

# **Efectivitat dels tractaments de combustible en la reducció del risc de propagació d'incendi<sup>1</sup>**

**Rut Domènech**

*rut.domenech@upc.edu*

**Elsa Pastor**

*elsa.pastor@upc.edu*

**Eulàlia Planas**

*eulalia.planas@upc.edu*

*Centre d'Estudis del Risc Tecnològic (CERTEC)  
Universitat Politècnica de Catalunya*

## **Resum**

Els programes de simulació han estat àmpliament utilitzats en l'estudi del comportament dels incendis forestals i concretament en l'avaluació de l'efectivitat dels tractaments de combustible. Aquests tractaments, tals com les cremes prescrites o les aclarides, provoquen la modificació de l'estructura de les masses forestals i, per tant, de certs paràmetres bàsics del combustible que condicionaran el comportament d'un eventual incendi. Els diferents estudis que han avaluat els tractaments de combustible en la reducció del risc de propagació d'incendi evidencien la seva efectivitat. Tanmateix, aquests estudis no estan en consonància sobre quin tipus de tractament és el més efectiu. En aquest treball s'inclou una revisió bibliogràfica sobre l'avaluació de l'efectivitat dels tractaments de combustible, detallant en profunditat la metodologia utilitzada i els resultats obtinguts.

---

1. Aquest treball ha estat possible gràcies al suport proporcionat pel Ministerio de Ciencia y Educacion mitjançant el projecte AGL2008-01161, per la Generalitat de Catalunya mitjançant el projecte 2009SGR1118 i per la Diputació de Barcelona a través del projecte IRVA.

**Paraules clau:** tractaments silvícoles, aclarides, comportament del foc, simulació d'incendis forestals.

**Resumen:** *Efectividad de los tratamientos de combustible en la reducción del riesgo de propagación de incendio*

Los programas de simulación han sido ampliamente utilizados en el estudio del comportamiento de los incendios forestales y concretamente en la evaluación de la efectividad de los tratamientos de combustible. Estos tratamientos, tales como las quemas prescritas o clareo provocan la modificación de la estructura de las masas forestales y, por lo tanto, de ciertos parámetros básicos del combustible que condicionarán el comportamiento de un eventual incendio. Los diferentes estudios que han evaluado los tratamientos de combustible en la reducción del riesgo de propagación de incendio evidencian su efectividad. Aun así, estos estudios no están en consonancia sobre qué tipo de tratamiento es el más efectivo. En este trabajo se incluye una revisión bibliográfica sobre la evaluación de la efectividad de los tratamientos de combustible detallando en profundidad la metodología utilizada y los resultados obtenidos.

**Palabras clave:** tratamientos silvícolas, clareos, comportamiento del fuego, simulación de incendios forestales.

**Abstract:** *Fuel treatment effectiveness in reducing the fire risk propagation*

Simulation tools have been widely used in evaluating the effectiveness of fuel treatments on wildfire behavior. Fuel treatments, such as prescribed burning or thinning, lead to changes in the forest structure and therefore modify certain basic parameters that may influence the fuel's behavior in a potential fire. Fuel treatments have been shown to be effective at mitigating fire damages in various studies. However, these studies are not consistent regarding what treatment is the most efficient. This paper reviews the state of the art on the evaluation of the effectiveness of fuel treatments paying special attention to the methodology used to assess them and the results obtained.

**Keywords:** forest management, thinning, fire behavior, fire simulation.

\* \* \*

## Introducció

Els tractaments de combustible modifiquen la composició de les espècies vegetals, l'estructura, la disponibilitat, la distribució i la humitat del combustible i el comportament dels vents de superfície. Els objectius d'aquests tractaments inclouen la redistribució del creixement anual dels arbres, la regulació de les espècies d'arbres existents, l'increment de la producció forestal, la millora de l'ecosistema, especialment en termes d'hàbitat de fauna salvatge, i la reducció de la vulnerabilitat davant l'incendi forestal (Graham *et al.*, 1999).

En els casos en què els tractaments de combustible s'utilitzen per modificar el comportament dels incendis forestals, genèricament el que es pretén és reduir la càrrega de combustible per tal que en cas que tingui lloc un incendi forestal aquest es propagui més lentament i amb menys intensitat, tingui menys severitat i sigui més fàcil de controlar. Per tal d'assolir aquest objectiu i a la vegada assegurar una bona resiliència dels boscos davant els incendis forestals, els tractaments de combustible han de considerar un o més dels següents quatre principis bàsics (Agee i Skinner, 2005): la reducció de la quantitat de combustible de superfície, l'increment de la distància entre el combustible de superfície i el de capçada, la reducció de la densitat de les capçades i la preservació dels arbres grans de les espècies més resistents, que són els que tenen unes capçades més elevades respecte la superfície i una escorça més gruixuda.

Els tractaments de combustible més utilitzats per tal de reduir el risc de propagació d'incendis són les cremes prescrites, les aclarides de combustible o una combinació d'ambdues, tot i que sovint també s'usen herbicides per eliminar específicament un determinat tipus de combustible o bé es fan tallafocs, és a dir, franges de diferent amplada en les quals s'ha eliminat totalment el combustible. Les cremes prescrites utilitzen el foc de baixa intensitat i sota condicions controlades per a reduir la quantitat de combustible forestal. Els tractaments d'aclarida poden efectuar-se manualment o mecànicament i consisteixen en la reducció de combustible de capçada, l'eliminació de combustible intermedi situat entre el combustible de superfície i el de capçada, responsable de la continuïtat vertical de les masses forestals, o bé la disminució de la densitat d'arbres. Les restes originades amb les aclarides poden dipositar-se en el mateix lloc del tractament de diferent forma: tal com s'han originat, repartides de manera uniforme o agrupades formant piles, i a més, en els tres casos, poden ser trossejades. Altres opcions són retirar totes les restes o bé eliminar-les in situ mitjançant cremes prescrites. Conèixer l'efectivitat d'aquests tractaments és fonamental per tal d'escollir les millors alternatives i alhora establir prioritats per a la gestió de les masses forestals. Tanmateix, la seva avaluació presenta certes dificultats a causa de la varietat de factors que hi intervenen.

L'efectivitat dels tractaments de combustible en la reducció del risc de propagació d'incendi es va començar a estudiar sistemàticament a finals dels anys noranta als EUA amb diferents enfocaments. Aquests estudis avaluen l'efectivitat dels tractaments atenent al comportament del foc, la seva severitat o els efectes ecològics que provoquen, i es poden classificar en tres categories: experimentals, observacionals i de modelització (Roccaforte *et al.*, 2008).

Els estudis experimentals avaluen el comportament del foc efectuant incendis a propòsit i analitzant els efectes durant i després del foc. Aquest tipus d'estudis són força anecdòtics i la majoria avaluen incendis d'in-

tensitats relativament baixes (Covington *et al.*, 1997). No obstant això, els enfocaments més utilitzats han estat els observacionals, basats en l'anàlisi dels efectes d'incendis forestals esdevinguts en el passat (Cram *et al.*, 2006; Martinson i Omi, 2008), i els de modelització, que utilitzen eines de simulació per predir el comportament del foc (Van Wagendonk, 1996; Stephens *et al.*, 2009). Cal esmentar que existeixen també treballs experimentals de camp sense foc que utilitzen variables referides a l'estructura de la vegetació (com per exemple la càrrega de combustible, l'alçada o el diàmetre dels arbres) per avaluar l'efectivitat dels tractaments, però que en cap cas determinen el comportament del foc (Reiner *et al.*, 2009).

A continuació es detallen els principals treballs observacionals i de simulació realitzats en aquest camp en els darrers anys, fent especial esment als diferents tipus de tractaments de combustible utilitzats i als resultats obtinguts sobre la seva efectivitat, així com als mètodes i eines emprades per avaluar els tractaments i els avantatges i inconvenients que presenten. Existeixen també diversos treballs que valoren els efectes ecològics dels tractaments de combustible (Scherl, 2005; Oliveras i Bell, 2008) però aquesta anàlisi queda fora dels objectius del nostre treball.

## Treballs observacionals

Els treballs observacionals permeten una avaluació directa de l'efectivitat dels tractaments; no obstant això, són costosos i difícils de dur a terme en zones extenses i per períodes de temps llargs. Aquest tipus de treballs es caracteritzen per l'estudi de zones afectades per incendis forestals a les quals prèviament s'havia aplicat algun tipus de tractament al combustible. La dificultat a l'hora d'abordar aquests estudis rau en què el disseny experimental s'ha de realitzar a partir d'observacions posteriors a l'incendi i, per tant, a partir de la situació actual cal cercar informació prèvia al foc. En els treballs observacionals es comparen zones tractades amb les no tractades avaluant diferents variables que permeten inferir la severitat de l'incendi, com ara la fracció de capçada socarrimada o la mortalitat d'arbres.

Com a compendi dels treballs observacionals recopilats (taula 1) cal assenyalar que els tractaments més efectius han resultat ser aquells que eliminen el combustible de superfície, tals com les cremes prescrites i les aclarides seguides de cremes (Skinner *et al.*, 2004, Raymond i Peterson 2005; Cram *et al.*, 2006; Safford *et al.*, 2009). En els treballs on s'han avaluat els tractaments d'aclarida, amb o sense eliminació de les restes, s'han obtingut diferents resultats. Així, Skinner *et al.* (2004) observaren que la severitat dels incendis en les zones tractades fou semblant a les zones no tractades, mentre que a Cram *et al.* (2006) fou inferior i a Raymond i Peterson (2005) superior.

**Taula 1.** Principals treballs observacionals realitzats per avaluar l'efectivitat de tractaments silvícoles en la reducció del risc de propagació d'incendi

Treball	Actuació forestal (tractament de les restes)	Any del tractament	Incendi (any)	Combustible (lloc)	Variables descriptores de la severitat de l'incendi
Pollet i Omi (2002)	Crema prescrita	1989	Webb fire (1994)	Bosc de coníferes (Montana, EUA)	<i>CSP, CDR</i>
	Aclarida (Cr)	1970 i 1983	Tyee fire (1994)	Bosc de coníferes (Washington, EUA)	
	Aclarida (Re)	1989 i 1990	Cottonwood fire (1994)	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	
	Aclarida (Cr)	1970 i 1995	Hochderffer fire (1996)	Bosc de coníferes (Arizona, EUA)	
Skinner <i>et al.</i> (2004)	Aclarida (Es, Cr)	1996-2002	Cone fire (2002)	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	<i>M, CSH, BSH</i>
Raymond i Peterson (2005)	Aclarida (Nt, Cr)	1996 2001	Biscuit fire (2002)	Bosc de coníferes (Oregon, EUA)	<i>CSV, CSH, M</i>
Cram <i>et al.</i> (2006)	Aclarida (Es, Ap-Cr)	1999	Rodeo-Chediski fire (2002)	Bosc de coníferes (Arizona, EUA)	<i>BSH, CSH, CSP, CDR, SDR</i>
	Aclarida (Cr)	1998	Borrego fire (2002)	Bosc de coníferes (Nou Mèxic, EUA)	
	Aclarida (Cr)	1994	Oso fire (1998)		
Strom i Fulé (2007)	Aclarida	1990-1999	Rodeo-Chediski fire (2002)	Bosc de coníferes (Arizona, EUA)	<i>BSH, M</i>
Martinson i Omi (2008)	Crema prescrita	1988, 1998 i 1992	Fontainebleau fire (1999)	Bosc de coníferes (Mississipi, EUA)	<i>CSH, CSP, CDR, SDR</i>
Safford <i>et al.</i> (2009)	Aclarida (Nt, Cr)	1996-2006	Angora fire (2007)	Bosc de coníferes (Califòrnia i Nevada, EUA)	<i>BSH, CSH, CCH CSP, CCP</i>

\*En aclarides: restes dipositades en el mateix lloc que s'han generat (Nt), repartides uniformement pel terreny (Es), apilades (Ap), triturades (Tr), retirades (Re), cremades (Cr). Ap-Cr: restes apilades i a continuació cremades. Variables descriptores de la severitat de l'incendi: *CSP*, fracció de capçada socarrimada; *CCP*, fracció de capçada consumida; *CSH*, altura de capçada socarrimada; *CCH*, altura de capçada consumida; *CSV*, fracció de volum de capçada socarrimada; *BSH*, altura de socarrimat dels troncs; *M*, mortalitat d'arbres; *CDR*, índex de dany a la capçades; *SDR*, índex de dany a la superfície.

Els treballs que han avaluat un únic tractament, ja sigui aclarida (Strom i Fulé 2007) o crema prescrita (Martinson i Omi, 2008), mostren l'efectivitat d'aquests mètodes en la reducció de la severitat de l'incendi. A l'únic treball on s'ha comparat l'efectivitat de les cremes prescrites i de les aclarides amb gestió de les restes (Pollet i Omi, 2002), els resultats apunten que les aclarides són més efectives en la reducció de la severitat de l'incendi, tot i que cal destacar que en aquest treball es comparen zones tractades afectades per diferents incendis i amb distintes característiques topogràfiques i que, per tant, els resultats no poden ser concloents.

En la majoria dels treballs observacionals recopilats el tractament de combustible s'aplicà entre 0 i 5 anys abans de l'incendi; tanmateix, en algun cas el temps transcorregut fou superior a 10 anys. Malgrat la importància de conèixer els anys transcorreguts des de l'aplicació del tractament per avaluar la seva efectivitat al llarg del temps, en cap dels treballs observacionals recopilats s'ha realitzat aquesta tasca, segurament a causa de la dificultat per abordar experimentalment aquests estudis, ja que el mètode observacional és un mètode amb un grau elevat d'incertesa i està subjecte a l'ocurrència del foc en zones que prèviament hagin estat tractades.

## Treballs de simulació

En la gran majoria de treballs publicats sobre l'efectivitat dels tractaments de combustible en la reducció del risc de propagació d'incendi, s'han fet servir simulacions per predir el comportament del foc. A diferència de l'enfocament observacional, aquestes són eines més ràpides i barates que permeten avaluar els tractaments de combustible en l'espai i el temps. Com a comparativa dels dos enfocaments, cal dir que l'observacional necessita òbviament que per ventura hi hagi un incendi; per tant és una anàlisi a posteriori i no a priori. Tanmateix, cal ressaltar que les eines de simulació estan sotmeses a la capacitat del model que incorporen per descriure de forma acurada el comportament de l'incendi.

Els programes de simulació es basen en models matemàtics que descriuen, en major o menor nivell de detall, certs aspectes relacionats amb el comportament del foc. Aquests models esdevenen útils per a les agències forestals quan es presenten en forma de sistema de suport a les decisions. Els models s'utilitzen per diverses raons, genèricament per predir el comportament d'un incendi i en particular per tasques més específiques, com per exemple fer inferències respecte a determinats paràmetres d'interès, per determinar els potencials efectes de les actuacions de gestió forestal o per analitzar teories i assumpcions que no es poden avaluar mitjançant treballs experimentals.

Els models matemàtics desenvolupats per a la simulació d'incendis forestals es classifiquen genèricament en models físics, quasifísics, empírics i quasiempírics (Sullivan, 2009).

Els models físics i quasifísics es basen en les lleis que governen la dinàmica de fluids, la combustió i la transferència de calor. Els models físics tenen en compte tant la física com la química de la propagació del foc. Estudien el comportament dels incendis en base a la resolució de les equacions de conservació de la massa, la quantitat de moviment i l'energia, i intenten explicar els fenòmens físics i químics involucrats en els incendis forestals (piròlisi, combustió, turbulència, radiació, etc.). Els models quasifísics representen només la física del fenomen i es basen genèricament en una única equació deduïda del balanç d'energia global.

Els models empírics, d'altra banda, s'obtenen a partir d'estudis experimentals o incendis històrics, i els mecanismes físics i químics no es tenen en compte. Els models quasiempírics contenen expressions teòriques generals i senzilles, i es completen a partir de l'experimentació. Tot i que, de la mateixa manera que els models quasifísics, es basen en el principi de la conservació de l'energia, aquests no distingeixen els mecanismes de transferència de calor implicats en la propagació del foc.

Els models físics i quasifísics són els més complexos pel que fa a la seva formulació, disseny, utilització pràctica i capacitat de còmput necessària, però tenen l'avantatge que es poden extrapolar a un rang molt ampli d'escenaris, és a dir, es poden aplicar per a simular múltiples situacions meteorològiques, topogràfiques i de combustible. A dia d'avui no existeix encara cap eina disponible a nivell operacional (utilitzable per agències públiques forestals) que hagi estat implementada amb models teòrics, ja que aquesta tecnologia està encara en fase experimental i de desenvolupament. No obstant això, la seva aplicació a nivell de recerca és força estesa arreu de la comunitat científica, sobretot als EUA i al sud d'Europa, i està donant resultats molt positius i ingressadors pel que fa a la seva fiabilitat i precisió (Morvan *et al.*, 2006).

Els models quasiempírics no són tan versàtils com els físics i quasifísics, ja que tot i que han estat desenvolupats partint de principis físics teòrics, moltes de les expressions matemàtiques que contenen han estat extretes a partir del treball experimental, bé al laboratori o al camp. Per tant, la validesa d'aquesta tipologia de models queda restringida a situacions idèntiques o molt similars a les experimentals. Això òbviament també és aplicable als models totalment empírics. Tanmateix, les eines informàtiques que deriven de la implementació de models empírics o quasiempírics inclouen una matemàtica més senzilla, amb la qual cosa la capacitat de càlcul requerida és molt menor. Aquestes eines acostumen a ser molt més fàcils d'utilitzar i han estat dissenyades amb interfícies més intuïtives i amigables, per això moltes d'elles estan essent emprades habitualment en agències de planificació forestal i prevenció i extinció d'incendis d'arreu del món. Per a poder ser utilitzats a nivell operacional, però, aquests models requereixen estudis previs de validació per als diferents ecosistemes on s'han d'aplicar. Aquest és especialment el cas de les eines de simulació basades en el model quasiempíric de Rothermel (1972), que han estat desenvolupades als EUA a partir de dades experimentals de laboratori o de camp en forests típicament nord-americanes.

Els models físics, quasifísics, empírics i quasiempírics són, doncs, la base de diferents programes de simulació que descriuen el comportament d'un incendi, amb més o menys detall, a través de representacions gràfiques o bé, en els cas dels més desenvolupats, a partir de la visualització de les variables descriptores dels incendis sobre bases cartogràfiques. Entre totes les eines que ha desenvolupat la comunitat científica, ja des dels anys 70, destaquem alguns dels models més emprats per a l'estudi del comportament d'incendis i que poden ser d'interès per l'estudi de l'efectivitat dels tractaments de combustible per reduir el risc de propagació d'incendi (taula 2).

**Taula 2.** Simuladors d'incendis forestals

<b>Simulador</b>	<b>Origen</b>	<b>Referència</b>	<b>Tipus de model</b>
BEHAVEPLUS	USDA, FireLab (EUA)	Andrews (1986), Rothermel (1972)	Quasiempíric
NEXUS	USDA, FireLab (EUA)	Andrews (1986), Rothermel (1972)	Quasiempíric
FARSITE	USDA, FireLab (EUA)	Finney (1998), Rothermel (1972)	Quasiempíric
FLAMMAP	USDA, FireLab (EUA)	Finney (1998), Rothermel (1972)	Quasiempíric
FMAPLUS	Fire Program Solutions (EUA)	Carlton (2004)	Quasiempíric
FVS-FFE	USDA, FireLab (EUA)	Stage (1973), Wykoff <i>et al.</i> (1982)	Quasiempíric
CFIS	ADAI i FERIC (Portugal i Canadà)	Alexander <i>et al.</i> (2006)	Quasiempíric
FIRESTAR	U. Méditerranée (França)	Morvan i Dupuy (2004)	Físic
WFDS	National Institute of Standards and Technology (EUA)	McGrattan (2004), Mell <i>et al.</i> (2007)	Físic
FIRETEC	Los Alamos National Laboratory (EUA)	Linn (1997)	Físic
MK5	CSIRO (Austràlia)	McArthur (1967)	Empíric
CFBP system	Forestry Canada Fire Danger Group (Canadà)	Taylor <i>et al.</i> (1997)	Empíric

En les simulacions, a partir de la caracterització del combustible i del coneixement de determinats factors ambientals i topogràfics, s'obté informació sobre diverses variables descriptores del comportament d'un eventual incendi. Aquestes variables es poden agrupar en variables descriptores de l'incendi de superfície o de l'incendi de capçades (taula 3). A la taula 4 es recopilen els treballs de simulació que amb més detall han avaluat l'efectivitat dels tractaments de combustible.



**Taula 3.** Principals variables descriptores del comportament dels incendis forestals utilitzades en els estudis d'efectivitat dels tractaments de combustible

	<b>Variable</b>	<b>Descripció</b>	<b>Símbol</b>	<b>Unitats</b>	<b>Simuladors</b>
	Velocitat de propagació del front ( <i>Rate of spread</i> )	Espai recorregut pel front per unitat de temps	ROS	m/min	BEHAVE, NEXUS, FARSITE, FMAPLUS, CFIS
	Intensitat lineal del front ( <i>Fireline intensity</i> )	Potència calorífica que s'allibera en l'incendi per longitud del front	I	kW/m	BEHAVE, FARSITE, FLAMMAP, FMAPLUS
	Flux de calor de l'incendi ( <i>Heat per unit area</i> )	Calor emès per àrea cremada	Q	kJ/m <sup>2</sup>	BEHAVE, NEXUS, FARSITE
<b>Incendi de superfície</b>	Longitud de la flama ( <i>Flame length</i> )	Distància existent entre l'extrem de la flama i el punt mitjà de la seva amplada	L	m	BEHAVE, NEXUS, FARSITE, FLAMMAP, FMAPLUS
	Àrea cremada ( <i>Burned area</i> )	Superfície cremada per l'incendi	A	ha	BEHAVE, FARSITE, FLAMMAP
	Perímetre de l'incendi ( <i>Fire perimeter</i> )	Contorn de l'incendi	P	m	BEHAVE
	Índex de vulnerabilitat ( <i>Fire susceptibility index</i> )	Indicador de la probabilitat que una zona es cremi a partir de 5 categories (molt baixa, baixa, moderada, alta o molt alta). Es calcula a partir de variables descriptores del comportament del foc i variables meteorològiques	FSI	–	PROMETHEUS
<b>Incendi de capçades</b>	Índex de torxa ( <i>Torching index</i> )	Velocitat del vent a partir de la qual es pot iniciar un incendi de capçades	TI	km/h	FMAPLUS, FMAPLUS, FVS-FFE
	Índex de capçades actiu ( <i>Crowning index</i> )	Velocitat del vent a partir de la qual es pot donar un incendi de capçades actiu	CI	km/h	NEXUS, FMAPLUS, FVS-FFE
	Aparició de focus secundaris ( <i>Spotting</i> )	Indicador de l'aparició d'un focus secundari	AFS	–	FARSITE, FLAMMAP
	Ocurrència d'incendis de capçades ( <i>Crowning occurrence</i> )	Indicador de l'ocurrència d'un incendi de capçades	OIC	–	NEXUS, FARSITE, FLAMMAP, CFIS

**Taula 4.** Principals treballs realitzats amb simuladors quasi empírics per avaluar l'efectivitat de tractaments silvícoles en la reducció del risc de propagació d'incendi

Treball	Paràmetres de simulació			Variables descriptores del comportament de l'incendi		
	Actuació forestal (tractament de les restes)	Combustible (lloc)	Simulador		Caracterització del combustible	Condicions ambientals (percentils)
Van Wagtendonk (1996)	Crema prescrita, aclarida (Re, Es, Ap i Cr, Cr)	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	FARSITE	Models de combustible propis	Escenaris moderat i extrem (P75, P95)	ROS, I, Q, L, A, AFS, OIC
Kalabokidis i Omi (1998)	Aclarida (Nt, Re, Es, Ap-Cr)	Bosc de coníferes (Colorado, EUA)	Behave	Models de combustible propis	n. e.	ROS, I, Q, L, A, P
Scott (1998a)	Crema prescrita, Aclarida (Nt, Re Ap i Cr)	n. e.	FFE-FVS	Models de combustible estàndards	n. e.	TI, CI
Scott (1998b)	Crema prescrita, Aclarida (Nt, Ap i Cr)	Bosc de coníferes (Montana, EUA)	FFE-FVS	n. e.	n. e.	TI, CI
Stephens (1998)	Crema prescrita, Aclarida (Es, Ap i Cr, Cr)	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	FARSITE	Models de combustible estàndards i propis	Escenaris moderat i extrem (P75, P95)	ROS, I, Q, A, AFS, OIC
Fulé <i>et al.</i> (2001a)	Aclarida (Cr)	Bosc de coníferes (Arizona, EUA)	NEXUS	Models de combustible propis	Escenaris alt i extrem (P90, P97)	ROS, Q, L, TI, CI,
Fulé <i>et al.</i> (2001b)	Aclarida (Es-Cr)	Bosc de coníferes (Arizona, EUA)	NEXUS	n. e.	Escenaris alt i extrem (P90, P97)	ROS, Q, L, TI, CI
Brose i Wade (2002)	Crema prescrita, aclarida, herbicides	Sotabosc d'un bosc de coníferes (Florida, EUA)	Behave	Models de combustible propis	n. e.	ROS, L
Fulé <i>et al.</i> (2002)	Crema prescrita, aclarida (Cr)	Bosc de coníferes (Arizona, EUA)	NEXUS	Models de combustible propis	Escenaris alt i extrem (P90, P97)	ROS, Q, L, TI, CI
Fiedler i Keegan (2003)	Aclarida (Es-Cr, Ap-Cr)	Bosc de coníferes (Nou Mèxic, EUA)	FFE-FVS	n. e.	Condicions extremes	CI
Fiedler <i>et al.</i> (2004)	Aclarida	Bosc de coníferes (Montana, EUA)	FFE-FVS	n. e.	n. e.	CI

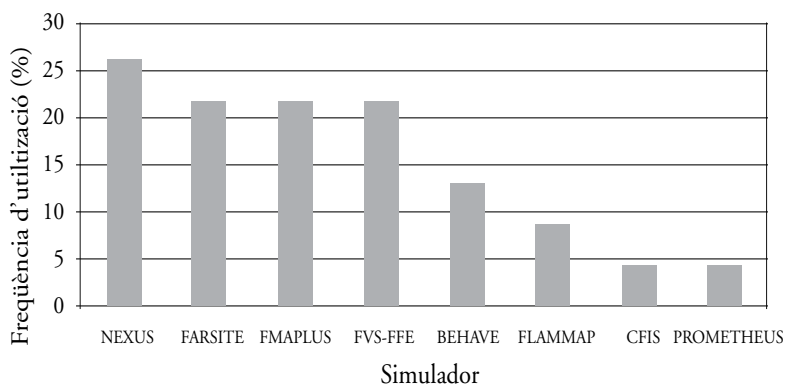
Stratton (2004)	Aclarida (Ap-Cr)	Bosc de coníferes (Utah, EUA)	FARSITE i FlamMap	Models de combustible estàndards i propis	Escenaris moderat, alt i extrem (P75, P85, P95)	I, L, A AFS, OIC
Stephens i Moghaddas (2005a)	Crema prescrita, aclarida (Tr-Es, Cr)	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	FMAPlus	n. e.	Escenaris moderat, alt i extrem (P80, P90, P97,5)	ROS, I, L, TI, CI
Stephens i Moghaddas (2005b)	Aclarida (Es, Tr-Es)	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	FMAPlus	n. e.	Escenaris moderat, alt i extrem (P80, P90, P97,5)	ROS, I, TI, CI
Scott (2006)	Aclarida (Nt)	Bosc de coníferes (Montana, EUA)	CFIS, NEXUS i FLAMMAP	Models de combustible estàndards	n. e.	ROS, OIC
Vaillant <i>et al.</i> (2006)	Crema prescrita	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	FMAPlus	Models de combustible estàndards	Escenaris moderat, alt i extrem (P80, P90, P97,5)	ROS, I, L, TI, CI
Ager <i>et al.</i> (2007)	Aclarida (Re, Cr)	Bosc de coníferes (Oregon, EUA)	FVS-FFE	n. e.	Escenari extrem (P97)	CI
Duguy <i>et al.</i> (2007)	Aclarida, tallafoc	Bosc mediterrani de pi blanc (València)	FARSITE	Models de combustible estàndards	n. e.	ROS, I, A
Manson <i>et al.</i> (2007)	Aclarida (Ap-Es)	Bosc de coníferes (Nou Mèxic, EUA)	Nexus	Models de combustible propis	n. e.	TI, CI
Schmidt <i>et al.</i> (2008)	Crema prescrita, aclarida (Nt, Cr)	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	Nexus, BEHAVEPLUS, FARSITE	Models de combustible estàndards	Escenaris moderat, alt i extrem (P80, P90, P97,5)	ROS, L, Q, A, TI, CI
Beverly <i>et al.</i> (2009)	Crema prescrita	Bosc de coníferes (Alberta, Canadà)	PROMETHEUS	Models de combustible estàndards	n. e.	FSI
Kobziar <i>et al.</i> (2009)	Crema prescrita, aclarida (Nt, Cr)	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	FMAPlus	n. e.	Escenaris alt i extrem (P90, P97,5)	ROS, L,
Stephens <i>et al.</i> (2009)	Crema prescrita, aclarida (Nt, Cr)	Bosc de coníferes (costa oest dels EUA)	FMAPlus	Models de combustible estàndards	Escenaris moderat, alt i extrem (P80, P90, P97,5)	TI, CI
Vaillant <i>et al.</i> (2009)	Crema prescrita	Bosc de coníferes (Califòrnia, EUA)	FMAPlus	Models de combustible estàndards	Escenaris alt i extrem (P90, P97,5)	I, TI, CI

En aclarides: restes dipositades en el mateix lloc que s'han generat (Nt), repartides uniformement pel terreny (Es), apladades (Ap), triturades (Tr), retirades (Re), cremades (Cr); n. e.: no especificat.

## Incidència en l'ús dels simuladors

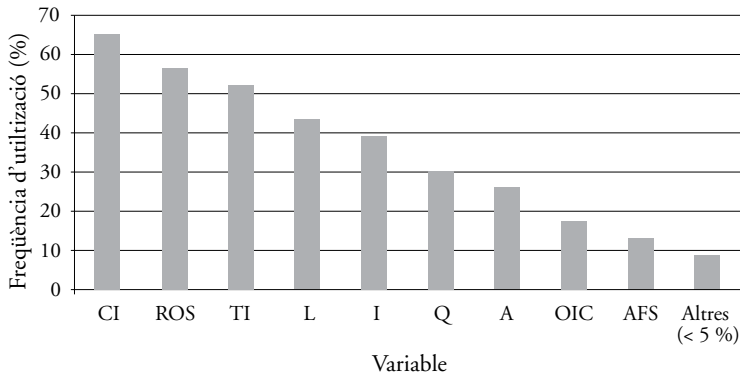
D'entre el conjunt de simuladors, NEXUS ha estat el simulador que més s'ha fet servir (figura 1) ja que del conjunt de la família "Behave" és el que permet fer una anàlisi més detallada dels incendis de capçades. Altres eines força utilitzades són FARSITE, FVS-FFE i FLAMPLUS que incorporen altres sistemes addicionals que permeten complementar i millorar la informació obtinguda, com per exemple visualitzar els efectes sobre una base cartogràfica (FARSITE), avaluar la variabilitat del combustible al llarg del temps (FVS-FFE) o millorar la caracterització del combustible generat en els tractaments com són les restes (FLAMPLUS). Alguns dels estudis recopilats utilitzen diversos simuladors, per aquesta raó la suma de la freqüència d'utilització mostrada a la figura 1 és superior a 100.

**Figura 1.** Utilització dels simuladors en els diferents treballs de simulació recollits que avaluen l'efectivitat dels tractaments de combustible



D'altra banda, les variables més extensament utilitzades han estat aquelles que avaluen la propagació dels incendis de capçada (CI) i de superfície (ROS) (figura 2). Aquestes són, en general, les variables més utilitzades en els estudis de simulació per avaluar el comportament del foc. L'àmplia utilització del CI s'explica perquè aquesta variable s'obté a partir d'un dels simuladors més utilitzats, NEXUS. Per la seva banda, la ROS és una variable utilitzada per tots els simuladors.

**Figura 2.** Utilització de les variables descriptores del comportament dels incendis forestals en els diferents treballs de simulació recollits que avaluen l'efectivitat dels tractaments de combustible



Índex de torxa (CI), velocitat de propagació del front (ROS), índex de capades actiu (TI), longitud de la flama (L), intensitat lineal del front (I), flux de calor de l'incendi (Q), àrea cremada (A), ocurrència d'incendis de capades (OIC), aparició de focus secundaris (AFS).

## Parametrització del combustible

En els simuladors esmentats, els principals paràmetres d'entrada que cal conèixer adequadament i que condicionen en bona part els resultats obtinguts, fan referència a la caracterització del combustible i a les condicions ambientals. Ambdós grups de paràmetres poden presentar valors molt diversos i poden canviar significativament tant al llarg del temps com en el mateix territori.

La caracterització del combustible és un factor determinant per realitzar prediccions acurades sobre el comportament d'un incendi forestal i la seva evolució en el territori. En les eines de simulació quasiempíriques, per representar el combustible s'acostuma a utilitzar models de combustible forestal. Un model de combustible és una descripció estructurada i simplificada del combustible que s'utilitza com a estructura de paràmetres d'entrada en els models matemàtics que descriuen el comportament del foc. Per a cada model de combustible es defineixen determinats paràmetres extrínsecs i intrínsecs del combustible de superfície necessaris per resoldre el model matemàtic de propagació de l'incendi, tals com la càrrega de combustible, la relació àrea-volum, l'altura del llit de combustible, la humitat d'extinció del combustible mort i la calor de combustió.

Els models de combustible utilitzats pels simuladors de la família "Behave" poden ser els models estàndards del NFDRS (National Fire Danger Rating

System) implementats per defecte (Anderson, 1982; Scott i Burgan, 2005) i definits a partir de claus fotogràfiques, o bé es poden construir nous models de combustible per caracteritzar un determinat tipus de vegetació no inclòs en els models estàndards. Aquests són els anomenats models de combustible propis i es construeixen introduint nous valors a les diferents categories de paràmetres, tot obtenint les dades mitjançant estimacions o tècniques de mostreig experimental. Els models de combustible propis permeten caracteritzar més detalladament el combustible; tot i amb això, s'utilitzen menys freqüentment perquè cal determinar les propietats del combustible a camp. En canvi, els models estàndards permeten caracteritzar el combustible sense necessitat de realitzar treball de camp, són més directes i senzills d'utilitzar.

El nivell de detall de la informació del combustible en els models quasi-empírics que inclouen cartografia digitalitzada, com FARSITE i FLAMMAP, depèn de la resolució cartogràfica sobre la qual es treballa (normalment de 30 x 30 m), essent en moltes ocasions poc detallada per poder realitzar una caracterització del combustible suficientment acurada. En el cas concret de la conca Mediterrània s'utilitzen els mateixos models de combustible esmentats, els quals han estat desenvolupats a partir de la caracterització del combustible dels EUA; per aquesta raó la utilització d'aquests models sovint no s'adapta prou acuradament a les condicions reals del territori i requereix prèviament parametritzar al camp el model per al combustible típic de la zona, tal i com realitzaren Duguay *et al.* (2007).

D'altra banda, el simulador PROMETHEUS, basat en el model empíric CFBP system, utilitza 16 models de combustible per descriure els diferents tipus de vegetació canadencs (De Groot, 1993). A diferència del models de combustible utilitzats pels simuladors de la família "Behave", aquests es descriuen de forma qualitativa mitjançant paràmetres com el tipus de sòl, la capa d'humus, la continuïtat dels diferents tipus de combustibles de superfície (herbaci i matollar, sotabosc de coníferes i combustible mort) o el tipus de combustible de capçades.

L'eina CFIS, pensada bàsicament per a avaluar l'activitat de les capçades, no utilitza pròpiament models de combustible. Per caracteritzar el combustible utilitza variables com la càrrega de combustible de capçades, la humitat del combustible o la distància entre la superfície i les capçades. CFIS, per determinar la probabilitat d'iniciació d'un incendi de capçades, defineix quatre models diferents que tenen en compte paràmetres com la humitat del combustible o la velocitat del vent, entre d'altres.

En les eines físiques com WFDS no s'utilitzen models de combustible per caracteritzar els combustibles, sinó que els paràmetres que el defineixen s'introdueixen directament com a variables d'entrada. Els paràmetres d'entrada fan referència a característiques com la temperatura inicial de la vegetació, la relació àrea-volum, la humitat del combustible, la densitat aparent de la vegetació o la geometria del combustible.

## Parametrització de les condicions ambientals

Les condicions ambientals són un factor clau a l'hora d'avaluar un determinat tractament. Els principals paràmetres ambientals requerits pels simuladors són la temperatura, la humitat relativa i la direcció i velocitat del vent. Així mateix, també cal determinar la humitat del combustible, un paràmetre molt lligat a les condicions ambientals existents i que es calcula a partir del coneixement d'aquestes. Les dades meteorològiques introduïdes en els cas dels simuladors quasiempírics que inclouen cartografia digitalitzada (FARSITE i FLAMMAP) poden variar en el temps i en l'espai. Tanmateix, les condicions ambientals emprades en aquests simuladors no tenen en compte comportaments locals com ara remolins de vent, la interacció local de la meteorologia i la topografia o aquells efectes causats pel mateix incendi. Tampoc consideren fenòmens provocats per vents forts, com són la caiguda d'arbres o la disminució de l'altura de la flama, els quals modifiquen el comportament de l'incendi (Cruz i Alexander, 2010).

A la bibliografia específica és freqüent la utilització d'escenaris ambientals teòrics per a realitzar les simulacions. Aquests escenaris s'elaboren mitjançant el càlcul de percentils, és a dir, de la distribució de freqüència acumulada de les dades meteorològiques històriques d'una determinada variable. D'aquesta manera es tenen en compte per separat els valors més freqüents per a cadascuna de les variables considerades. Els valors obtinguts per a cada variable en cada percentil s'agrupen en els diferents escenaris teòrics: els escenaris moderats (percentils 75 o 80), escenaris alts (percentils 85 o 90) i els escenaris extrems (percentils 95, 97 o 97,5). A tall d'exemple, un escenari meteorològic extrem de temperatura amb percentil 97 implica la utilització d'aquell valor de temperatura per sota del qual hi ha el 97% de les dades observades. Cal, però, anar amb cautela a l'hora d'utilitzar aquesta pràctica, ja que de vegades els escenaris construïts no reflecteixen situacions reals perquè consideren situacions extremes simultàniament per a totes les variables. Els percentils es calculen per a cada variable separatament, és a dir, es cerquen els valors extrems de temperatura, humitat i velocitat del vent, essent poc realista la probabilitat de què es donin simultàniament totes aquestes condicions ambientals extremes en determinades regions. Una alternativa que caldria considerar per realitzar els escenaris mitjançant aquestes simulacions seria determinar la variable que té un efecte més destacat sobre el comportament del foc i utilitzar els valors de la resta de variables associats a aquesta variable de referència.

S'observa també en alguns dels treballs de simulació recopilats que se subestima la potencialitat dels incendis de capçades per a determinades condicions ambientals extremes (Fulé *et al.*, 2002; Raymond i Peterson, 2005). Caldria esperar que amb humitats de combustible baixes la velocitat de vent requerida per iniciar i propagar un incendi de capçades fos també baixa; tanmateix, en els casos esmentats els resultats mostren velocitats de vent excessi-

vament elevades per a iniciar i propagar un incendi de capçades, si és té en consideració que aquestes simulacions es basen en humitats del combustible extremadament seques (Cruz i Alexander, 2010).

Cruz i Alexander (2010) van comparar els valors obtinguts en diferents treballs de simulacions amb els d'incendis forestals històrics dels EUA, i van observar que les condicions utilitzades en les simulacions eren extremadament severes i no representatives de les condicions típiques registrades en incendis forestals reals d'alta intensitat que inclouen activitat de capçades. Per exemple, mentre que en els treballs de simulació els valors de la humitats del combustible varien entre 1 i 4%, els registrats en incendis reals es situen entre 6 i 10%. Així mateix, com a tendència general, tot i que els estudis de simulació es basen en condicions extremes d'humitat del combustible, requereixen velocitats del vent superiors per arribar a les mateixes velocitats de propagació del foc registrades en incendis forestals històrics. Segons aquests autors, els errors són deguts tant a la utilització de paràmetres d'entrada imprecisos com al funcionament dels mateixos simuladors i a la pròpia matemàtica utilitzada pel simulador.

### **Resultats comparatius d'eficàcia de tractaments obtinguts amb simulacions**

Els resultats obtinguts amb els descriptors del comportament dels incendis són molt variables en els diferents treballs recopilats, ja sigui perquè les variables d'entrada són molt diferents, pel tipus de tractament aplicat o per la utilització de diferents simuladors.

En els treballs que se centren en l'avaluació de l'efectivitat dels tractaments d'aclarida, s'ha utilitzat aquesta tècnica silvícola per realitzar reduccions de combustible amb diferents intensitats o bé per reduir un determinat tipus de combustible (de capçada, intermedi o de superfície, arbres joves, arbres superiors o inferiors a un determinat diàmetre, etc.) (Fulé *et al.*, 2001a; Fielder i Keegan, 2003; Fiedler *et al.*, 2004; Stratton, 2004; Stephens i Moghaddas, 2005b). En aquests treballs les variables descriptors dels incendis de superfície mostren reduccions importants en els tractaments d'aclarida que afecten l'estrat arbori jove o intermedi, mentre que per a les variables descriptors dels incendis de capçades els tractaments que redueixen la càrrega de combustible de capçada, com per exemple l'eliminació d'arbres madurs, són els més efectius. Tots els treballs de simulació que avaluen l'efectivitat dels tractaments d'aclarida evidencien que els tractaments que tenen per objectiu assolir una estructura vegetal madura són els més efectius. Així, els tractaments que únicament eliminen el combustible de superfície són efectius a l'hora d'augmentar l'índex de torxa, però si els mateixos tractaments no inclouen l'aclarida de les capçades, el foc es pot propagar per aquestes fàcilment i l'índex de capçades actiu assoleix valors baixos.



En molts dels treballs recollits es comparen els tractaments d'aclarida i les cremes prescrites (Van Wagtendonk, 1996; Fulé *et al.*, 2002; Stephens i Moghaddas, 2005a; Schmidt *et al.*, 2008). En aquests treballs no hi ha un consens general sobre quin és el tipus de tractament més efectiu: tot i que en molts treballs les cremes prescrites són les més efectives, les aclarides també tenen una efectivitat elevada, sempre i quan se'n gestionin les restes.

La majoria de treballs que han avaluat l'efectivitat dels tractaments d'aclarida coincideixen en què aquests poden augmentar efectivament la resiliència dels boscos front als incendis. En aquests treballs s'apunta que els tractaments d'aclarida són eines més selectives i precises que les cremes prescrites i que provoquen menys danys sobre les poblacions forestals afectades (Schmidt *et al.*, 2008). Una de les conseqüències negatives que pot tenir lloc posteriorment a les cremes és la mort i caiguda d'arbres que s'acumulen a la superfície, provocant un increment del combustible de superfície (Stephens i Moghaddas 2005a).

Un fet clau a l'hora d'avaluar l'efectivitat d'aquestes actuacions té a veure amb el tractament de les restes obtingudes en l'aclarida. En aquest cas, tal i com s'ha esmentat anteriorment, existeixen múltiples opcions i combinacions pel tractament de les restes. Van Wagtendonk (1996) i Stephens (1998) aplicaren diferents tractaments a les restes: les dipositaren en el mateix terreny on es realitzà l'aclarida escampant-les uniformement, les apilaren i després les cremaren o bé realitzaren cremes per tota la superfície indistintament. Van observar que quan es realitzaven cremes posteriorment a l'aclarida, el risc de propagació d'incendi era inferior que quan les restes s'apilaven primer i després es cremaven, ja que en el primer cas s'eliminaven les restes originades en l'aclarida i també tot el combustible de superfície, mentre que en el segon s'eliminava exclusivament el combustible originat en l'aclarida. Els mateixos autors també van observar que la disposició del material de l'aclarida uniformement en el mateix lloc suposava un augment del risc de propagació d'incendi, fins i tot superior al de les zones no tractades, amb increments de la velocitat de propagació propers al 70%. D'altra banda, Manson *et al.* (2007) van observar que l'índex de capçada actiu era superior en zones on les restes s'apilaven que quan les restes s'escampaven uniformement per la zona tractada.

Alguns dels treballs recopilats avaluen i comparen l'efectivitat en la reducció del risc de propagació d'incendi de diferents tipus de tractaments de combustible, principalment les cremes prescrites, les aclarides, l'ús d'herbicides o els tallafocs. Així, Brose i Wade (2002) van comparar l'efectivitat de les cremes prescrites, dels tractaments d'aclarida i de l'aplicació d'herbicides durant els 5 anys posteriors a l'aplicació del tractament. Com a resultat van trobar valors inferiors de velocitat de propagació i longitud de la flama en el cas de les cremes prescrites. No obstant això, al llarg del temps el tractament amb herbicides fou el que mantingué uns valors inferiors d'aquestes variables. Els autors van concloure que les cremes prescrites són el tractament que permet millorar més ràpidament l'estructura forestal per evitar un incendi. Això no obstant, la millor alternativa és l'aplicació de tractaments conjunts. En el cas de Duguy *et al.* (2007) s'estudià el compor-

tament d'un incendi en zones que es caracteritzaven per tenir diferent quantitat de combustible i zones on s'havien realitzat tallafocs. Els tallafocs aplicats sense realitzar cap altre tractament de combustible no resultaven efectius per si sols en la reducció del risc de propagació d'incendi.

En els pocs treballs recopilats on es va tenir en compte l'evolució temporal d'aquests tractaments s'assenyala que les zones aclarides on es dipositaren les restes al mateix lloc del tractament, en comparació amb les zones no tractades (Manson *et al.*, 2007; Fiedler i Keegan, 2003) i les tractades amb cremes prescrites (Schmidt *et al.*, 2008), presentaven al llarg del temps una major efectivitat en la disminució del risc de propagació d'incendi i eren capaces de formar estructures forestals més resistents.

Malgrat que els simuladors de la família "Behave" han estat àmpliament utilitzats per avaluar l'efectivitat de tractaments de combustible, algunes de les seves prediccions presenten certes divergències amb les realitzades per altres simuladors o les obtingudes en escenaris reals. Per exemple, Scott (2006) avalua l'efectivitat de diversos tractaments d'aclarida mitjançant la selecció d'arbres i trobà diferències significatives en el comportament del foc de capçada predit per les eines FLAMMAP, NEXUS i CFIS, mostrant aquesta darrera uns valors de velocitat de propagació dels incendis de capçada i d'inici de foc de capçada més elevats. Cruz i Alexander (2010) realitzaren una exhaustiva revisió crítica sobre les prediccions realitzades per simuladors quasiempírics en l'avaluació de l'efectivitat de tractaments de combustible específicament per incendis de capçada. Els autors apunten diverses evidències que reflecteixen la subestimació dels incendis de capçada, com són la utilització de condicions ambientals extremes i força improbables i l'obtenció de resultats de vegades poc realistes. Els autors donen diverses raons per explicar aquests errors, alguns inherents als mateixos programes de simulació semiempírics, obtinguts a partir d'unes condicions determinades i que deixen de ser vàlids quan les condicions de simulació són diferents.

El desenvolupament de simuladors que porten implementats models físics obre un nou camp per a l'avaluació de l'efectivitat dels tractaments de combustible. Tot i que requereixen d'una capacitat computacional molt elevada poden ser de gran utilitat per complementar els estudis d'efectivitat dels tractaments realitzats amb els models quasiempírics. Recentment, s'han realitzat treballs de simulació d'incendis forestals basats en models físics amb l'objectiu d'entendre les relacions entre els fenòmens físics que es donen en els incendis i els canvis en les característiques topogràfiques, les condicions ambientals i les característiques del combustible. Per exemple, Porterie *et al.* (2000) avaluaren l'efecte del vent en el comportament del foc mitjançant l'eina FIRESTAR; Morvan i Dupuy (2001) utilitzaren la mateixa eina per avaluar l'efecte de diferents càrregues de combustible. Morvan *et al.* (2009) modelitzaren la propagació d'un incendi en prats d'herbassars utilitzant FIRESTAR, l'eina empírica MK5 i la quasiempírica BEHAVE, i ho compararen amb les dades reals de l'incendi. Amb la mateixa eina, Dupuy i Morvan (2005) ava-

luaren l'efectivitat de tallafocs situats en zones tractades. Mell *et al.* (2007) simulà incendis en prats d'herbassars amb WFDS i comparà els resultats amb els obtinguts amb dades experimentals reals. Mell *et al.* (2009) desenvoluparen el mateix plantejament en boscos de coníferes.

## Conclusions

Amb aquest treball es fa palès que l'avaluació de l'efectivitat dels tractaments de combustible en la reducció del risc de propagació d'incendi és una tasca de certa complexitat. En els estudis recopilats s'avaluen tractaments de combustible en condicions ambientals molt variades, es comparen diversos tractaments que a la vegada s'apliquen de diferent forma i s'avaluen tractaments que tenen dimensions desiguals i es distribueixen heterogèniament en el territori. Per tant, els valors obtinguts en els simuladors són valors relatius útils únicament per fer comparacions entre tractaments avaluats sota les mateixes condicions ambientals. En alguns treballs es dona el cas que les variables descriptors dels incendis obtingudes a partir de diferents escenaris prenen valors molt elevats que en la realitat no es poden donar. Tot això fa que sigui difícil comparar diferents tractaments entre si i avaluar-ne el grau d'efectivitat. A més, existeixen moltes i variades eines per avaluar aquests tractaments que presenten diferents avantatges i inconvenients. Tot i això, es poden observar certes tendències, que a tall de conclusions es resumeixen a continuació.

La modelització i simulació d'incendis forestals ha estat la metodologia més extensament utilitzada per avaluar l'efectivitat dels tractaments de combustible donat el seu caràcter 'no destructiu' enfront dels observacionals de camp i, per descomptat, dels experimentals. La simulació de tractaments implica, en tot cas, una bona caracterització del combustible. D'entre les diverses opcions disponibles, la caracterització pròpia és la més indicada per obtenir bones dades sobre el combustible particular de la zona d'estudi, ja que permet tipificar-lo més acuradament, tot i que també és més costosa a nivell econòmic i de temps. A més, també és molt important la caracterització de les condicions ambientals típiques de la zona estudiada, ja que provoquen considerables variacions en els resultats obtinguts amb les simulacions. Amb tot, les simulacions no estan exemptes d'errors. Les principals fonts d'aquests poden venir donades per les assumpcions i limitacions dels propis models que porten implementats els simuladors, pel desconeixement de les condicions que envolten el foc i per la dificultat de descriure amb aquests simuladors l'heterogeneïtat del combustible i les condicions ambientals locals. No obstant això, el desenvolupament dels models físics per a la predicció d'incendis forestals obre noves perspectives en l'avaluació de l'efectivitat dels diferents tractaments.

Pel que fa als resultats d'eficàcia dels tractaments, les variables descriptors del comportament d'un potencial incendi posen en evidència l'efectivitat dels tractaments de combustible en la reducció del risc de propagació d'incendi,

excepte en els casos en què el tractament d'aclarida no va seguit d'una gestió de les restes. Tanmateix, els diferents treballs no estan d'acord sobre quin tipus de tractament és el més efectiu, ja que els contextos en els quals s'han desenvolupat els treballs són molt diferents, i això repercuteix fortament i directa a l'efectivitat dels tractaments estudiats. A més, les múltiples opcions disponibles pel que fa al tractament de les restes originades amb les aclarides, així com la seva diferent evolució en el temps, fan difícil avaluar aquesta tècnica i comparar-la amb l'efectivitat de les cremes prescrites. El que sí queda palès és que els tractaments que utilitzen el foc, ja sigui com a tractament principal o bé posteriorment a l'aclarida per eliminar les restes, han estat els més efectius en la reducció del risc de propagació d'incendi. Tanmateix, tot i que en molts dels estudis s'observa un elevat risc de propagació d'incendi en els tractaments d'aclarida, quan aquests s'avaluen al llarg del temps semblen ser els més efectius i els que presenten un menor impacte ecològic sobre les poblacions afectades.

## Bibliografia

- AGEE, J.; SKINNER, C. (2005). "Basic principles of forest fuel reduction treatments". *Forest Ecology and Management*, núm. 211, p. 83-96.
- AGER, A.; MCMAHAN, J.; BARRETT, J.; MCHUGH, C. (2007). "A simulation study of thinning and fuel treatments in a wildland-urban interface in eastern Oregon, USA". *Landscape and Urban Planning*, núm. 80, p. 292-300.
- ALEXANDER, M.; CRUZ, M.; LOPES, A. (2006). "CFIS: A software tool for simulating crown fire initiation and spread". A: *Proceedings of the V International Conference of Forest Fire Research, 27-30 november*, Coimbra, p. 13.
- ANDERSON, H. (1982). "Aids to determining fuel models for estimating fire behavior". *Intermountain Forest and Range Experimental Station, Ogden, Utah: USDA Forest Service*. General Technical Report INT-122.
- ANDREWS, P. (1986). "Behave: Fire behavior prediction and fuel modeling system. Burn subsystem. Part1". *Intermountain Forest and Range Station, Ogden, Utah: USDA Forest Service*. General Technical Report INT-194.
- BEVERLY, J. L.; HERD, E. P. K.; CONNER J. C. R. (2009). "Modeling fire susceptibility in west central Alberta, Canada". *Forest Ecology and Management*, núm. 258 (7), p. 1465-1478.
- BROSE, P. H.; WADE, D. D. (2002). "Potential fire behavior in pine flatwood forests following three different fuel reduction techniques". *Forest Ecology and Management*, núm. 163 (1-3), p. 71-84.
- CARLTON, D. (2004). "*Fuels Management Analyst Plus Software, Version 3.8.19*". LLC, Estacada, Oregon: Fire Program Solutions.
- CRAM, D.; BAKER, T.; BOREN, J. (2006). "Wildland fire effects in silviculturally treated vs. untreated stands of New Mexico and Arizona". *Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado: USDA Forest Service*. Research Paper RMRS-RP-55.
- CRUZ, M.; ALEXANDER, M. (2010) "Assessing crown fire behaviour potential in conifer forests of western North America: a critical review of modelling approaches used in recent simulation studies". *International Journal of Wildland Fire*, en premsa.

- COVINGTON, W. W.; FULÉ, P. Z.; MOORE, M. M.; HART, S. C.; KOLB, T. E.; Mast, J. N.; Sackett, S. S.; Wagner, M. R. (1997). "Restoration of ecosystem health in southwestern ponderosa pine forests". *Journal of Forestry*, núm. 95 (4), p. 23-29.
- DE GROOT, W. J. (1993). "Exemples of fuel types in the Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System". *Forestry Canada, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta*, pòster.
- DUGUY, B.; ALLOZ, J.; RÖDER, A.; VALLEJO, R. (2007). "Modelling the effects of landscape fuel treatments on fire growth and behaviour in Mediterranean landscape (eastern Spain)". *International Journal of Wildland Fire*, núm. 16, p. 619-632.
- DUPUY, J. L.; MORVAN, D. (2005). "Numerical study of a crown fire spreading toward a fuel break using a multiphase physical model". *International Journal of Wildland Fire*, núm. 14, p. 141-151.
- FIEDLER, C.; KEEGAN, C. (2003). "Reducing crown fire hazard in fire-adapted forests of New Mexico". A: OMI, P.N.; JOYCE, L. A. [eds.]. *Fire, Fuel Treatments, and Ecological Restoration: Conference Proceedings*. 16-18 Abril 2002; Fort Collins, CO. Proceedings, RMRS-P-29. Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO: USDA Forest Service, p. 39-48
- FIEDLER, C.; KEEGAN, C.; WOODALL, C.; MORGAN, T. (2004). "A strategic assessment of crown fire hazard in Montana; Potential effectiveness and costs of hazard reduction treatments". *Pacific Northwest Research Station, Portland, OR: USDA Forest Service*. General Technical Report PNW-GRT-622.
- FINNEY, M. (1998). "Farsite: Fire area simulator-Model development and evaluation". *Intermountain Forest and Range Experimental Station, Ogden, Utah: USDA Forest Service*. Research Paper RMRS-RP-4.
- FULÉ, P. Z.; MCHUGH, C.; HEINLEIN, T. A.; COVINGTON, W. W. (2001a). "Potential fire behavior is reduced following forest restoration treatments". A: VANCE, R. K.; EDMINSTER, C. B.; COVINGTON, W. W.; BLAKE, J. A. [eds.]. *Ponderosa pine ecosystems restoration and conservation: steps towards stewardship*. 25-27 Abril 2000; Flagstaff, AZ. Proceedings, RMRS-P-22. Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT: USDA Forest Service, p. 28-35.
- FULÉ, P. Z.; WALTZ, A. E. M.; COVINGTON, W. W.; HEINLEIN, T. A. (2001b). "Measuring forest restoration effectiveness in reducing hazardous fuels". *Journal of Forestry*, núm. 99 (11), p. 24-29.
- FULÉ, P. Z.; COVINGTON, W. W.; SMITH, H. B.; SPRINGER, J. D.; HEINLEIN, T. A.; HUISINGA, K. D.; MOORE, M. M. (2002). "Comparing ecological restoration alternatives: Grand Canyon, Arizona". *Forest Ecology and Management*, núm. 170, p. 19-41.
- GRAHAM, R.; HARVEY, A.; JAIN, T.; TONN, J. (1999). "The effects of thinning and similar stand treatments on fire behavior in western forest". *Intermountain Forest and Range Experimental Station, Ogden, Utah: USDA Forest Service*. General Technical Report PNW-GRT-463.
- KALABOKIDIS, K. D.; OMI, P.N. (1998). "Reduction of fire hazard through thinning/residue disposal in the urban interface". *International Journal of Wildland Fire*, núm. 8, p. 29-35.
- KOBIAR, L. N.; MCBRIDE, J. R.; STEPHENS, S. L. (2009). "The efficacy of fire and fuels reduction treatments in a Sierra Nevada pine plantation". *International Journal of Wildland Fire*, núm. 18, p. 791-801.
- LINN, R. R. (1997). "A transport model for prediction of wildfire behaviour". *Los Alamos National laboratory*, Science Report LA-13334-T, Los Alamos, NM.

- MAIN, W. A.; PAANANEN, D. M.; BURGAN, R. E. (1990). "Fire Family Plus". *North Central Forest and Range Experiment Station, USDA Forest Service, St. Paul, MN*. General Technical Repprt. NCGTR-138.
- MANSON, G.; BAKER, T.; CRAM, D.; BOREN, J.; FERNALD, A.; VANLEEUEWEN, D. (2007). "Mechanical fuel treatment effects on fuel loads and indices of crown fire potential in a south central New Mexico dry mixed conifer forest". *Forest Ecology and Management*, núm. 251, p. 195-204.
- MARTINSON, E. J.; OMI, P. N. (2008). "Assessing mitigation of wildfire severity by fuel treatments; an example from the Coastal Plain of Mississippi". *International Journal of Wildland Fire*, núm. 17, p. 415-420.
- MCCARTHUR, A. (1967). "Fire behaviour in eucalyptus forests". *Commonw. Aust., Dep. Nat. Devel., Forest and Timber Bureau, Canberra, Leaflet 107, Canberra, Austràlia*.
- MCGRATTAN, K. (2004). "Fire Dynamics Simulator (Version 4), Technical Reference Guide". *NISTIR Special Publication 1018*.
- MELL, W.; JENKINS, M.; GOULD, J.; CHENEY, P. (2007). "A physics-based approach to modelling grassland fires". *International Journal of Wildland Fire*, núm. 16, p. 1-22.
- MELL, W.; MARANGHIDES, A.; MCDERMOTT, R.; MANZELLO, S. (2009). "Numerical simulation and experiments of burning Douglas Fir trees". *Combustion and Flame*, núm. 156, p. 2023-2041.
- MORVAN, D.; DUPUY, J. (2001). "Modeling fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation". *Combustion and Flame*, núm. 127, p. 1981-1984.
- (2004). "Modelling the propagation of a wildfire through a mediterranean shrub using a multi-phase formulation". *Combustion and Flame*, núm. 138, p. 199-210.
- MORVAN, D.; DUPUY, J.; RIGOLOU, E.; VALETTE, J. (2006). "FIRESTAR: a physically based model to study wildfire behaviour". *Proceedings of the V International Conference of Forest Fire Research, 27-30 november. Coimbra*.
- MORVAN, D.; MÉRADJI, S.; ACCARY, G. (2009). "Physical modelling of fire spread in grasslands". *Fire safety Journal*, núm. 44, p. 50-61.
- OLIVERAS, I.; BELL, T. (2008). "An Analysis of the Australian Literature on Prescribed Burning". *Journal of Forestry*, núm. 106 (1), p. 31-37.
- POLLET, J.; OMI, P. (2002). "Effect of thinning and prescribed burning on crown fire severity in ponderosa pine forests". *International Journal of Wildland Fire*, núm. 11, p. 1-10.
- PORTERIE, B.; MORVAN, D.; LORAUD, J.; LARINI, M. (2000). "Fire spread through fuel beds: modeling of wind-aided fires and induced hydrodynamics". *Physics of Fluids*, núm. 12 (7), p. 1762-1782.
- RAYMOND, C. L.; PETERSON, D. L. (2005). "Fuel treatments alter the effects of wildfire in a mixed-evergreen forest, Oregon, USA". *Canadian Journal of Forest Research*, núm. 35, p. 2981-2995.
- REINER, A. L.; VAILLANT, N. M.; FITES-KAUFMAN, J.; DAILEY, S. N. (2009). "Mastication and prescribed fire impacts on fuels in a 25-year old ponderosa pine plantation, southern Sierra Nevada". *Forest Ecology and Management*, núm. 258 (11) p. 2365-2372.
- ROCCAFORTE, J. P.; FULÉ, P. Z.; COVINGTON, W. W. (2008). "Landscape-scale changes in canopy fuels and potential fire behaviour following ponderosa pine restoration treatments". *International Journal of Wildland Fire*, núm. 17, p. 293-303.

- ROTHERMEL, R. (1972). "A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels". *Forest and Range Experimental Station, Ogden, Utah: USDA Forest Service*. Research Paper INT-115.
- SAFFORD, H. D.; SCHMIDT, D. A.; CARLSON, C. H. (2009). "Effects of fuel treatments on fire severity in an area of wildland-urban interface, Angora Fire, Lake Tahoe Basin, California". *Forest Ecology and Management*, núm. 258, p. 773-787.
- SANTONI, P. (1998). "Elaboration of an evolving calculation domain for the resolution of a fire spread model". *Numerical Heat transfer, Part A: Applications*, núm. 33 (3), p. 279-298.
- SCHMIDT, D.; TAYLOR, A.; SKINNER, C. (2008). "The influence of fuels treatment and landscape arrangement on simulated fire behavior, Southern Cascade range, California". *Forest Ecology and Management*, núm. 255, p. 3170-3184.
- SCOTT, J. H. (1998a). "Sensitivity analysis of a method for assessing crown fire hazard in the northern Rocky Mountains, USA". A: *Proceedings of the III International Conference on Forest Fire Research and 14th Conference on Fire and Forest Meteorology*, Luso, Portugal. 16-20 November 1998, vol II, p. 2517-2532.
- (1998b). "Using the Fire and Fuels Extension to the Forest Vegetation Simulator to assess long-term changes in crown fire hazard". A: *Proceedings of the III International Conference on Forest Fire Research and 14th Conference on Fire and Forest Meteorology*, Luso, Portugal. 16-20 November 1998, vol II, p. 2621-2629.
- (2006). "Comparison of crown fire systems used in three fire management applications". *Intermountain Forest and Range Experimental Station, Ogden, Utah: USDA Forest Service*. Research Paper RMRS-RP-58.
- SCOTT, J.; BURGAN, R. (2005). "Standard Fire Behaviour Fuel Model: A Comprehensive Set for use with Rothermel's Surface Fire Spread Model". *Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado: USDA Forest Service*. General Technical Report RMRS-GTR-153.
- SCHERL, T. (2005). "At the crossroads: A comparison of current social, scientific and political influences on fire management in Australia and the USA". *World Forest Institute*, Portland, Oregon.
- SKINNER, C. N.; RITCHIE, M.W.; HAMILTON, T.; SYMONS, J. (2004). "Effects of prescribed fire and thinning on wildfire severity". A: COOPER, S. [ed.]. *Proceedings 25th Annual Forest Vegetation Management Conference*, University of California Cooperative Extension, Redding, CA, January 20-22, 2004, p. 80-91.
- STAGE, A. (1973). "Prognosis Model for stand development". *Intermountain Forest and Range Experimental Station, Ogden, Utah: USDA Forest Service*. Research Paper INT-137.
- STEPHENS, S. (1998). "Evaluation of the effects of silvicultural and fuel treatments on potential fire behaviour in Sierra Nevada mixed-conifer forests". *Forest Ecology and Management*, núm. 105, p. 21-35.
- STEPHENS, S.; MOGHADDAS, J. (2005a). "Experimental fuel treatment impacts on forest structure, potential fire behavior, and predicted tree mortality in a California mixed conifer forest". *Forest Ecology and Management*, núm. 215, p. 21-36.
- (2005b). "Silvicultural and reserve impacts on potential fire behavior and forest conservation: 25 years of experience from Sierra Nevada mixed conifer forests". *Biological Conservation*, núm. 125, p. 369-379.

- STEPHENS, S.; MOGHADDAS, J.; EDMINSTER, C.; FIEDLER, C.; HAASE, S.; HARRINGTON, M. (2009). "Fire treatment effects on vegetation structure, fuels, and potential fire severity in western U.S. forests". *Ecological Applications*, núm. 19, p. 305-320.
- STRATTON, R. (2004). "Assessing the effectiveness of landscape fuel treatments on fire growth and behavior". *Journal of Forestry*, núm. 102, p. 32-40.
- STROM, B. A.; FULÉ, P. Z. (2007). "Pre-fire fuel treatments affect long-term ponderosa pine forest dynamics". *International Journal of Wildland Fire*, núm. 16, p. 128-138.
- SULLIVAN, A. (2009). "Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 1: Physical and quasi-physical models". *International Journal of Wildland Fire*, núm. 18, p. 349-368.
- TAYLOR, S. W.; PIKE, R. G.; ALEXANDER, M. E. (1997). "Field guide to the Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System". *Canadian Forest Service*, Northern Forestry Centre, Edmonton, AB. Special Report 11.
- VAILLANT, N. M.; FITES-KAUFMAN, J.; STEPHENS, S. L. (2006). "Effectiveness of Prescribed Fire as a Fuel Treatment in Californian Coniferous Forests". A: ANDREWS, P. L.; BUTLER, B.W. [eds.]. *Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings*. 28-30 Març 2006; Portland, OR. Proceedings RMRS-P-41. Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO: USDA Forest Service, p. 465-476.
- VAILLANT, N. M.; FITES-KAUFMAN, J.; REINER, A. L.; NOONAN-WRIGHT, E. K.; DAILEY, S. N. (2009). "Effect of fuel treatments on fuels and potential fire behavior in California National Forests". *Fire Ecology*, núm. 5 (2), p. 14-29.
- VAN WAGTENDONK, J. (1996). "Use of a deterministic fire growth model to test fuel treatments". *Sierra Nevada Ecosystem Project, Final Report to Congress, vol. II. Assessments and Scientific Basis for Management Options*. Centers for Water and Wildland Resources, University of California, Davis, CA.
- WYKOFF, W.; CROOKSTON, N.; STAGE, A. (1982). "User's guide to the stand Prognosis Model". *Intermountain Forest and Range Experimental Station, Ogden, Utah: USDA Forest Service*. Research Paper INT-133.