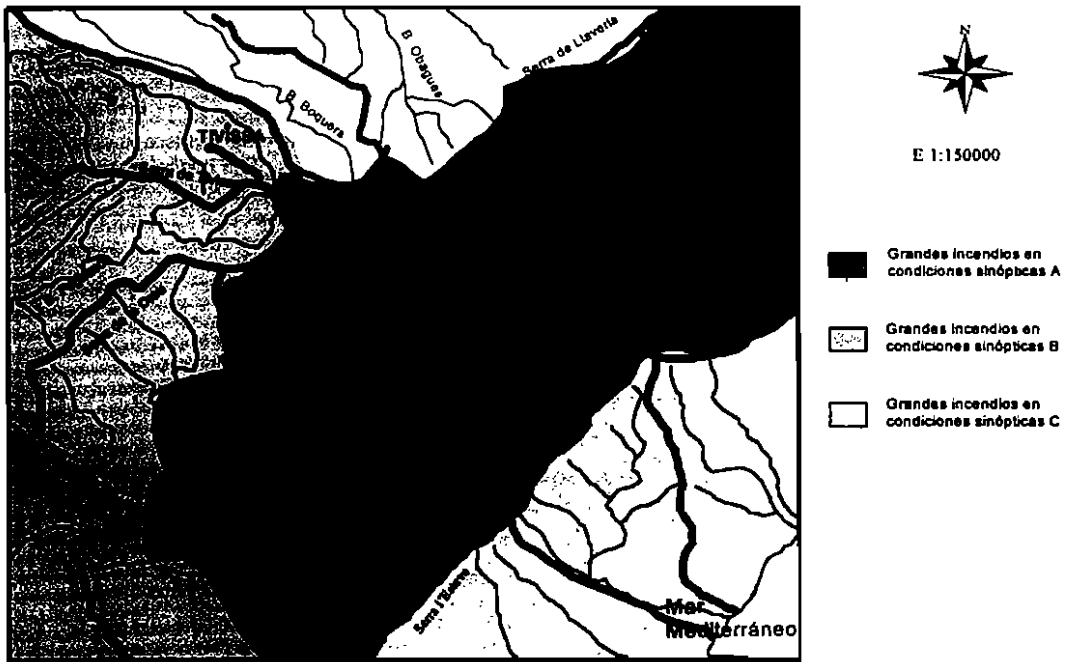


Fig. 4. División del macizo Tivissa - Vandellós según las condiciones sinópticas que definen el comportamiento de los grandes incendios forestales. (CASTELLNOU, 1997).

Otros estudios en diferentes ámbitos territoriales han llegado a resultados semejantes, (HERNÁNDEZ *et al.*, 1995; BROTAK *et al.*, 1980). De todos ellos se desprende la importancia de comprender y utilizar la interacción entre características estructurales de las distintas áreas geográficas y aquellas coyunturales que suelen ir asociadas a episodios de grandes incendios en las mismas (en definitiva a su régimen). La aplicación más inmediata está en la asignación de prioridades en prevención y extinción de incendios (en caso de igniciones simultáneas por ejemplo), que repercuten directamente sobre la ocurrencia de grandes incendios.

CONCLUSIONES

La vulnerabilidad del territorio frente a incendios forestales se puede cartografiar en términos únicamente estructurales. Se ha analizado la probabilidad de ignición y de ocurrencia de gran

incendio, según factores suficientemente estables a una escala temporal razonable. A diferencia de los factores coyunturales, los estructurales son siempre cognoscibles con antelación y en algunos casos modificables; por tanto, la actuación sobre aquellos que lo permitan (cubierta arbórea o modelo de combustible) ayuda a reducir la vulnerabilidad en los lugares más críticos respecto al resto de factores estructurales (orientación o pendiente).

Se puede describir estructuralmente el territorio, así como conocer la vulnerabilidad del mismo frente a incendios forestales en situaciones sinópticas concretas (por registro histórico). Por lo tanto, en muchos casos, es posible definir la tipología de incendio previsible, derivada de la interacción entre factores estructurales y coyunturales. Para ello no es necesario detallar estos últimos concretamente, puesto que quedan en buena parte englobados y explicados por dicha situación sinóptica.

SUMMARY

We analyzed both the structural and meteorological components affecting the probability of occurrence of a large fire (>500 ha). We paid special attention to the influence of structural factors in both ignition probability and probability of an ignition to become a large fire. We used BEHAVE to simulate the propagation of many wildland fires and to observe the effects of varying landscape attributes (slope, aspect, fuel model...) on both probability of ignition and large fires. The probability of large fires, when meteorology is explicitly considered, is given by coexistence of the three conditions: an adverse synoptic condition, a low live fuel moisture content and a high level of a fire danger index involving air temperature, wind, and fuel moisture content of 10 hour time-lag fuels.

Key Words: Ignition probability, large fire, suppression difficulty, synoptic maps.

ANEXO 1

Relación de las variables de entrada requeridas por BEHAVE para el cálculo de la probabilidad de ignición y valores prefijados que se han utilizado en las de carácter coyuntural

Opción de RUN	Cálculos para el momento del fuego (1)
Hora, día y mes del fuego	14 h del 31 de julio
Latitud	42 Norte
Modelo de combustible	2
Pendiente del terreno	
Altitud del fuego y del observatorio meteorológico	600 m
Orientación	
Cubierta cubierta	
Follaje	Presente
Tolerancia a la sombra	Intolerante
Tipo de arbolado dominante	Coníferas
Altura media del arbolado	12 m
Ratio de longitud copa / altura del arbolado	
Ratio de longitud / diámetro de copa	
Temperatura y humedad relativa el día del fuego a las 14 h	25°C y 50 %
Velocidad del viento a 6 m de altura el día del fuego a las 14 h	5 km/h
Cubierta de nubes el día del fuego a las 14 h	10 %
Condiciones de visibilidad el día del fuego a las 14 h	Calima moderada
Exposición de los combustibles al viento	
(Factor de ajuste del viento)	
Opción de inicialización de la humedad	Humedad combustible muerto 1 hora conocida el día anterior
	Valores utilizados: 4, 8, 12, 16 y 20 %

- No figuran datos para las variables de carácter estructural, que adquirirán diferentes valores en la simulación.
- La probabilidad de ignición no depende del modelo de combustible.

ANEXO 2

Relación de las variables de entrada requeridas por BEHAVE para el cálculo de la Velocidad de propagación y área quemada y valores prefijados que se han utilizado en las de carácter coyuntural

VELOCIDAD DE PROPAGACION

Modelo de combustible*

Humedad combustible muerto 1 hora	Valores utilizados: 4 %
Humedad combustible muerto 10 horas	8 %
Humedad combustible muerto 100 horas	12 %
Humedad combustible herbáceo vivo	75 %
Humedad combustible leñoso vivo	75 %

Pendiente del terreno

Dirección del viento

En máxima pendiente, ladera arriba

Dirección de cálculo de la propagación

Dirección de máxima propagación (igual a la del viento)

AREA QUEMADA

Velocidad de propagación

Exposición de combustibles al viento (factor de ajuste del viento) Es cálculo intermedio del sistema

Tiempo transcurrido 8 horas (máximo valor permitido por el sistema)

- No figuran datos para las variables de carácter estructural, que adquirirán diferentes valores en la simulación.

ANEXO 3

Resultados de la simulación con BEHAVE: Probabilidad de ignición
Altitud 600 m; exposición de combustibles 1 (expuestos)

Cubierta arbórea Morfología arbolado	ORIENTACION SUR						ORIENTACION NORTE						
	2%		30%		60%		2%		30%		60%		
	pendiente		pendiente		pendiente		pendiente		pendiente		pendiente		
% H 1 hl dia anterior	% H 1hr día del fuego	% Prob. ign.	% H 1hr día del fuego	% Prob. ign.	% H 1hr día del fuego	% Prob. ign.	% H 1hr día del fuego	% Prob. ign.	% H 1hr día del fuego	% Prob. ign.	% H 1hr día del fuego	% Prob. ign.	
Nulo (0%)	4	5,1	60	4,9	70	5,0	70	5,1	60	5,4	60	5,9	60
	8	6,8	50	6,4	50	6,6	50	6,8	50	7,3	50	7,4	40
	12	7,0	50	6,6	50	6,8	50	7,1	50	7,8	40	8,7	40
	16	7,3	50	6,8	50	7,0	50	7,4	50	8,2	40	9,2	30
Muy escaso (5 %)	20	7,6	50	7,1	50	7,3	50	7,7	40	8,6	40	9,8	30
	4	5,2	60	5,1	60	5,1	60	5,2	60	5,5	60	6,0	50
	8	7,0	50	6,8	50	6,8	50	7,0	50	7,3	50	7,4	40
	12	7,3	50	7,0	50	7,1	50	7,3	50	8,0	40	9,0	40
Ratios: 0,9 y 0,8	16	7,6	40	7,3	50	7,4	50	7,6	40	8,5	40	9,6	30
	20	8,0	40	7,6	50	7,7	40	8,0	40	8,9	40	10,2	30
	4	6,4	50	6,2	50	6,1	50	6,4	50	6,8	50	7,2	40
	8	7,9	40	7,6	40	7,5	40	7,9	40	8,4	40	8,9	30
Medio-bajo (35 %)	12	9,7	30	9,3	30	9,2	30	9,8	30	10,5	30	11,2	20
	16	10,5	30	10	30	9,8	30	10,5	30	11,4	20	12,2	20
	20	11,2	20	10,6	30	10,5	30	11,3	20	12,3	20	13,2	20
	4	7,8	40	7,7	40	7,5	40	7,9	40	8,0	40	8,0	40
Medio-alto (65 %)	8	9,7	30	9,4	30	9,2	30	9,8	30	9,9	30	9,9	30
	12	11,6	20	11,5	20	11,5	20	11,6	20	11,7	20	11,7	20
	16	13,6	20	13,2	20	12,8	20	13,7	20	13,8	10	13,8	10
	20	14,8	10	14,3	10	13,9	20	14,9	10	15,1	10	15,1	10
Completo (95 %)	4	8,0	40	8,0	40	8,0	40	8,0	40	8,0	40	8,0	40
	8	9,9	30	9,9	30	9,9	30	9,9	30	9,9	30	9,9	30
	12	11,7	20	11,7	20	11,7	20	11,7	20	11,7	20	11,7	20
	16	13,8	10	13,8	10	13,8	10	13,8	10	13,8	10	13,8	10
20	15,1	10	15,1	10	15,1	10	15,1	10	15,1	10	15,1	10	

% H 1hr: Porcentaje de humedad del combustible fino muerto de una hora, %Prob. Ign.: Porcentaje de probabilidad de ignición.

ANEXO 4

Resultados de la simulación con BEHAVE: Probabilidad de ignición
Altitud 600 m; exposición de combustibles 2 (parcialmente cubiertos)

Cubierta arbórea Morfología arbolado	ORIENTACION SUR						ORIENTACION NORTE						
	2%		30%		60%		2%		30%		60%		
	pendiente		pendiente		pendiente		pendiente		pendiente		pendiente		
% H 1 h l día anterior	% H 1 h l del fuego	% Prob. ign.	% H 1 h l del fuego	% Prob. ign.	% H 1 h l del fuego	% Prob. ign.	% H 1 h l del fuego	% Prob. ign.	% H 1 h l del fuego	% Prob. ign.	% H 1 h l del fuego	% Prob. ign.	
Nulo (0 %)	4	5,1	60	4,9	70	5,0	70	5,1	60	5,4	60	5,9	60
	8	6,8	50	6,4	50	6,6	50	6,8	50	7,3	50	7,4	40
	12	7,0	50	6,6	50	6,8	50	7,1	50	7,8	40	8,7	40
	16	7,3	50	6,8	50	7,0	50	7,4	50	8,2	40	9,2	30
Muy escaso (5 %) Ratios: 0,9 y 0,8	20	7,6	50	7,1	50	7,3	50	7,7	40	8,6	40	9,8	30
	4	5,1	60	5,0	70	5,0	70	5,1	60	5,4	60	6,0	50
	8	6,8	50	6,6	50	6,6	50	6,8	50	7,3	50	7,4	40
	12	7,1	50	6,8	50	6,8	50	7,1	50	7,8	40	8,9	40
Medio-bajo (35 %) Ratios: 0,7 y 1,5	16	7,4	50	7,0	50	7,0	50	7,4	50	8,2	40	9,5	30
	20	7,7	40	7,3	50	7,3	50	7,7	40	8,7	40	10,1	30
	4	6,3	50	6,1	50	6,0	50	6,4	50	6,7	50	7,1	40
	8	7,8	40	7,5	40	7,4	40	7,9	40	8,3	40	8,7	30
Medio-alto (65 %) Ratios: 0,5 y 2,2	12	9,6	30	9,2	30	9,0	40	9,7	30	10,3	30	11,0	20
	16	10,3	30	9,8	30	9,6	30	10,5	30	11,2	20	12,0	20
	20	11,0	30	10,5	30	10,2	30	11,2	20	12,0	20	12,9	20
	4	7,8	40	7,7	40	7,5	40	7,9	40	8,0	40	8,0	40
Completo (95 %) Ratios: 0,3 y 3	8	9,7	30	9,4	30	9,2	30	9,8	30	9,9	30	9,9	30
	12	11,6	20	11,5	20	11,5	20	11,6	20	11,7	20	11,7	20
	16	13,6	20	13,2	20	12,8	20	13,7	20	13,8	10	13,8	10
	20	14,8	10	14,3	10	13,9	20	14,9	10	15,1	10	15,1	10
	4	8,0	40	8,0	40	8,0	40	8,0	40	8,0	40	8,0	40
	8	9,9	30	9,9	30	9,9	30	9,9	30	9,9	30	9,9	30
	12	11,7	20	11,7	20	11,7	20	11,7	20	11,7	20	11,7	20
	16	13,8	10	13,8	10	13,8	10	13,8	10	13,8	10	13,8	10
	20	15,1	10	15,1	10	15,1	10	15,1	10	15,1	10	15,1	10

% H 1 h l: Porcentaje de humedad del combustible fino muerto de una hora, %Prob. Ign.: Porcentaje de probabilidad de ignición.

ANEXO 5

**Resultados de la simulación con BEHAVE: Probabilidad de ignición
Altitud 900 m; exposición de combustibles 2 (parcialmente cubiertos)**

Cubierta arbórea Morfología arbolado	ORIENTACION SUR						ORIENTACION NORTE						
	2%		30%		60%		2%		30%		60%		
	pendiente		pendiente		pendiente		pendiente		pendiente		pendiente		
	% H 1 hr día anterior	% H 1 hr día del fuego	% Prob. ign.	% H 1 hr día del fuego	% Prob. ign.	% H 1 hr día del fuego	% Prob. ign.	% H 1 hr día del fuego	% Prob. ign.	% H 1 hr día del fuego	% Prob. ign.	% H 1 hr día del fuego	% Prob. ign.
Nulo (0 %)	4	5,0	70	4,9	70	4,9	70	5,1	60	5,3	60	5,9	60
	8	6,6	50	6,4	50	6,4	50	6,8	50	7,2	50	7,4	40
	12	6,9	50	6,6	50	6,6	50	7,0	50	7,6	40	8,7	40
	16	7,1	50	6,8	50	6,8	50	7,3	50	8,0	40	9,2	30
	20	7,4	50	7,0	50	7,1	50	7,6	50	8,4	40	9,8	30
Muy escaso (5 %) Ratios: 0,9 y 0,8	4	5,1	60	4,9	70	4,9	70	5,1	60	5,4	60	5,9	60
	8	6,8	50	6,4	50	6,4	50	6,8	50	7,3	50	7,4	40
	12	7,0	50	6,6	50	6,6	50	7,1	50	7,8	40	8,7	40
	16	7,3	50	6,8	50	6,8	50	7,4	50	8,2	40	9,3	30
Medio-bajo (35 %) Ratios: 0,7 y 1,5	4	6,3	50	6,1	50	6,0	50	6,3	50	6,7	50	7,1	40
	8	7,8	40	7,5	40	7,4	40	7,8	40	8,3	40	8,7	30
	12	9,6	30	9,1	30	9,0	40	9,6	30	10,3	30	11,0	20
	16	10,3	30	9,7	30	9,6	30	10,3	30	11,2	20	12,0	20
Medio-alto (65 %) Ratios: 0,5 y 2,2	4	7,8	40	7,7	40	7,5	40	7,9	40	8,0	40	8,0	40
	8	9,7	30	9,4	30	9,2	30	9,8	30	9,9	30	9,9	30
	12	11,6	20	11,5	20	11,5	20	11,6	20	11,7	20	11,7	20
	16	13,6	20	13,2	20	12,8	20	13,7	20	13,8	10	13,8	10
Completo (95 %) Ratios: 0,3 y 3	4	8,0	40	8,0	40	8,0	40	8,0	40	8,0	40	8,0	40
	8	9,9	30	9,9	30	9,9	30	9,9	30	9,9	30	9,9	30
	12	11,7	20	11,7	20	11,7	20	11,7	20	11,7	20	11,7	20
	16	13,8	10	13,8	10	13,8	10	13,8	10	13,8	10	13,8	10
	20	15,1	10	15,1	10	15,1	10	15,1	10	15,1	10	15,1	10

% H 1 hr: Porcentaje de humedad del combustible fino muerto de una hora, %Prob. Ign.: Porcentaje de probabilidad de ignición.

ANEXO 6

Resultados de simulación con BEHAVE: Probabilidad de ignición
Altitud 600 m; exposición de combustibles 4 (muy cubiertos, estación densa)

Cubierta arbórea Morfología arbolado	ORIENTACION SUR						ORIENTACION NORTE						
	2%		30%		60%		2%		30%		60%		
	pendiente		pendiente		pendiente		pendiente		pendiente		pendiente		
% H 1 h l día anterior	% H 1 hr día del fuego	% Prob. ign.	% H 1 hr día del fuego	% Prob. ign.	% H 1 hr día del fuego	% Prob. ign.	% H 1 hr día del fuego	% Prob. ign.	% H 1 hr día del fuego	% Prob. ign.	% H 1 hr día del fuego	% Prob. ign.	
Nulo (0 %)	4	5,1	60	4,9	70	5,0	70	5,1	60	5,4	60	5,9	60
	8	6,8	50	6,4	50	6,6	50	6,8	50	7,3	50	7,4	40
	12	7,0	50	6,6	50	6,8	50	7,1	50	7,8	40	8,7	40
	16	7,3	50	6,8	50	7,0	50	7,4	50	8,2	40	9,2	30
	20	7,6	50	7,1	50	7,3	50	7,7	40	8,6	40	9,8	30
Muy escaso (5 %) Ratios: 0,9 y 0,8	4	4,8	70	4,6	70	4,6	70	4,8	70	5,1	60	5,7	60
	8	6,1	60	5,9	60	5,9	60	6,1	60	6,8	50	7,3	50
	12	6,3	60	6,0	60	6,0	60	6,3	50	7,1	50	8,3	40
	16	6,4	50	6,1	60	6,1	60	6,5	50	7,4	50	8,7	40
Medio-bajo (35 %) Ratios: 0,7 y 1,5	4	6,1	50	5,9	60	5,8	60	6,1	50	6,5	50	7,0	50
	8	7,5	40	7,4	40	7,4	50	7,5	40	8,0	40	8,6	40
	12	9,2	30	8,7	40	8,5	40	9,2	30	9,9	30	10,8	30
	16	9,8	30	9,2	30	9,0	40	9,8	30	10,7	30	11,8	20
Medio-alto (65 %) Ratios: 0,5 y 2,2	4	7,8	40	7,6	40	7,4	40	7,9	40	8,0	40	8,0	40
	8	9,7	30	9,3	30	9,1	30	9,8	30	9,9	30	9,9	30
	12	11,6	20	11,5	20	11,4	20	11,6	20	11,7	20	11,7	20
	16	13,6	20	13,0	20	12,6	20	13,7	20	13,8	10	13,8	10
Completo (95 %) Ratios: 0,3 y 3	4	14,8	10	14,1	10	13,6	20	14,9	10	15,1	10	15,1	10
	8	8,0	40	8,0	40	8,0	40	8,0	40	8,0	40	8,0	40
	12	9,9	30	9,9	30	9,9	30	9,9	30	9,9	30	9,9	30
	16	11,7	20	11,7	20	11,7	20	11,7	20	11,7	20	11,7	20
	20	13,8	10	13,8	10	13,8	10	13,8	10	13,8	10	13,8	10
	20	15,1	10	15,1	10	15,1	10	15,1	10	15,1	10	15,1	10

% H 1hr: Porcentaje de humedad del combustible fino muerto de una hora, %Prob. Ign.: Porcentaje de probabilidad de ignición.

BIBLIOGRAFIA

ANDERSON H.E.:1982: *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior*. USDA For Ser, Gen. Tech Rep. INT 122, 22 p.

ANDREWS P.L. 1986: *BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system - BURN subsystem, Part 1*. USDA For Ser, Gen. Tech Rep. INT 194. 130 p.

ANDREWS P.L. & CHASE C.H. 1989: *BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system - BURN subsystem, Part 2*. USDA For Ser, Gen. Tech Rep. INT 260.

BROTAK E.A. et al. 1980: *Proceedings 6th National Conference on Fire and Forest Meteorology*. Seattle, 66.

CASTELLNOU M. 1997: *Principis de gestió dels grans incendis forestals a la zona de Trivissa - Vandellòs: Maneig de la successió*. Proyecto Final de Carrera Ing. Monteš. ETSEA - UdL, Lleida.

ERVITI M.V. & ERVITI J.J. 1994: «Incendios forestales y espacios naturales protegidos». *Montes*, 37: 61-63

- HERNÁNDEZ E., DÍAZ J., CANA L.C. & MARTÍN I.J. 1995: «Incendios Forestales y Meteorología de Montaña». *Mundo Científico*, 155: 254-258.
- ICONA 1987: *Manual de prevención de incendios mediante tratamiento del combustible forestal*. MAPA, Madrid.
- ICONA 1990: *Elaboración de un plan comarcal de defensa contra incendios forestales*. Inédito.
- ICONA 1993: *Manual de operaciones contra incendios forestales*. MAPA, Madrid.
- MOLINA D.M. 1997a: «Quemas prescritas y su simulación». In: *Actas 1^{er} Seminario Nacional - Estado de la investigación y el desarrollo en la protección contra incendios forestales en España*. pp. 147-158. Lugo, Abril 1997.
- MOLINA D.M. 1997b: «Origins of Arson in Northwestern Spain». *Fire Management Notes* 57(3):18-23, USDA, Washington, USA.
- MOLINA D.M., & BARDAJÍ M. 1997: *Plan de Prevención de Incendios Forestales de la Comarca del Solsonès*. 3^{er} borrador, Convenio Departamento de Agricultura (Generalitat de Catalunya) y Universidad de Lleida. Solsona, 3 jul. 140 p.
- MOLINA D.M. & BARDAJÍ M. 1998: «Criterios para la asignación de modelos de combustible: caso de la comarca de Solsonès (Lleida)». *Montes* 51: 54-62.
- ROTHERMEL R.C. 1972: *A mathematical model for predicting fire spread in wildlands fuels*. USDA Forest Service, Research Paper INT-115, Ogden, UT, USA. 40p.
- ROTHERMEL R.C. 1983: *How to predict the spread and intensity of forest and range fires*. USDA Forest Service, General Technical Report INT-143, Ogden, UT, USA.
- VÉLEZ R. 1990: «Los incendios forestales en España». *Ecología*, Fuera de serie N.1, pp. 213-221, ICONA, Madrid, España.