



9CFE-1990

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: 978-84-941695-7-1

Organiza





Estado del arte de la simulación operacional de incendios forestales

CARDIL, A. (1,2,3), RAMIREZ, J., (2)

(1) Technosylva Inc, La Jolla, CA, USA

(2) Department of Agricultural and Forest Sciences and Engineering, University of Lleida, Lleida, Spain

(3) Forest Science and Technology Centre of Catalonia (CTFC), Solsona, Spain

Resumen

La simulación operacional de incendios forestales ha avanzado significativamente en las últimas décadas, con el desarrollo de modelos que permiten predecir el comportamiento del fuego en diferentes condiciones. Entre los más utilizados están los modelos empíricos, como Wildfire Analyst de Technosylva, que se basan en datos históricos de incendios.

Wildfire Analyst ha sido implementado en agencias de incendios, empresas eléctricas y aseguradoras en todo el mundo (Canadá, EEUU, Chile, Europa, etc.), mejorando la modelización de incendios y la toma de decisiones en entornos operativos. Esta comunicación pretende realizar una síntesis de los diferentes hitos logrados en la modelización operacional de incendios, incluyendo su validación con propagaciones reales de fuegos, uso por parte de los usuarios (España y globalmente), escalado de la modelización mediante supercomputación, mejora espacial y temporal de los principales datos de entrada (combustibles, meteorología, etc.), así como su aplicación en las distintas fases operativas de la emergencia: 1) Preposicionamiento, niveles de despacho de medios y cálculo horario del riesgo; 2) evaluación del ataque inicial; 3) análisis del comportamiento del fuego en el ataque extendido. El desarrollo continuo de estos sistemas es clave para mejorar la gestión y mitigación de incendios en un contexto de creciente riesgo.

Palabras clave

Comportamiento del fuego, simulador de incendios, Technosylva, Wildfire Analyst

1. Enfoque de simulación en incendios forestales

El entendimiento de la situación y la toma de decisiones en incidentes se mejoran integrando datos en tiempo real, como cámaras de campo, puntos de acceso por satélite, productos de teledetección, estaciones meteorológicas, localización de recursos, información de plataformas de gestión de incidentes, etc.; pronóstico meteorológico, cartografía de alta resolución, capacidades mejoradas de modelización de incendios y visores adecuados para interpretar los resultados. Todos estos recursos combinados con la experiencia de analistas y los usuarios pueden mejorar el conocimiento del riesgo antes de cualquier incidente y reducir la incertidumbre en las decisiones ejecutivas durante la emergencia.

La simulación de incendios se está convirtiendo en una herramienta fundamental para apoyar el análisis estratégico en unidades operativas de agencias, centros de despacho, puestos de mando de incidentes y equipos de campo (MONEDERO et al., 2019; OLIVERIA et al., 2021; RAMÍREZ et al., 2011). Cada tipo de usuario tiene



diferentes necesidades durante y antes de cualquier emergencia. Aunque las unidades operativas necesitan predominantemente estimaciones del riesgo de incendio y los impactos potenciales a gran escala, las centrales de despacho necesitan índices de evaluación de ataque inicial basados en el comportamiento esperado del fuego y dificultad de extinción (RODRÍGUEZ Y SILVA et al., 2014) para asignar y despachar recursos a los incidentes; los puestos de comando de incidentes analizan la progresión potencial de cada incendio para progresivamente mejorar las estrategias y tácticas; y los equipos de campo estiman el comportamiento del fuego en un sector específico. Todos estos análisis utilizan diferentes tipos de hardware, desde ordenadores de alto rendimiento hasta dispositivos móviles adaptados a las operaciones en tiempo real. La computación de alto rendimiento nos permite estimar el comportamiento e índices de peligro asociado a cada incendio, el uso de enfoques estocásticos para analizar el riesgo y potenciales impactos a gran escala y abordar los flujos de trabajo necesarios para estas urgentes necesidades de cálculo (GIBB et al., 2020).

Los incendios que ocurren en entornos cada vez más complejos, junto con las limitaciones/supuestos de cada tipo de modelo, pueden generar incertidumbre y errores de pronóstico (BENALI et al., 2016; RAMIREZ et al., 2019). CRUZ & ALEXANDER (2013) analizaron el error de los modelos operativos de incendios y descubrieron un porcentaje medio de error en la estimación de ROS del incendio que oscilaba entre el 20% y el 310%. Los autores informaron que esta desviación se debe a factores como la calidad de los datos de entrada, la capacidad de los modelos para estimar con precisión información distribuida en grillas a partir de datos brutos (mapas de combustibles, humedad del combustible, etc.), la calibración de los modelos de propagación a la zona de estudio y la complejidad misma del incendio analizado. Recientes esfuerzos en el campo de la ciencia y la tecnología de las simulaciones se enfocan en mejorar la calidad de los datos de entrada y los modelos de propagación (BENALI et al., 2016; CARDIL et al., 2019; RAMIREZ et al., 2019) (Figura 1). En este sentido, monitorear la progresión de los incendios en el paisaje es clave para validar los resultados de los modelos de comportamiento (CARDIL et al., 2019) y seguir mejorando los marcos de simulación de incendios, como un proceso continuo e iterativo (KELSO et al., 2015). Aunque el comportamiento de los incendios es difícil de cuantificar cuando ocurren, las observaciones satelitales, aeronaves tripuladas y plataformas de vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés: Unmanned aerial vehicle) son fundamentales para la medición y el análisis sistemáticos del comportamiento (LENTILE et al., 2006; MAFFEI & MENENTI, 2019). La detección de incendios (puntos calientes o hotspots) y estimación de tasas de propagación se realiza principalmente mediante sensores satelitales de infrarrojos térmicos (SCHAG et al., 2021). Los más populares son el Visible Infrared Imaging Radiometer (VIIRS) y el Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) - productos de incendios activos y área quemada (HANTSON et al., 2013; SCHOROEDER et al., 2014). Otros satélites utilizados habitualmente son el Himawari-8 (LIU et al., 2018) y el Geostationary Operational Environmental (PRINS & MENZEL, 1992). Desde un punto de vista operativo, los productos desde satélites son los más oportunos y disponibles. Los datos de VIIRS y MODIS se han usado para generar mapas de propagación de incendios (PARKS, 2014), validar modelos de propagación de incendios (COEN & SCHROEDER, 2013) y ajustar simulaciones (CARDIL et al., 2019). Aunque los productos satelitales de incendios activos resultan útiles para la vigilancia operativa y la calibración/validación de simulaciones, están sujetos a

limitaciones como el tiempo de revisita, la resolución espacial y las obstrucciones atmosféricas (SCHROEDER et al., 2014). Sin embargo, esto podría cambiar con el lanzamiento del programa WildFireSat que vigilará los incendios forestales activos para captar características esenciales, como la tasa de propagación. Generalmente, las limitaciones inherentes a los análisis realizados mediante información satelital han sido abordadas mediante la utilización de información proveniente de sensores incorporados en aeronaves tripuladas, pero en el último tiempo se ha evidenciado la efectividad de UAV en entornos operativos (YUAN et al., 2015).



Figura 1. Enfoque de simulación de incendios, que incluyen capacidades mejoradas de modelización de incendios gracias a la gran calidad de los datos de entrada, la mejora de los modelos y algoritmos, y el seguimiento preciso de los incendios. Esto permite a los organismos tomar decisiones en entornos operativos basadas en análisis multirriesgo y objetivos específicos.

1.1. Información bruta y modelos para generar datos de entrada

Los errores en los datos de entrada pueden llevar a una cascada de errores mayores en la predicción del comportamiento del fuego (ALEXANDER & CRUZ, 2013; BENALI et al., 2016; RAMIREZ et al., 2019). Nuevas tecnologías, plataformas y sensores permiten generar mejor información de entrada para la modelización de incendios a escala espacial y temporal apropiadas (GARCÍA et al., 2020). Las variables que tienen mayor influencia en la predicción de ROS son la meteorología (principalmente la dirección y velocidad del viento), el tipo de combustible y el momento/localización de la ignición (BENALI et al., 2016).

Datos espaciales precisos y actualizados de los combustibles, características de las copas y su distribución son un prerequisite para los modelos de comportamiento del fuego (PARSONS et al., 2011). En este sentido, mejoras en los métodos de teledetección han proporcionado una alternativa asequible y rápida a los estudios de campo. Recientemente se han realizado estudios que combinan datos espectrales y lidar para cartografiar y cuantificar con mayor precisión los tipos de combustible no sólo en función de sus propiedades ópticas, sino también de su estructura vertical a múltiples escalas (DOMINGO et al., 2020; MARINO et al., 2016), como lo hizo el programa de la NASA Global Ecosystems Dynamics Investigation (DUBAYAH et al., 2020).



La aplicación de modelos de pronóstico meteorológico ha permitido una propagación del fuego más precisa y dinámica (PAPADOPOULOS & PAVLIDOU, 2011). Coen et al. (2013) desarrollaron un módulo acoplado al modelo numérico de predicción meteorológica del Weather Research and Forecasting que describe la dirección y velocidad de los vientos que dirigen la propagación del incendio en cada paso temporal. Los modelos meteorológicos de incendios acoplados tienen la capacidad de simular la interacción-retroalimentación entre el fuego y la atmósfera, lo que se conoce como "interacciones fuego-atmósfera", siendo útil para caracterizar un comportamiento del fuego más complejo y muy cambiante (COEN et al., 2018). Aunque estos modelos acoplados han avanzado mucho, aún no están listos para su uso operativo debido a su gran demanda computacional, mayor necesidad de formación a nivel usuario y también a los retos organizacionales asociados a la imbricación entre tiempo atmosférico y actividad de gestión del territorio (COEN & SCHROEDER, 2017).

1.2. Mejorando estimaciones del comportamiento y nuevas tendencias en simulación

La mejora de los modelos operativos, empíricos, y semiempíricos y acoplados de propagación de incendios podría permitir mejores estimaciones del comportamiento del fuego en los próximos años, considerando las limitaciones y suposiciones de los modelos actuales (CARDIL et al., 2019). En este sentido, la calibración de nuevos algoritmos para estimar el comportamiento de los incendios podría mejorarse aumentando la cantidad de observaciones provenientes de UAV, sensores de temperatura en tierra u observaciones satelitales de puntos calientes. Asimismo, las técnicas basadas en datos pretenden sortear la falta de precisión de las predicciones incorporando datos observados en un modelo para ajustar o calibrar la simulación de los patrones del incendio (ARTÈS et al., 2015; CARDIL et al., 2019). En el contexto de simulaciones operativas, se ha propuesto la asimilación de datos utilizando filtros Kalman para calibrar diferentes parámetros de la ecuación de la tasa de propagación (ROCHOUX et al., 2013), actualizando tanto el perímetro del incendio y los factores de ajuste del combustible mediante filtros ensamblados de Kalman (SRIVAS et al., 2017), filtros de partículas, también llamados análisis secuencial de Monte Carlo, algoritmos genéticos para ajustar las condiciones meteorológicas (DENHAM et al., 2012), o algoritmos genéticos con el objetivo de ajustar otras variables ambientales como la cobertura de copas o también factores de ajuste de la velocidad de propagación (LAUTENBERGER, 2013). Estos métodos de optimización, sin embargo, se basan en procesos recursivos muy costosos computacionalmente, lo que dificulta su uso en un contexto operativo. Para esto, se han propuesto algoritmos más rápidos basados en métodos de optimización sin derivadas (Carrasco et al., 2019), técnicas de optimización basadas en gradientes que utilizan diferenciación automática progresiva (RIOS et al., 2016), o mediante un rápido convergente de mínimos cuadrados para obtener factores de ajuste de la velocidad de propagación (CARDIL et al., 2019).

2. Nuevos desafíos para la modelación de incendios forestales

2.1. Comportamiento extremo

En los últimos años se han dado muchos casos de comportamiento extremo de los incendios, que van desde altas temperaturas intensas, propagación errática e impredecible y rápido crecimiento exponencial. Aunque existen muchas definiciones de comportamiento extremo del fuego entre la comunidad científica (TEDIM et al., 2018), la más ampliamente aceptada es que el comportamiento extremo del fuego consiste en "la propagación del fuego distinta a la propagación



superficial constante, especialmente cuando implica rápidos incrementos" (WERTH et al., 2016). La frecuencia de estos incendios extremos está aumentando (GOSS et al., 2020; WILLIAMS et al., 2019). Estos sucesos plantean nuevos retos de modelización debido a su naturaleza errática que implica su capacidad para influir en su propio entorno de fuego. La actividad de piro-convección dentro de los penachos de fuego puede inducir cambios fuertes y repentinos en la velocidad y dirección del viento e incluso puede encender nuevos incendios a partir de rayos pirogénicos (DOWDY & PEPLER, 2018). El término piro-cumulonimbo se refiere a estas tormentas inducidas o aumentadas por el fuego (FROMM et al., 2010). Estos fenómenos suponen un reto para la modelización debido a las cambiantes condiciones ambientales que funcionan como variables de entrada.

2.2. Incendios en nuevas regiones

Con el aumento del calentamiento del planeta, se prevé que las zonas climáticas se desplacen hacia los polos en latitudes medias y altas, lo que provocará que regiones templadas tradicionalmente no propensas a los incendios experimenten episodios de incendios. El aumento de la actividad incendiaria en estas regiones templadas plantea tres grandes retos para la modelización de incendios: la disponibilidad de modelos precisos de los combustibles en todo el paisaje, el conocimiento de las condiciones meteorológicas que permiten la propagación del fuego en estos combustibles, y el tamaño restringido de los incendios que impide su seguimiento por satélite. En cuanto a los combustibles, la modelización de incendios a escala de paisaje se ve dificultada por la falta de mapas precisos de combustibles; a diferencia de lo que ocurre en el Mediterráneo europeo, por ejemplo, los mapas de vegetación no se han traducido en mapas de combustibles. Este proceso supone un reto debido a la falta de semejanza 1:1 entre los tipos de vegetación templada comunes y los tipos de combustible estándar (STOOF et al., 2020). Se han realizado algunos trabajos valiosos sobre la caracterización de combustibles en zonas templadas, pero sin llegar a comprender la precisión de los modelos de comportamiento del fuego resultantes. Además, es necesario caracterizar y probar una gama más amplia de tipos de combustible para captar la gran variabilidad de los tipos de vegetación y permitir la modelización de incendios en todo el paisaje. La evaluación de la precisión de los modelos de propagación de incendios en combustibles templados es imperativa para garantizar una aplicación fiable de estos modelos en emergencias. Los brezales de *Calluna vulgaris* (L.), uno de los principales tipos de vegetación propensa a los incendios en esta región, pueden arder con contenidos de humedad del combustible superiores a los conocidos para los incendios mediterráneos, y también se ha descrito que muestran una capacidad de secado sorprendentemente rápida, e incluso arden a temperaturas bajo cero (DAVIES et al., 2019; LOG, 2020). Además, la forma en que arde *Calluna* se ve afectada significativamente por su desarrollo fisiológico (DAVIES et al., 2019). Una complejidad añadida en la adaptación de los modelos de incendios a los combustibles templados es la escasez de buena información sobre la propagación del fuego. Los incendios en estas regiones son a menudo tan pequeños y de tan corta duración que no pueden ser detectados por los satélites (por ejemplo, VIIRS o MODIS), lo que dificulta la verificación de las predicciones de modelos como los descritos en las secciones anteriores, ya que estos datos no suelen estar disponibles en otras fuentes.

Bibliografía

ALEXANDER, M.; CRUZ, M. (2013). LIMITATIONS ON THE ACCURACY OF MODEL PREDICTIONS OF WILDLAND FIRE BEHAVIOUR: A STATE-OF-THE-KNOWLEDGE OVERVIEW. *THE FORESTRY CHRONICLES*.

ARTÈS, T.; CARDIL, A.; CORTÉS, A.; MARGALEF, T.; MOLINA, D.; PELEGRÍN, L.; RAMÍREZ, J. (2015). FOREST FIRE PROPAGATION PREDICTION BASED ON OVERLAPPING DDDAS FORECASTS. *PROCEDIA COMPUTER SCIENCE* 51, 1623–1632. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.PROCS.2015.05.294](https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.294)

BENALI, A.; ERVILHA, A. R.; SÁ, A. C. L.; FERNANDES, P. M.; PINTO, R. M. S.; TRIGO, R. M.; PEREIRA, J. M. C. (2016A). DECIPHERING THE IMPACT OF UNCERTAINTY ON THE ACCURACY OF LARGE WILDFIRE SPREAD SIMULATIONS. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 569–570, 73–85. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.SCITOTENV.2016.06.112](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.112)

BENALI, A.; ERVILHA, A. R.; SÁ, A. C. L.; FERNANDES, P. M.; PINTO, R. M. S.; TRIGO, R. M.; PEREIRA, J. M. C. (2016B). DECIPHERING THE IMPACT OF UNCERTAINTY ON THE ACCURACY OF LARGE WILDFIRE SPREAD SIMULATIONS. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 569–570, 73–85. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.SCITOTENV.2016.06.112](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.112)

CARDIL, A.; MONEDERO, S.; RAMOS, J. M.; VEGA-GARCÍA, C. (2014). FIRE BEHAVIOR MODELING AND SIMULATION IN A WILDLAND-URBAN INTERFACE: THE FIRE OF PINAR DE LOS MANZANOS, SPAIN. *FOREST SYSTEMS* 23(3), 517–529. [HTTPS://DOI.ORG/10.5424/FS/2014233-06288](https://doi.org/10.5424/FS/2014233-06288)

CARTER, V. A.; MCCOY, M.; PARSONS, R.; FUENTES, J.; GASSAWAY, D.; OTTMAR, R. (2016). WILDLAND FIRE BEHAVIOR PREDICTION SYSTEMS: COMPARISON OF SIMULATION TO OBSERVED BEHAVIOR IN THE FIELD. *FIRE ECOLOGY* 12(3), 35–47. [HTTPS://DOI.ORG/10.4996/FIREECOLOGY](https://doi.org/10.4996/fireecology)

CUNNINGHAM, P.; ARCA, B.; DUCE, P.; TULIPANI, S.; PERES, C.; CARRÁ, L.; CASULA, F. (2005). ANALYSIS OF UNCERTAINTY IN FIRE PROPAGATION MODELS: IMPACTS OF DATA ACCURACY AND RESOLUTION. *INTERNATIONAL JOURNAL OF WILDLAND FIRE* 14(2), 213–226. [HTTPS://DOI.ORG/10.1071/WF03057](https://doi.org/10.1071/WF03057)

FINNEY, M. A.; MCALLISTER, S. S. (2011). A REVIEW OF FIRE SPREAD MODELING APPROACHES: FROM EMPIRICAL TO PHYSICS-BASED MODELS. *FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT* 261(11), 2030–2046. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.FORECO.2010.10.013](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.10.013)

JIMENEZ, D.; SALIS, M.; ALCAIDE, J. F.; CARDIL, A. (2020). SENSITIVITY ANALYSIS OF WILDFIRE SIMULATION MODELS TO WEATHER AND FUEL UNCERTAINTIES. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 724, 138217. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.SCITOTENV.2020.138217](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138217)

LIU, Y.; GOODRICK, S.; STOY, P. C. (2013). A PROPOSED FRAMEWORK FOR MODELING WILDLAND FIRE PROPAGATION AND EMISSIONS. *ENVIRONMENTAL MODELLING & SOFTWARE* 40, 237–244. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.ENVSOFT.2012.08.007](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.08.007)

RICHARDS, G. D. (1995). THE MATHEMATICAL MODELLING AND COMPUTER SIMULATION OF WILDLAND FIRE PERIMETERS. *INTERNATIONAL JOURNAL OF WILDLAND FIRE* 5(2), 67–78. [HTTPS://DOI.ORG/10.1071/WF9950067](https://doi.org/10.1071/WF9950067)

SILVA, C. A.; SILVEIRA, F. M.; DUBÉ, F.; DÍAZ-DELFINO, J. M.; MARTINS, F.



(2019). ASSESSING THE ACCURACY OF WILDFIRE PROPAGATION MODELS IN HIGHLY VARIABLE LANDSCAPES. *REMOTE SENSING* **11(9)**, 1092. [HTTPS://DOI.ORG/10.3390/RS11091092](https://doi.org/10.3390/rs11091092)

SULLIVAN, A. L. (2009A). WILDLAND SURFACE FIRE SPREAD MODELING, 1990–2007. 1: PHYSICAL AND QUASI-PHYSICAL MODELS. *INTERNATIONAL JOURNAL OF WILDLAND FIRE* **18(4)**, 349–368. [HTTPS://DOI.ORG/10.1071/WF06144](https://doi.org/10.1071/WF06144)

SULLIVAN, A. L. (2009B). WILDLAND SURFACE FIRE SPREAD MODELING, 1990–2007. 2: EMPIRICAL AND QUASI-EMPIRICAL MODELS. *INTERNATIONAL JOURNAL OF WILDLAND FIRE* **18(4)**, 369–386. [HTTPS://DOI.ORG/10.1071/WF06143](https://doi.org/10.1071/WF06143)

VAN WAGNER, C. E. (1987). DEVELOPMENT AND STRUCTURE OF THE CANADIAN FOREST FIRE WEATHER INDEX SYSTEM. *TECHNICAL REPORT 35*. CANADIAN FORESTRY SERVICE. [HTTPS://DOI.ORG/10.4095/123456](https://doi.org/10.4095/123456)