

Simó-Martí, M.; Torralba, J.; Crespo-Peremarch, P.; Ruiz, L. Simulación y análisis de la velocidad de propagación del fuego en entornos forestales a partir de nubes de puntos TLS

Simulación y análisis de la velocidad de propagación del fuego en entornos forestales a partir de nubes de puntos TLS

Simó-Martí, Marina ¹ Torralba, Jesús ¹ Crespo-Peremarch, Pablo ¹ Ruiz, Luis Ángel ¹

¹ Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n 46022

ORCID: Simó-Martí 0000-0001-9605-9645 Torralba 0000-0001-8644-8604 Crespo-Peremarch 0000-0003-2241-4493
Ruiz 0000-0003-0073-7259

Correspondencia: msimmar@upv.es jtorpe@upv.es pabcrepe@cgf.upv.es laruiz@upv.es

RESUMEN

La representación realista de la heterogeneidad estructural del combustible constituye uno de los principales retos en la modelización física del comportamiento del fuego. En este trabajo se desarrolla una metodología reproducible para integrar en Fire Dynamics Simulator (FDS) un escenario real de bosque mediterráneo escaneado mediante TLS. La aproximación propuesta permite incorporar explícitamente la heterogeneidad estructural del combustible en la simulación, estimando la densidad de combustible a escala de vóxel a partir de la estructura tridimensional derivada de la nube de puntos TLS. La biomasa se calculó mediante relaciones alométricas y se distribuyó espacialmente en función de la proporción de retornos dentro de cada vóxel, asumiendo una distribución heterogénea tanto a nivel de estrato como a nivel individual. El escenario voxelizado resultante se implementó en FDS y se simuló un incendio bajo condiciones ambientales constantes. Los resultados muestran que las variaciones en la continuidad horizontal, la carga y la densidad de combustible influyen directamente en la aceleración o desaceleración del frente. Asimismo, permiten analizar la dinámica del fuego y evaluar la relación entre la velocidad de propagación y la estructura espacial de la vegetación, mostrando el potencial de este enfoque para representar escenarios forestales con mayor realismo estructural.

Palabras clave: *densidad de combustible, RoS, Lidar, modelos CFD, incendios forestales*

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 marzo 2026

Simulación y análisis de la velocidad de propagación del fuego en entornos forestales a partir de nubes de puntos TLS

Simó-Martí, Marina ⁽¹⁾, Torralba, Jesús ⁽¹⁾, Crespo-Peremarch, Pablo ⁽¹⁾, Ruiz, Luis Ángel ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València.

 0000-0001-9605-9645, msimmar@upv.es ;  0000-0001-8644-8604, jetorpe@upv.es
 0000-0003-2241-4493, pabcrepe@cgf.upv.es ;  0000-0003-0073-7259, laruiz@upv.es

Resumen: La representación realista de la heterogeneidad estructural del combustible constituye uno de los principales retos en la modelización física del comportamiento del fuego. En este trabajo se desarrolla una metodología reproducible para integrar en Fire Dynamics Simulator (FDS) un escenario real de bosque mediterráneo escaneado mediante TLS. La aproximación propuesta permite incorporar explícitamente la heterogeneidad estructural del combustible en la simulación, estimando la densidad de combustible a escala de vóxel a partir de la estructura tridimensional derivada de la nube de puntos TLS. La biomasa se calculó mediante relaciones alométricas y se distribuyó espacialmente en función de la proporción de retornos dentro de cada vóxel, asumiendo una distribución heterogénea tanto a nivel de estrato como a nivel individual. El escenario voxelizado resultante se implementó en FDS y se simuló un incendio bajo condiciones ambientales constantes. Los resultados muestran que las variaciones en la continuidad horizontal, la carga y la densidad de combustible influyen directamente en la aceleración o desaceleración del frente. Asimismo, permiten analizar la dinámica del fuego y evaluar la relación entre la velocidad de propagación y la estructura espacial de la vegetación, mostrando el potencial de este enfoque para representar escenarios forestales con mayor realismo estructural.

Palabras clave: densidad de combustible, RoS, LiDAR, modelos CFD, incendios forestales

Simulation and analysis of fire rate of spread in forest environments using TLS point clouds.

Abstract: *Realistic representation of fuel structural heterogeneity constitutes one of the main challenges in physics-based fire behavior modelling. In the present work, we have developed a reproducible methodology to integrate a real Mediterranean forest scenario scanned by a terrestrial laser scanner into the Fire Dynamics Simulator (FDS). The proposed approach explicitly incorporates three-dimensional fuel structure into the simulation by estimating voxel-scale fuel density derived from the TLS point cloud. Biomass was quantified using allometric equations and was spatially allocated according to the proportion of returns within each voxel, assuming heterogeneous distribution at both stratum and individual levels. The resulting voxelized scenario was implemented in FDS, and fire was simulated under constant environmental conditions. Results indicate that variations in horizontal fuel continuity, fuel load, and bulk density directly affect fire front acceleration and deceleration. Furthermore, they enable the analysis of fire dynamics and the evaluation of the relationship between the rate of spread and the spatial structure of vegetation, highlighting the potential of this approach to represent forest scenarios with greater structural realism.*

Keywords: *bulk density, RoS, LiDAR, CFD models, wildfires*

1. INTRODUCCIÓN

La estructura tridimensional del bosque y la distribución de los combustibles forestales influyen de forma determinante en el comportamiento de los incendios forestales. La continuidad vertical entre estratos y la continuidad horizontal dentro de un mismo estrato, condicionadas por la proximidad y conectividad de los combustibles, regulan la propagación del fuego y

modulan su intensidad y velocidad. La configuración espacial y el grado de agrupación del combustible, en parte, determinan su disponibilidad energética y su susceptibilidad a la ignición, pues modifican los flujos aerodinámicos locales, alterando la velocidad y la turbulencia del viento en el interior de la masa vegetal. Al obstruir o canalizar el aire, la estructura condiciona los procesos de transferencia de calor (convección y radiación) y, en consecuencia, la dinámica de avance del

frente de llama, pudiendo dificultar su progresión o favorecer su intensificación (Atchley *et al.*, 2021).

Por ello, una caracterización del combustible que supere las descripciones promediadas e incorpore explícitamente su heterogeneidad espacial permite reducir la incertidumbre en la modelización del comportamiento del fuego, especialmente en lo relativo a la interacción entre el combustible y el viento. *Fire Dynamics Simulator* (FDS) es un modelo de dinámica de fluidos computacional que permite esta modelización en 3D con un elevado nivel de detalle. En FDS, las propiedades físicas del combustible están representadas principalmente a partir de su densidad, la relación superficie-volumen de las partículas (S:V) y la humedad del mismo. Hasta el momento, en las simulaciones con FDS se han definido escenarios homogéneos siguiendo los modelos de combustible o escenarios sintéticos simplificando la estructura de los componentes de la vegetación mediante cuerpos geométricos. Hasta donde alcanza nuestro conocimiento, únicamente dos trabajos han introducido datos TLS para describir con detalle la estructura de la vegetación y generar las celdas de combustible correspondientes (Marcozzi *et al.*, 2023), y solo Cooper (2022) lo aplica en un entorno forestal.

En este estudio se ha simulado la velocidad de propagación del fuego (*rate of spread*, RoS) en un escenario real de bosque mediterráneo a partir de la integración de datos TLS en el simulador de propagación del fuego FDS. Los objetivos son: i) describir una metodología reproducible que permita transferir la densidad de la vegetación en escenarios reales en el modelo FDS a partir de datos adquiridos con TLS; y ii) analizar la velocidad de propagación del fuego y su relación con la densidad y la carga de combustible, así como con su distribución espacial.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología se divide en las siguientes secciones: i) adquisición de datos de campo y TLS, ii) procesamiento de las nubes de puntos, iii) caracterización de la densidad de combustible y iv) simulación del comportamiento del fuego con FDS y estimación de la RoS.

2.1. Parcela forestal de estudio

La parcela de estudio se encuentra en el Parque Natural de *La Serra d'Espadà* (provincia de Castelló) aproximadamente en las coordenadas 39.96° N y 0.41° O. La vegetación de la zona es característica del bosque mediterráneo, presentando gran heterogeneidad estructural y un notable solapamiento entre estratos de vegetación. En concreto, nuestra parcela está compuesta por un estrato arbóreo monoespecífico e irregular de *Pinus halepensis* Mill y un denso estrato arbustivo con predominancia de *Quercus coccifera* L., *Salvia rosmarinus* Spenn. y *Erica multiflora* L. Se seleccionó una parcela rectangular de 20 × 40 m, con pendiente prácticamente nula, para facilitar la toma de datos de campo y la posterior simulación en FDS.

2.2. Adquisición de datos de campo y TLS

La campaña de campo tuvo lugar en febrero de 2025. Se realizaron mediciones típicas de inventario forestal para caracterizar el estrato arbóreo, incluyendo el diámetro a la altura del pecho así como el registro de la posición GPS de cada árbol mediante un receptor Emlid Reach RS3 multi-band RTK GNSS. Respecto al estrato arbustivo, dada la alta densidad de matorral y el solape entre las copas de los individuos, se optó por dividir el total del área en 24 microparcels de $\approx 33 \text{ m}^2$ y medir la altura media y el porcentaje de cobertura en cada una.

Por último, las nubes de puntos fueron registradas usando un láser escáner 3D Trimble TX6. Con el objetivo de minimizar al máximo las oclusiones, se realizaron 17 escaneos distribuidos de forma homogénea por toda la parcela. Se distribuyeron dianas esféricas por la parcela y se georreferenciaron mediante GPS. Posteriormente, se registraron y georreferenciaron las nubes de puntos TLS con Trimble RealWorks® v11.

2.3. Procesamiento de nubes de puntos

Tras el registro y la georreferenciación, se identificaron los puntos de control en el terreno y se generó un modelo digital del terreno para normalizar las alturas de la nube de puntos con LASTools v230212. A continuación, se segmentó la nube de puntos de manera semimanual usando 3DForest y CloudCompare v2.13.2, obteniendo una nube de puntos correspondiente a todo el estrato del matorral, y diversas nubes de puntos correspondientes a los árboles individualizados.

2.4. Voxelización y estimación de la densidad de combustible

El enfoque metodológico empleado para la integración de los datos supone una distribución espacialmente heterogénea de la biomasa tanto a nivel de estrato como de planta (p.ej., heterogeneidad a nivel de copa). En consecuencia, la densidad del combustible ($\text{Biomasa/Volumen}_{\text{aparente}}$) se estimó a escala de vóxel a partir de la estructura tridimensional proporcionada por la nube de puntos TLS. Para ello, en primer lugar, se calculó la biomasa a partir de relaciones alométricas aplicadas a nuestras mediciones de campo. En el caso de los árboles, se estimó la biomasa de la copa a nivel individual siguiendo las ecuaciones propuestas por Ruiz-Peinado *et al.*, (2011). En el caso del matorral se estimó un único valor de biomasa por cada microparcels aplicando las ecuaciones de Montero *et al.*, (2020) para agrupaciones de matorral (a partir de la altura media y el porcentaje de cobertura medidos en campo).

Las nubes de puntos segmentadas se voxelizaron a una resolución de 0,5 m. A cada vóxel se le asignó un valor a partir de la proporción entre el número de retornos del vóxel y el número total de retornos de la planta segmentada. Para estimar la biomasa a nivel de vóxel se multiplicó la biomasa a nivel de planta por el valor de cada vóxel correspondiente a la proporción de retornos a nivel de planta segmentada. Finalmente, la densidad de combustible a nivel de vóxel se calculó a partir de los valores de biomasa estimados y el volumen de cada vóxel. El resultado fueron dos ficheros voxelizados (uno por cada estrato).

2.5. Simulación del comportamiento del fuego con FDS y estimación de la RoS

El escenario voxelizado y transformado al formato de entrada requerido por FDS define la distribución espacial del combustible utilizada en la simulación. Además del escenario de vegetación, el modelo se completa con parámetros físicos y ambientales que influyen en la velocidad del fuego (Dimitrakopoulos & Panov, 2001) (Tabla 1). La RoS se calculó para 3 perfiles longitudinales de 43×3 m en X e Y considerando toda la dimensión vertical. La tasa de propagación se estimó a lo largo de cada perfil para evaluar la influencia de la distribución espacial del combustible sobre la dinámica del frente de fuego. Posteriormente, se compararon los resultados entre perfiles teniendo en cuenta la diferente disposición de los combustibles en cada uno de ellos.

Tabla 1. Parámetros principales de la simulación.

Parámetro	Valor
Tiempo de simulación	180 s
Viento constante	$5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Pendiente	0°
HCM _{arbolado}	25 %
HCM _{matorral}	21 %
S:V _{arbolado-hojas}	6249 m^{-1}
S:V _{matorral-hojas}	2755 m^{-1}
S:V _{ramillas}	888 m^{-1}

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los datos de salida proporcionados por FDS se analizó la evolución del avance del frente del fuego en función del tiempo (Fig. 1). Para los tres perfiles evaluados, la RoS efectiva (avance neto del frente) presentó valores similares (36.4 , 32.01 , $31.91 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$), lo que indica que el fuego alcanzó el final del dominio prácticamente de forma simultánea en las tres secciones, favorecido por la continuidad del estrato arbustivo. Sin embargo, el análisis detallado del perfil de evolución revela cambios bruscos en la velocidad de avance, cuya intensidad difiere entre perfiles. En este trabajo solo se muestra el perfil 1 por ser el más representativo del tipo de bosque en el área de estudio.

La Figura 2 permite realizar un análisis más exhaustivo del perfil 1, integrando la carga de combustible (2.a), la sección longitudinal XZ del escenario voxelizado con la densidad de combustible (2.b), y la sección XZ de la nube de puntos TLS (2.c), los cuales se han representado con los valores instantáneos de RoS calculados a lo largo del eje X. La comparación conjunta de estos gráficos permite relacionar los cambios de velocidad más bruscos observados en la Figura 1 con los cambios en la estructura y la densidad del combustible a lo largo del perfil de vegetación. En la Figura 2 se identifican tres zonas clave:

(i) Entre los 7 y 10 m se registran los valores máximos de RoS en colores rojos intensos (Fig. 2c). Esta zona coincide con una menor carga de combustible (Fig. 2a), baja densidad de combustible (Fig. 2b) y ausencia de continuación horizontal entre copas. En la evolución temporal (Fig. 1) este tramo se muestra con una pendiente pronunciada.

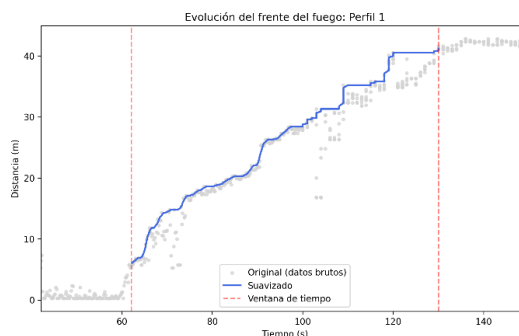


Figura 1. Evolución del frente del fuego en el perfil 1. En el eje X se muestra el tiempo de la simulación (en segundos), y en el Y la posición del frente a lo largo del perfil (en metros).

(ii) Entre los 15 y 25 m las velocidades de propagación son mínimas. Este tramo presenta una pendiente más moderada (Fig. 1) y coincide con la presencia de arbolado denso, con valores elevados de densidad y carga de combustible (Fig. 2).

(iii) El tramo entre los 22 y 26 m también muestra un cambio brusco de la RoS, asociado a una interrupción de la continuidad horizontal entre las copas. En esta zona el combustible está más aireado y hay una disminución progresiva de la densidad. A partir de los 30 m, el perfil muestra variaciones en la velocidad más suavizadas que en los tramos anteriores y coincide con una zona de apertura de copas y menor compactación estructural.

En conjunto, los resultados muestran que, aunque la RoS efectiva es similar entre perfiles a escala global, la dinámica local del frente de fuego está fuertemente condicionada por la heterogeneidad estructural del combustible. Las variaciones en la continuidad horizontal, la carga y la densidad influyen directamente en la aceleración o desaceleración del frente, probablemente no solo por la cantidad de biomasa disponible, sino también por su efecto sobre el flujo de aire. Las discontinuidades horizontales favorecen una mayor ventilación del frente de llama, incrementando el aporte de oxígeno y modificando los patrones locales de convección, lo que puede traducirse en aumentos puntuales de la RoS. Por el contrario, las zonas con elevada densidad y continuidad estructural tienden a amortiguar el flujo de aire, reduciendo la oxigenación y limitando la eficiencia de la combustión.

4. CONCLUSIÓN

Los resultados muestran una relación consistente entre las variaciones locales de la RoS y la heterogeneidad estructural del combustible, particularmente en términos de densidad y continuidad horizontal, evidenciando la relevancia de representar explícitamente la estructura tridimensional del combustible en la modelización del comportamiento del fuego. La integración de datos TLS en FDS ha permitido representar explícitamente la estructura tridimensional del combustible y analizar su influencia en la dinámica del frente de fuego en un escenario real de bosque mediterráneo. Aunque requiere un análisis más exhaustivo y la incorporación de métricas estructurales cuantitativas para consolidar

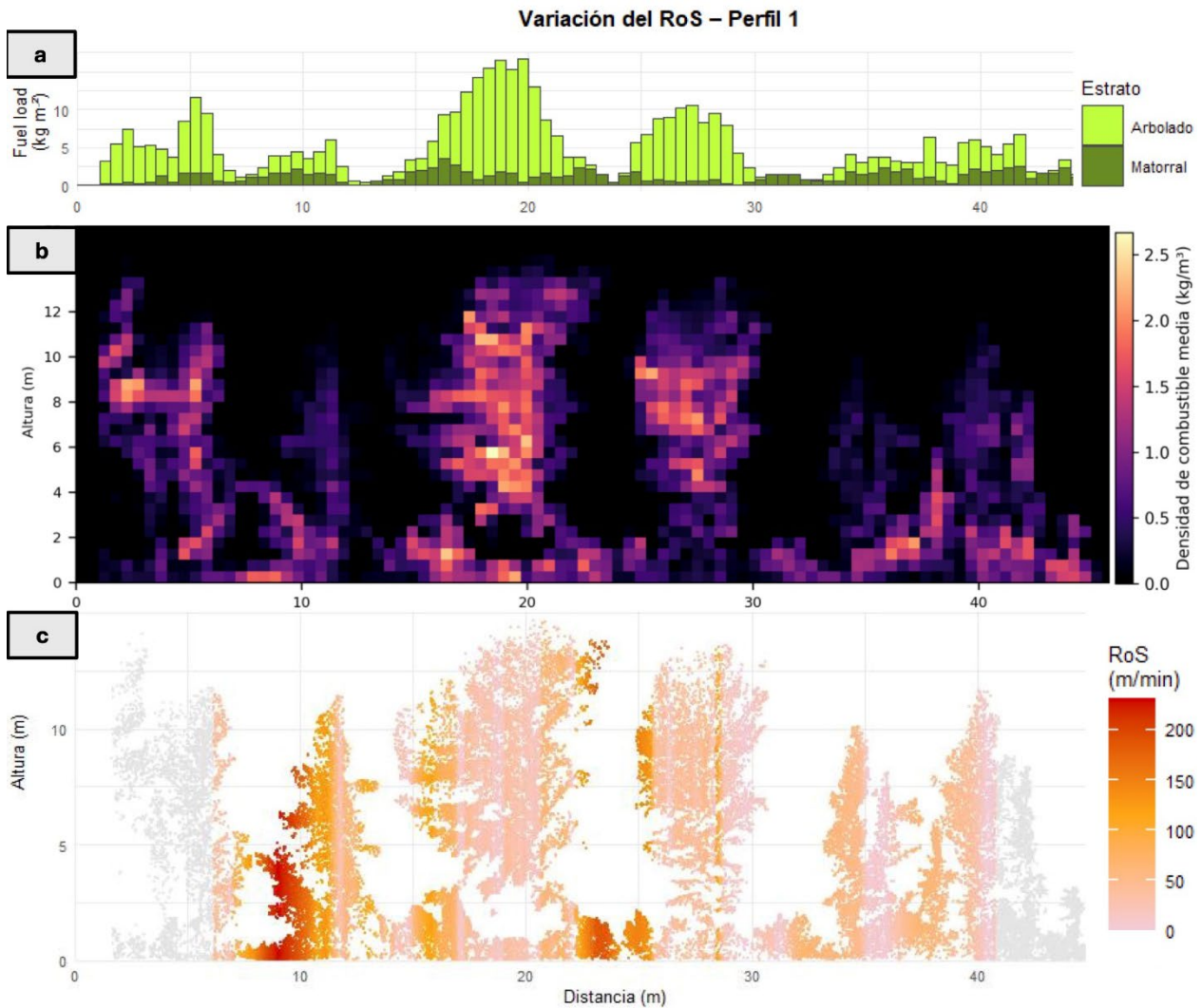


Figura 2. Representación de la sección longitudinal del perfil 1 a partir de diferentes variables: a) distribución de la carga de combustible (kg/m^2) para cada estrato, b) sección longitudinal XZ del escenario voxelizado con la densidad de combustible promediada (en kg/m^3), c) sección XZ de la nube de puntos con variación del color de los puntos en función del RoS (m/min).

estos hallazgos, el enfoque propuesto establece una base metodológica para desarrollar simulaciones más realistas y avanzar hacia la definición de estrategias de gestión y mantenimiento de la vegetación adaptadas a condiciones estructurales específicas.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por la ayuda PRE2021-099526, y los proyectos I+D+I PID2020-117808RB-C21 y PID2024-158591OB-I00 financiados por MCIN/AEI/ 10.13039/ 501100011033 y por FSE+.

6. REFERENCIAS

- Atchley, A. L., Linn, R., Jonko, A., Hoffman, C., Hyman, J. D., Pimont, F., Sieg, C., & Middleton, R. S. (2021). Effects of fuel spatial distribution on wildland fire behaviour. *International Journal of Wildland Fire*, 30(3), 179. <https://doi.org/10.1071/WF20096>
- Cooper, Z. T. (2022). *Using terrestrial LiDAR to quantify forest structural heterogeneity and*

inform 3D fire modeling. Sonoma State University.

- Dimitrakopoulos, A. P., & Panov, P. I. (2001). Pyric properties of some dominant Mediterranean vegetation species. *International Journal of Wildland Fire*, 10(1), 23–27. <https://doi.org/10.1071/WF01003>
- Marcozzi, A. A., Johnson, J. V., Parsons, R. A., Flanary, S. J., Seielstad, C. A., & Downs, J. Z. (2023). Application of LiDAR Derived Fuel Cells to Wildfire Modeling at Laboratory Scale. *Fire*, 6(10), 394. <https://doi.org/10.3390/fire6100394>
- Montero, G., López-Leiva, C., Ruiz-Peinado, R., López-Senespleda, E., Onrubia, R., & Pasalodos, M. (2020). *Producción de biomasa y fijación de carbono por los matorrales españoles y por el horizonte orgánico superficial de los suelos forestales* (P. y A. Ministerio de Agricultura, Ed.).
- Ruiz-Peinado, R., Del Rio, M., & Montero, G. (2011). New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *Forest Systems*, 20(1), 176–188.